

**REAL ACADEMIA DE CIENCIAS
EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES DE ESPAÑA**

**GEOLOGÍA PLANETARIA:
LA IMPORTANCIA DE LOS
ANÁLOGOS TERRESTRES EN LA
INVESTIGACIÓN PALEOAMBIENTAL Y
ASTROBIOLÓGICA DE MARTE**

DISCURSO LEÍDO EN EL ACTO DE SU RECEPCIÓN
COMO ACADÉMICO DE NÚMERO POR EL
EXCMO. SR. D. JESÚS MARTÍNEZ FRÍAS

Y CONTESTACIÓN DE LA
EXCMA. SRA. D^a LAIA ALEGRET BADIOLA

EL DÍA 26 DE JUNIO DE 2024



MADRID

Domicilio de la Academia: Valverde, 22

www.rac.es

**REAL ACADEMIA DE CIENCIAS
EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES DE ESPAÑA**

**GEOLOGÍA PLANETARIA:
LA IMPORTANCIA DE LOS
ANÁLOGOS TERRESTRES EN LA
INVESTIGACIÓN PALEOAMBIENTAL Y
ASTROBIOLÓGICA DE MARTE**

**DISCURSO LEÍDO EN EL ACTO DE SU RECEPCIÓN
COMO ACADÉMICO DE NÚMERO POR EL
EXCMO. SR. D. JESÚS MARTÍNEZ FRÍAS**

**Y CONTESTACIÓN DE LA
EXCMA. SRA. D^a LAIA ALEGRET BADIOLA**

EL DÍA 26 DE JUNIO DE 2024



**MADRID
Domicilio de la Academia
Valverde, 22**

A mis padres

A Joaqui, Enrique y Beatriz

ISSN: 0214-9540
ISBN: 978-84-87125-86-7
Depósito legal: M-13451-2024

ÍNDICE

1. Agradecimientos	7
2. Introducción.....	11
3. Geología planetaria	13
4. Objetivo Marte	23
5. De los Mars Exploration Rovers al Perseverance. Misiones e importancia de los análogos terrestres	33
5.1 Análogos terrestres y exploración de Marte.....	45
6. Consideraciones finales.....	57
7. Referencias	59

1. AGRADECIMIENTOS

Excmo. Sr. Presidente de la Academia,
Excmos. Miembros de la Academia, Doctoras y Doctores,
Familiares, compañeros y amigos,
Sras. y Sres.

La entrada en la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales representa para mí un gran honor, que ha sido posible gracias a numerosas personas a las que quiero expresar mi gratitud. En primer lugar, en relación con esta distinguida institución pública, mi agradecimiento para los tres prestigiosos académicos que presentaron mi propuesta como Académico Numerario: D. Antonio Cendrero, D^a Caridad Zazo y D. Juan María (Jon) Marcaide. Ellos fueron quienes expusieron y avalaron mis méritos ante los académicos de la Sección de Ciencias Naturales y al pleno de la Academia. Mi gratitud especial a todos ellos por su confianza, otorgándome con su voto el gran honor que representa para mí el hecho de haber llegado hasta aquí. Asimismo, estimo con la máxima consideración y todo un privilegio que sea D^a Laia Alegret Badiola quien conteste a mi discurso de ingreso.

Permítanme que, al detallar estos agradecimientos, me retrotraiga a mis inicios, en la época de los 70 del siglo pasado, cuando era un joven interesado y entusiasmado por la Naturaleza y el Universo. Antes que nadie, mis padres fueron quienes me apoyaron y alentaron en mis estudios y en la lectura en general, contribuyendo, de manera decisiva, al desarrollo de mi curiosidad y mi vocación científica. Posteriormente, todos mis profesores dejaron su huella académica y fraguaron, en mayor o menor medida, lo que hoy soy como científico. Mencionaré solo a algunos de ellos, que fueron fuente principal de motivación y guía, orientándome, apoyando y encauzando mi interés y actividades en el campo de la Geología.

En primer lugar, considero indispensable citar a D. Enrique Ramírez, mi profesor de Geología del Instituto Calderón de la Barca de Madrid. Él fue quién me abrió los ojos a las maravillas de esta ciencia, en sus apasionantes clases, donde nos explicaba sus campañas científicas y nos ilustraba sobre volcanes, terremotos, tectónica de placas, Marte, minerales, meteoritos y fósiles, entre otros temas. Sí, él fue la persona que hizo que me decantara por realizar la Licenciatura en Ciencias Geológicas en la Universidad Complutense de Madrid y quien me abrió la puerta a profundizar en los misterios de la Naturaleza y el Universo desde esta perspectiva.

Ya en la Facultad, mis profesores me aportaron ese barniz esencial que, poco a poco, fue haciéndome madurar como geólogo. Entre todos ellos, destaca, sin duda, la Prof. Dra. Rosario Lunar, Directora de mi Tesis de Licenciatura y Doctoral, Catedrática de Cristalografía y Mineralogía de la Universidad Complutense de Madrid, ExDirectora del Instituto de Geociencias y Académica de Número de la Real Academia de Doctores de España, donde es, actualmente, Presidenta de la Sección de Ciencias Experimentales. Puedo decir, con orgullo y agradecimiento, que, durante más de 40 años, he contado (y sigo contando) con su respaldo, consejos, colaboración y afecto.

De mis estancias de formación e investigación en el extranjero, mi agradecimiento especial al Prof. Harry Clemmey, de la Universidad de Leeds (UK), al Prof. Günter Moh, de la Universidad de Heidelberg (Alemania), al Prof. Steven D. Scott, de la Universidad de Toronto (Canadá) y al Prof. Kurt Marti, Universidad de California-San Diego (EE UU). Todos ellos me incorporaron con generosidad a sus grupos de investigación, aportándome conocimientos, experiencias e ideas vanguardistas sobre sedimentología y recursos, mineralogía experimental, chimeneas submarinas y ambientes extremos, cosmogeoquímica y meteoritos de Marte, respectivamente.

Específicamente en España, agradezco a todos mis compañeros de investigación de los institutos y centros de los que he sido miembro: Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra, Museo Nacional de Ciencias Naturales, Centro de Astrobiología e Instituto de Geociencias, su inestimable colaboración en los diversos estudios científicos desarrollados, en los que también han participado colegas de otros centros y universidades españolas y extranjeras. Sin ellos no habría sido posible conseguir los resultados obtenidos, que son consecuencia de trabajos de equipo, ni, muy probablemente, llegar a redactar este discurso de ingreso. Entre todos ellos, creo obligado destacar a tres colaboradores, realmente amigos, que siempre han estado ahí, apoyándome y compartiendo momentos: el Dr. Raúl Benito, del Museo Nacional de Ciencias Naturales de Madrid, el Dr. Antonio Delgado, del Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra de Granada y el Dr. José Antonio Rodríguez Losada, de la Universidad de La Laguna (Tenerife). También, desde el ámbito de la divulgación y comunicación científica a D. Manuel Seara Valero. Finalmente, por parte del Ilustre Colegio Oficial de Geólogos, al “Geólogo de Honor”, D. Enrique Pampliega Higuera.

Desde el punto de vista astrobiológico, deseo expresar mi gratitud al Prof. Juan Pérez-Mercader, primer director y principal impulsor del Centro de Astrobiología, asociado a la NASA, del que fui miembro de su convenio

fundacional, por su confianza al contar conmigo para la creación y establecimiento de dicho Centro, por encomendarme la dirección de su Laboratorio de Geología Planetaria y por su respaldo para la codirección de la Unidad Asociada CSIC-UVA de Cosmogeología y Astrobiología. Asimismo, al Prof. Dr. Bernd Michael Rode, de la Universidad de Innsbruck, con quien tuve el placer de coincidir en la Comisión de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo de la ONU. Como experto austriaco en astrobiología, establecimos colaboraciones relevantes desde el punto de vista académico y científico. Finalmente, a la Dra. Rosa de la Torre, del INTA, con quien vengo desarrollando interesantes investigaciones geobiológicas en la Estación Espacial Internacional, en proyectos relacionados con la Agencia Espacial Europea y en el marco de la Red Española de Planetología y Astrobiología (REDESPA).

Es un gran reconocimiento y me honra ocupar la medalla número 27 de esta Academia que, desde Marzo de 1847, ha contado con nueve distinguidos miembros que me han precedido, el primero de ellos Pedro María Rubio Martín de Santos. Entre otros muchos méritos, depositario de la Gran Cruz de la Real Orden Americana de Isabel la Católica y Caballero de la Real y distinguida Orden de Carlos III y de la Legión de Honor de Francia, fundador propuesto por designación real. A él le siguieron, Sandalio de Pereda y Martínez, Julián Calleja y Sánchez, Joaquín María Castellarnau y Llopart, Luis Ceballos y Fernández de Córdoba, Ángel González de Mendoza y Dorvier, Julio Garrido Mareca, Isidro Parga Pondal y Manuel Ramón Llamas Madurga. De todos ellos, permítanme que destaque a este último, como ilustre predecesor, a Luis Ceballos y Fernández de Córdoba por compartir con él haber sido ambos nacidos en Madrid y nuestra vinculación con el Consejo Superior de Investigaciones Científicas y a Julio Garrido Mareca e Isidro Parga Pondal por las investigaciones e interés por la mineralogía y la geoquímica. Además, con Isidro Parga Pondal, nuestra mutua pertenencia a la Real Academia de Doctores de España. Con tremenda gratitud y honor espero contribuir, al igual que todos ellos, a esta prestigiosa Academia, siguiendo su noble legado, en mi caso desde la geología planetaria.

Creo importante concluir este capítulo de agradecimientos haciendo constar la distinción, lucidez e inspiración que han supuesto para mí dos prestigiosos profesores y académicos de esta Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, con los que además tuve la fortuna de coincidir en mis comienzos: el Prof. Dr. Emiliano Aguirre Enriquez, como presidente del tribunal de mi tesis de licenciatura y el Prof. Dr. Ramón Capote del Villar, miembro del tribunal de mi tesis doctoral. Ambos me honraron

con su amistad, en el caso del Prof. Aguirre truncada desafortunadamente por su fallecimiento en 2021.

Por último, aunque no por ello menos importante, quiero agradecer a mi familia, mi esposa Joaquí y mis hijos Enrique y Beatriz, su fundamental respaldo personal y afectivo, aportándome su cariño, paciencia, comprensión y estabilidad.

2. INTRODUCCIÓN

*“The best way to study Mars
is with two hands,
eyes and ears of a geologist,
first at a moon orbiting Mars
... and then on the surface.”*

BUZZ ALDRIN

El cosmos es inmenso. Las últimas estimaciones indican que podría haber un trillón de planetas solo en nuestra galaxia y alrededor de 200 mil millones de galaxias solo en el universo observable. A fecha 1 de diciembre de 2023, ya hay confirmados 5500 exoplanetas, en 4089 sistemas planetarios, con 887 sistemas teniendo más de un planeta (Schneider, 2023). Por eso, debemos ser modestos en cualquier apreciación o consideración científica acerca de nuestro conocimiento sobre el universo y tener en cuenta nuestras limitaciones.

Salvo que exista algún descubrimiento revolucionario en cuanto a los esquemas y modelos cosmológicos y los medios para realizar viajes por el universo, todo parece indicar que, en el próximo siglo, la actividad humana se desarrollará sobre todo en el denominado “Espacio Cercano a la Tierra”. Desde el punto de vista astrogeológico, esto cubre la Luna, Marte y el cinturón de asteroides. Es decir, Marte será (ya lo está siendo) nuestro primer objetivo planetario. Nuestra generación está siendo pionera en la exploración de otros mundos, lo que conlleva una gran responsabilidad, también ética.

Se asigna a la escritora Penelope Riley (Riley, 2008) la frase: *“El final del viaje no es el destino, sino los contratiempos y recuerdos que se crean en el camino”*. Y así es. Marte no es ni el final del viaje ni el destino, pues es solo una puerta abierta a ir más allá en nuestra exploración del cosmos y a manifestar también nuestras propias experiencias en este periplo. Como decía Ibn Battuta *“Viajar te deja sin palabras y después te convierte en un narrador de historias”* (Ibn Battuta, 1829). Más allá de los resultados científicos, estos recuerdos e historias son los que pretendo compartir en este discurso. Y lo haré destacando determinados temas y momentos relevantes, como si se tratara de fotografías seleccionadas de una película vital que aún continúa, pues el viaje no ha concluido.

Este discurso representa un viaje de la Tierra a Marte a través de la Geología Planetaria, tanto al presente como al pasado del planeta. Pero, también es un viaje personal. Un recorrido de más de 40 años, donde expondré mi implicación en esta temática y algunas de las investigaciones desarrolladas, centrándome en cuatro ámbitos científicos: 1) una descripción sintética sobre la emergencia y evolución de la geología planetaria, incidiendo en su desarrollo y en mi contribución específica; 2) los estudios sobre materia extraterrestre (meteoritos) en este caso, de Marte; 3) mi participación en los equipos científicos de misiones espaciales a Marte, principalmente de la NASA y 4) la realización de campañas científicas sobre análogos terrestres en España y otros países, destacando los más relevantes. Trataré en todos ellos de ilustrar la implicación de nuestro equipo de investigación.

La geología planetaria se ha convertido en un área esencial para la futura habitabilidad humana en el espacio, de manera que es decisiva, al igual que en la Tierra, para los estudios sobre recursos naturales del espacio, ingeniería espacial, agricultura espacial, arquitectura espacial, medicina espacial, derecho espacial, ética espacial, etc., en un mestizaje inter y transdisciplinar que ya forma parte de las misiones lunares y planetarias en desarrollo. Estas imbricaciones tienen también una componente en nuestro propio planeta a través de la investigación de los denominados análogos terrestres: zonas singulares de la Tierra donde podemos validar modelos científicos, probar nuevos prototipos y equipos analíticos, establecer estándares y protocolos de actuación y, en definitiva, utilizarlos como laboratorios naturales para el desarrollo de actividades de planetología comparada útiles en las futuras misiones espaciales.

Marte, como tema en sí mismo, tiene un carácter poliédrico, de manera que su investigación puede abordarse desde distintas perspectivas y aproximaciones científicas. Por ello, a lo largo de esta exposición intentaré marcar ese hilo conductor espacial y temporal que, desde la geología planetaria, conecta diversos aspectos. La utilización de los análogos terrestres nos permite establecer comparaciones con el Marte actual y con el Marte antiguo, trasladándonos incluso a miles de millones de años atrás en el tiempo, cuando las condiciones de habitabilidad del planeta fueron más favorables que las actuales. Asimismo, ya se están preparando las futuras misiones tripuladas y los análogos terrestres están también sirviendo de plataformas en la Tierra para numerosas pruebas, incluyendo, entre ellas, la instrucción de astronautas. Es todo un desafío.

3. GEOLOGÍA PLANETARIA

A lo largo de este último medio siglo, se ha producido una auténtica revolución científica y metodológica en las investigaciones espaciales. La astronomía, astrofísica e ingeniería aeroespacial abrieron la puerta inicialmente a este nuevo escenario en el que posteriormente se ha incorporado la geología planetaria (o astrogeología), junto con otras disciplinas, como la astroquímica, la astrobiología, la robótica o las tecnologías de comunicación, por mencionar solo algunas de ellas.

El término astrogeología fue propuesto, en 1961, por Eugene Shoemaker considerado internacionalmente como fundador de la disciplina (Fig.1). Como anécdota relevante, tras el fallecimiento de Shoemaker, el 18 de julio de 1997 (NAS, 2024), dos años después, el 31 de julio de 1999, parte de sus cenizas fueron llevadas a la Luna en una cápsula especial transportada por la sonda Lunar Prospector (NASA, 1999). Eugene Shoemaker es la única persona cuyos restos reposan en nuestro satélite. Si a ello, añadimos que, hasta el momento, el único científico que ha estado en la Luna ha sido un geólogo, Harrison Schmidt, en la misión Apolo 17 (NMCO, 2021), la anécdota cobra aún mayor relevancia y enfatiza el valor de la geología en la exploración planetaria.



Figura 1. Eugene Shoemaker, geólogo considerado el padre de la astrogeología o geología planetaria, en el borde del Barringer Meteor Crater (Arizona). Un cráter de impacto meteorítico emblemático en el ámbito de la geología planetaria. Foto: USGS

Aunque no existe una definición concreta y estandarizada de la astrogeología o geología planetaria, una de las mejores corresponde a la utilizada por la Arizona State University: una institución emblemática y pionera en esta línea de investigación (ASU, 2023). La geología planetaria puede definirse como *“el estudio a distintas escalas, del origen, evolución y distribución de la materia condensada en el universo en forma de planetas, satélites, cometas, asteroides y partículas de distintas dimensiones y génesis. Conlleva la incorporación y estudio pormenorizado de datos procedentes de sondas espaciales, análisis comparados de meteoritos y polvo cósmico, estructuras y eventos de impacto meteorítico, simulaciones de laboratorio de varios procesos planetarios y también estudios de campo sobre análogos terrestres útiles para la exploración y modelización de los mecanismos y procesos geológicos que tienen lugar más allá de las fronteras de nuestro planeta”* (Martínez Frías, 2009a).

Siendo amplia, esta definición no caracteriza en su totalidad el trabajo que se aborda en la disciplina. Se sustenta también en las matemáticas, física, química y biología en un cruce científico-técnico que, además de enriquecer el área de las Ciencias de la Tierra, es una base fundamental para la evolución interdisciplinar del conocimiento en su sentido más amplio. Es importante destacar que el propio Servicio Geológico de Estados Unidos dispone de un programa específico de investigación en Astrogeología “USGS Astrogeology Research Program”, que lleva decenios funcionando, a través de numerosos proyectos, principalmente sobre planetas rocosos (incluyendo la Tierra), satélites de hielo y otros temas relacionados con el sistema solar (USGS, 2023).

El desarrollo posterior de la Astrobiología, gracias principalmente al impulso del NASA Astrobiology Institute (NAI, 2020), ha contribuido a poner de manifiesto la importancia del conocimiento geológico en las misiones espaciales, tanto para la identificación e investigación de ambientes y paleoambientes planetarios, como para el establecimiento de las necesarias relaciones entre geo y biomarcadores (Martínez Frías et al. 2007). Todas ellas son cuestiones relacionadas directamente con la temática del presente discurso.

La geología planetaria está contemplada, de manera específica, en organismos y documentos de Naciones Unidas. Constituye un ámbito temático concreto, reconocido oficialmente en el contexto internacional de campos, disciplinas y subdisciplinas científicas de la UNESCO (código UNESCO: 2104.04), cuya revisión y reorganización se ha propuesto recientemente

(Martínez Frías y Hochberg, 2007). Además de en su codificación disciplinar, la geología planetaria también está contemplada en algunas Resoluciones de la ONU. Concretamente, en la Resolución 76/76, adoptada el 9 de diciembre de 2021 y publicada y distribuida el 15 de diciembre de ese mismo año, Tema nº 53: *Cooperación internacional para la utilización del espacio ultraterrestre con fines pacíficos* (ONU, 2021). Así, en su punto 34, se especifica que se tenga en cuenta “*la utilización de datos geoespaciales*”.

Asimismo, esta disciplina ha demostrado -y está demostrando- ser decisiva para comprender el origen y los procesos de evolución de planetas, lunas, asteroides y, desde el punto de vista astrobiológico, para determinar las claves científicas de búsqueda de vida extraterrestre. Marte ejemplifica a la perfección ambos aspectos. Como exponía recientemente en mi discurso de ingreso en la Real Academia de Doctores de España (Martínez Frías, 2023), nos encontramos en un momento crucial en el ámbito de la exploración espacial, ya que estamos a punto de dar el salto que nos convierte definitivamente en especie interplanetaria. La Luna es el primer paso, pero Marte es nuestro primer objetivo planetario para el futuro desarrollo de misiones tripuladas a otros mundos. Ello constituye un signo inequívoco del cambio de paradigma en el que estamos inmersos y que, estoy convencido, marcará socioculturalmente a las próximas generaciones.

La geología planetaria -con objetivos claros de comprender el mensaje implícito en los materiales y procesos en otros cuerpos planetarios-, jugó un papel crucial en las primeras misiones tripuladas a la Luna. En los años 60 del siglo pasado se establecieron los fundamentos astrogeológicos básicos, gracias a la labor, entre otros, del Dr. Eugene Shoemaker, mencionado previamente (Phinney, 2015). Shoemaker entrenó geológicamente a los futuros astronautas de las misiones Apolo con rocas, minerales y meteoritos. Y también, realizando campañas científicas de campo a cráteres de impacto, como el *Barringer Meteor Crater*, en Arizona (Fig.1), e incluso generando artificialmente estos cráteres y sus materiales eyectados, mediante explosiones controladas (Fig.2).

La Tierra se convertía, por tanto, en un laboratorio natural para la exploración espacial, constituyendo una nueva y vanguardista aproximación científica a la exploración del cosmos. De esta manera, además de ser un sistema, nuestro planeta se transformaba también en un modelo, el “Modelo Tierra”.



Figura 2. Fotografía de 1968, perteneciente al U.S. Geological Survey Astrogeology Science Center, que muestra la generación de cráteres artificiales en un campo de cenizas volcánicas, al este de Flagstaff, Arizona. Foto USGS-ASC (Russel y Fonseca, 2019)

Así comenzaba la utilización de la geología para el desarrollo de investigaciones sobre Planetología comparada y su implicación en las misiones, no solo robóticas. Se establecían los principios de la Geología planetaria o Astrogeología.

Específicamente en España –sin ánimo de ser exhaustivo–, las primeras iniciativas sobre geología planetaria se centraron en nuestro satélite, en los años 70 del siglo pasado, tras la llegada del Apolo 11 a la Luna en julio de 1969. Así, cabe destacar, de manera pionera, el “*I Seminario de Geología Lunar*” organizado en Barcelona por el prestigioso académico de esta Real Academia de Ciencias, el Prof. Alfredo San Miguel Arribas, en el que participó el Prof. Joan Oró (UB, 1970) y que tuvo otras ediciones en 1983 y 1986 (Martínez Frías, 2023).

A estas fechas se remonta mi inicio en esta temática, en el “*Curso de Introducción a la Geología Planetaria*” desarrollado en 1983 en la Facultad de Ciencias Geológicas de la Universidad Complutense de Madrid, en colaboración con el Instituto de Ciencias de la Educación. Como curiosidad, considero importante destacar que algunas de las diapositivas utilizadas, me fueron amablemente cedidas por el Prof. Alfredo San Miguel Arribas.

A mediados de los 80, con la llegada a España de la Sociedad Planetaria, cofundada por Carl Sagan, y a la que tuve la fortuna de incorporarme desde el principio, como miembro y posteriormente como coordinador en España, se dispuso de un foro más apropiado para abordar algunas de estas temáticas geológicas y establecer contactos internacionales en un contexto específico para su desarrollo (Martínez Frías, 2023). Posteriormente, a través del Foro MERGE (Meteoritos y Recursos Geológicos del Espacio), que establecimos en 1988 (MERGE, 2013), en principio como una lista de distribución de la RedIris, y diez años más tarde como parte de la Comunidad Virtual “TIERRA” (TIERRA, 2011), se canalizaron interesantes iniciativas y debates que abrieron nuevas líneas de colaboración acerca de esta temática (Martínez Frías y Somoza, 2002).

TIERRA se transformó posteriormente en la actual REDESPA (Red Española de Planetología y Astrobiología) (Martínez Frías y De la Torre, 2014; REDESPA, 2023). En el marco de TIERRA y MERGE se impulsaron y realizaron numerosas actividades desde el Museo Nacional de Ciencias Naturales de Madrid y el Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra de Granada, incluyendo impartición de conferencias y publicación de artículos científicos y de divulgación sobre geología planetaria, meteoritos e impactos y recursos del espacio.

Salvo algunas excepciones, como la novedosa tesis doctoral del español Agustín Fernández Chicarro sobre Marte, realizada en Francia, con quien tuve la fortuna de compartír despacho estando en el Museo Nacional de Ciencias Naturales de Madrid, la geología planetaria estaba centrada, sobre todo, en algunos ámbitos docentes de manera muy puntual; en determinadas universidades, como en Madrid (Anguita, 1993), Salamanca, Granada, Barcelona y La Laguna. En España no existían apenas investigaciones sobre esta temática, publicadas en revistas internacionales.

Pero, a finales de los 90, se estaba fraguando en nuestro país algo realmente importante desde el punto de vista institucional y científico: la creación del Centro de Astrobiología (Fig.3), un centro mixto del CSIC y del INTA, asociado al NASA Astrobiology Institute.



Figura 3. Esquema explicativo de la Astrobiología, diseñado desde el Centro de Astrobiología para la inauguración del CAB y para un libro asociado (Salomone, 2002).

Su principal impulsor y primer director fue, como se ha indicado previamente, el Prof. Juan Pérez Mercader. El nacimiento con fuerza de la Astrobiología a nivel internacional, supuso un espaldarazo tremendo para el desarrollo de muchas otras disciplinas, entre ellas, la geología planetaria y así se reflejó también en España (Martínez Frías, 2008 a,b). El Prof. Pérez Mercader me ofreció no solo participar como miembro de su plantilla oficial en el convenio fundacional del CAB, sino también en la dirección del laboratorio de geología planetaria, definiendo sus líneas científicas y de instrumentación. Este laboratorio, en cuanto a concepción estructural y relaciones interdisciplinarias, fue el primero del país de sus características.

Otras actividades destacables sobre esta disciplina, realizadas ya desde el CAB, fueron:

1. las desarrolladas a través del Ilustre Colegio Oficial de Geólogos (ICOG), con conferencias, seminarios y cursos de formación a través de la Escuela de Geología Profesional. En este ámbito fue muy relevante la incorporación de la geología planetaria como una de las funciones profesionales a desarrollar por los geólogos (ICOG, 2001). Concretamente, el Real Decreto 1378/2001, de 7 de diciembre, por el que se aprobaron los Estatutos del ICOG, en el que en el capítulo 1, Artículo 21, se hizo constar, con el número 39, la *geología planetaria* como función a desempeñar.

2. las llevadas a cabo en el Museo de las Ciencias de Castilla-La Mancha (Cuenca), centro que más directamente se ha implicado en la organización de congresos y seminarios concretos sobre el tema.
Fue sede de tres eventos importantes: a) el Congreso Ibérico de Meteoritos y Geología Planetaria (Fig.4), celebrado en octubre de 2002 (TIERRA, 2002; Martínez- Frías y Madero, 2004); b) el primer seminario científico de astromineralogía y mineralogía espacial, organizado este mismo año en el marco de la XXIV Reunión de la Sociedad Española de Mineralogía (Martínez-Frías et al. 2004) y c) el Seminario científico de conmemoración del 70 Aniversario del nacimiento de Carl Sagan (Lunar y Martínez Frías, 2004; TIERRA, 2004).
3. las realizadas en 2008, en el marco del VII Congreso Geológico de España en Las Palmas de Gran Canaria y a través del cual se estructuraron cuatro ámbitos temáticos para la geología planetaria, con objeto de analizar y debatir su estado en esos momentos y sus perspectivas de futuro (Martínez Frías et al, 2008 a,b): a) la investigación (y conexiones interdisciplinarias) en el marco de las Ciencias de la Tierra, del Espacio y de la Vida; b) la docencia en Facultades de Geología y Escuelas de Ingeniería; c) la divulgación y su coordinación a distintos niveles (mediante las actividades de los museos de ciencias y la realización de congresos, conferencias y seminarios temáticos) y d) las perspectivas futuras de desarrollo en España.



Figura 4. Participantes en el Congreso Ibérico de Meteoritos y Geología Planetaria celebrado en el Museo de las Ciencias de Castilla-La Mancha (Cuenca). A esta conferencia internacional, asistieron científicos del prestigio de Alan Boss (Carnegie Institution), Kurt Marti (UCSD) o Liudmila Glazovskaya (Moscow State University).

Ese mismo año, el Ilustre Colegio Oficial de Geólogos se encontraba elaborando una obra multiautor sobre “La profesión de geólogo” (ICOG, 2009), en la que se perfilaron con precisión las líneas científicas principales de la geología planetaria, incidiendo, sobre todo, en su marcado carácter multidisciplinar (Martínez Frías, 2006).

Hoy en día, la geología planetaria se encuentra en pleno desarrollo en los países avanzados y en España va ocupando, aunque lentamente, mayores espacios, tanto en ámbitos científicos como docentes. Por citar una de las iniciativas recientes para el avance de esta línea de investigación: la fundación de la comisión de geología planetaria de la Sociedad Geológica de España fue aprobada hace seis años (SGE-CGE, 2018) y ya se han desarrollado numerosas actividades, entre ellas tres colaboraciones destacadas con el Geolodía (Geolodía en Marte, Geolodía en la Luna y Mundos de Hielo).

Uno de los aspectos en los que, sin duda, España está siendo protagonista internacional indiscutible es el establecimiento, investigación y utilización, desde distintas perspectivas, de los análogos terrestres. España alberga una gran geodiversidad (Nieto, 2001). Somos el segundo país del mundo en geoparques de la UNESCO después de China. Por ello, contamos con modelos de análogos terrestres reconocidos internacionalmente, como Río Tinto, la zona del Jaroso-Sorbas-Cabo de Gata, la región volcánica de Calatrava, el Golfo de Cádiz o las Islas Canarias, por mencionar solamente algunos de ellos (Muñoz Aragón et al. 2017).

Ningún lugar de la Tierra es exactamente como Marte o cualquier otro planeta o luna de nuestro Sistema Solar. Sin embargo, existen determinadas zonas de la Tierra que presentan características singulares y únicas (Martínez-Frías, 2015), por su geomorfología, mineralogía, petrología, geoquímica, etc., que permiten utilizarlas como modelos para otros planetas.

Concretamente, en las Islas Canarias venimos impulsando y desarrollando investigaciones con esta perspectiva desde hace más de 30 años y Lanzarote se ha posicionado como uno de los lugares más importantes del mundo en este contexto geológico planetario (Martínez Frías, 2016b; Martínez Frías et al. 2016; 2017, Mateo Mederos et al. 2019). De hecho, la Agencia Espacial Europea ha establecido un Curso de instrucción de astronautas en cuatro zonas seleccionadas del planeta y Lanzarote es una de ellas. Me honra ser el único científico español que forma parte como ins-

tractor de dicho programa (ESA-PANGAEA, 2016). Más adelante, abordaré en detalle estos aspectos.

Espero poder contribuir a que esta Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, impulse actividades encaminadas al desarrollo y difusión de la Geología Planetaria en nuestro país, mediante conferencias, seminarios e iniciativas nacionales e internacionales en colaboración con la ESA, la NASA, la ISS y otras agencias espaciales. Ello no solo impulsará las investigaciones que ya se están desarrollando, por ejemplo, en el estudio de análogos y misiones, sino que podrá contribuir a la conexión ciencia- sociedad a través de la divulgación de dichas actividades y proyectos.

El desafío es enorme y obviamente requerirá un análisis pormenorizado de cómo abordar algo que ya es presente y que, sin duda, constituye también una proyección y una clara e inequívoca apuesta científica y sociocultural hacia el futuro.

4. OBJETIVO MARTE

Todas las misiones espaciales, en particular las misiones a Marte, están poniendo de manifiesto la importancia de la Geología Planetaria o Astrogeología, como una disciplina crucial para comprender y reconstruir los paleoambientes planetarios y sus escenarios pasados y presentes: una de las claves principales para determinar sus condiciones de habitabilidad y la búsqueda de vida. Marte constituye el primer paso de la Humanidad hacia otro planeta. Una iniciativa que conlleva numerosos aspectos ligados a la ciencia, la tecnología y muchas otras cuestiones vinculadas a la actividad del ser humano, también relacionadas con las ciencias sociales.

Sería pretencioso por mi parte intentar explicar toda la compleja evolución geológica de Marte. Pero, sí creo que procede aportar unas claves que permitan comprender cómo ha sido esa evolución y sus implicaciones a distintos niveles, incluidos los relacionados con la posible existencia de vida pasada (y tal vez presente) y también con nuestra futura habitabilidad allí. Cuando hablo de búsqueda de vida, me refiero obviamente a la presencia de posibles microorganismos extremófilos o sus biomarcadores. A pesar de todo lo que nos queda por investigar, ya disponemos de un conocimiento razonable sobre la evolución geológica de Marte, su dicotomía litosférica y una cartografía global detallada (Fig.5) (Tanaka et al. 2014 a,b),

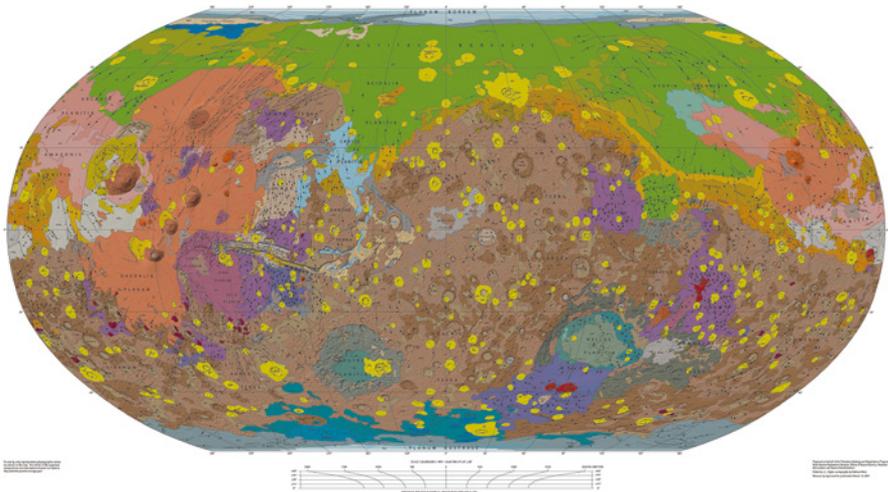


Figura 5. Mapa Geológico Global de Marte Tanaka et al. 2014 a,b. Hasta el momento, la cartografía más detallada a escala planetaria <https://www.usgs.gov/media/images/geologic-map-mars>

Se han reconocido sus principales unidades litológicas, sus cráteres, volcanes y estructuras geomorfológicas (Zimbelman et al. 2015) e incluso una primera distribución mineralógica (Fig.6) (ESA, 2013), que va adquiriendo progresivamente mayor detalle.

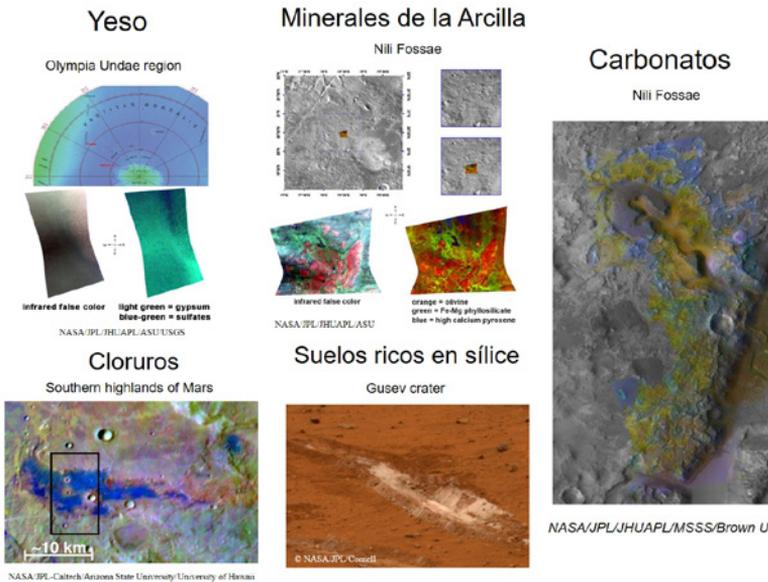


Figura 6. Distribución de algunos minerales en Marte. Esta cartografía mineralógica es relevante desde el punto de vista paleoambiental y también como potenciales geomarcadores de habitabilidad y búsqueda de vida.

Es importante tener en cuenta que, en sus primeras etapas de evolución planetaria, Marte fue muy diferente a como es en la actualidad (Fig.7), con un pasado acuoso en cierto modo similar al de la Tierra y una particular evolución geológica, mineralógica y climática (Bibring et al. 2006; Ehlmann et al. 2011; Matsubara et al. 2013; Ramirez y Craddock, 2018). Existen evidencias inequívocas de que, en sus primeras etapas evolutivas como planeta, Marte tuvo una actividad geológica muy importante (Fig.7), con volcanes activos, algunos de ellos espectaculares, como el Monte Olimpo (el más alto y prominente volcán en escudo del sistema solar, con cerca de 600 km de base y 22 km de altitud) (NASA, 2004; Mouginitis-Mark, 2018), sistemas hidrotermales (Farmer, 1996; Abramov et al. 2005; Schulze-Makuch et al. 2007) y escorrentía superficial, con ríos (Dickson et al. 2020), lagos, torrentes, deltas (De Toffoli et al. 2021) y probablemente un gigantesco océano (Di Achille et al. 2010) que cubrió una buena parte de su hemisferio norte.

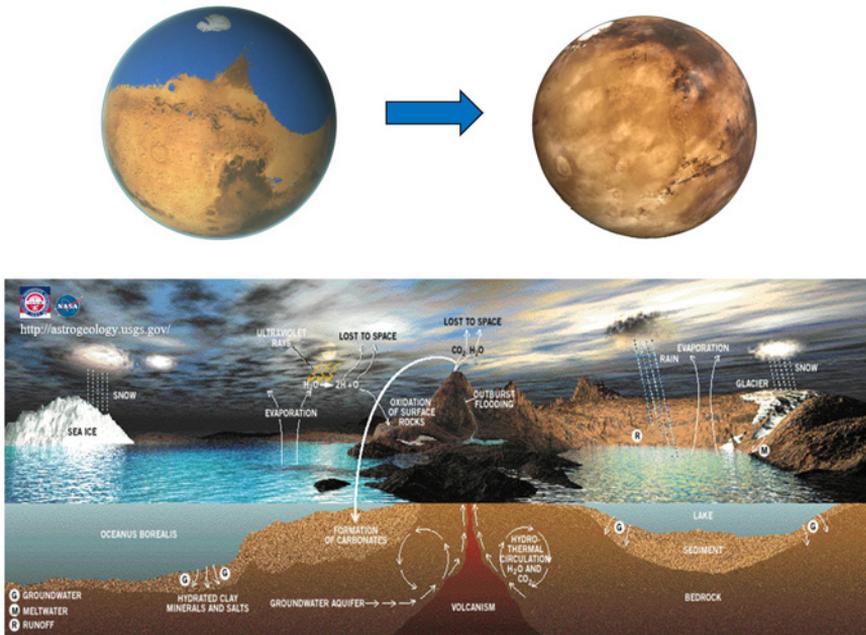


Figura 7. Marte sufrió una evolución drástica desde unas condiciones pasadas, similares a las terrestres, a las de un planeta prácticamente sin actividad geodinámica y una atmósfera muy distinta a la primitiva, mucho más densa y enriquecida en vapor de agua. Todos los modelos sugieren que tuvo sistemas acuosos superficiales e hidrotermalismo.

La pasada actividad geodinámica del planeta fue crucial para contribuir a unas condiciones iniciales de habitabilidad mucho más favorables que las actuales. La existencia de campo magnético, del que actualmente solamente quedan parches remanentes (Acuña et al., 1999; Connerney et al. 2015) y el calor e ingentes cantidades de volátiles emitidos por los numerosos volcanes a la atmósfera de Marte (Halevy et al. 2014), aportaron los elementos necesarios para que las condiciones superficiales del planeta -con una atmósfera más densa y rica en vapor de agua que la actual y agua líquida estable en su superficie-, dispusiera de una gran geodiversidad paleoambiental. Una geodiversidad que, tal vez, propició la posible emergencia de la vida en diferentes contextos, algo a tener en cuenta desde el punto de vista astrobiológico para el desarrollo de cualquier misión.

La progresión de nuestro conocimiento sobre Marte ha venido dada, fundamentalmente, por las numerosas misiones espaciales (TPS, 2023a), tanto orbitadores como aterrizadores (landers) y vehículos de exploración

(rovers). Centrándonos en el ámbito de la NASA, desde los Viking (Viking Lander I) a los asombrosos rovers Curiosity y Perseverance, en cuyos equipos científicos me cabe el honor de participar. Considero importante señalar que la Viking I fue la segunda sonda espacial que consiguió aterrizar exitosamente en Marte, el 20 de julio de 1976. La primera fue la sonda rusa Mars 3, en 1971, aunque desafortunadamente se perdió la comunicación a los pocos segundos de su aterrizaje. Actualmente, los rovers Curiosity y Perseverance (Ho, 2023 a, b) están aportando una información extraordinaria, especialmente si nos remontamos al pasado acuoso del planeta. Posteriormente, me referiré a ello con mayor detalle.

Pero, además de las *misiones a Marte* existen otros pilares que sustentan la investigación y el conocimiento que adquirimos sobre el planeta, incluso sin la necesidad de salir de la Tierra. Es aquí donde, de manera crucial, entra también en juego la geología planetaria. Las preguntas son ¿Cómo es esto posible? ¿de qué manera somos capaces de adentrarnos en los enigmas de Marte y abordar el estudio y caracterización de sus materiales y los procesos ocurridos a millones de kilómetros sin necesidad de estar allí con una sonda espacial?

Uno de ellas es la investigación de los *meteoritos de Marte*, fragmentos del planeta que, tras sufrir un gigantesco impacto, fueron eyectados y atrapados posteriormente por la gravedad de la Tierra. La última revisión de la base de datos del Meteoritical Bulletin de la Sociedad Meteorítica, llevada a cabo el pasado 22 de diciembre, indica que existen 368 ejemplares de meteoritos procedentes de Marte. Su identificación y caracterización, basada en su composición mineralógica, geoquímica y sobre todo isotópica, ha permitido encuadrar a todos ellos en los tres grupos principales de meteoritos marcianos (Fig.8), conocidos con el acrónimo SNC: Shergottitas (Shergotty: caído en Shergati, India en 1865), Nakhlitas (Nakhla, caído en El-Nakhla, Egipto, en 1911) y Chassignitas (Chassigny, Francia, caído en 1815). Aparte de estos, existe un conjunto adicional y complejo de ejemplares marcianos clasificados como “desagrupados”.

Entre ellos, probablemente el más famoso, es el meteorito ALH84001 (Meyer, 2012), una ortopiroxenita encontrada en Allan Hills, Antártida, en 1984 y que alcanzó un lugar relevante en la historia de la ciencia en general y la astrobiología en particular, cuando, en 1996, se propuso que podría contener indicios de vida en el Marte antiguo (Mckay et al. 1996). Obviamente, este tema dio lugar a un extraordinario debate científico (Dávila et al. 2009) que, para algunos autores, aún no ha concluido. Este estudio lide-

rado por David Mackay, quien por cierto participó en algunas de nuestras campañas en Río Tinto, contribuyó al desarrollo de la astrobiología, marcando un antes y un después. Su artículo ayudó a comprender mejor cómo reconocer los diferentes tipos de biomarcadores y a utilizar este término en su justa medida, diferenciando aquellos indicadores de habitabilidad de lo que serían biofirmas *sensu stricto*. El contexto de esta controversia nos llevó a proponer el término geomarcador (centrado en las condiciones de habitabilidad; en el contexto geológico y ambiental) para diferenciarlo de los biomarcadores (relacionados inequívocamente con la vida) (Martínez Frías et al. 2007a).

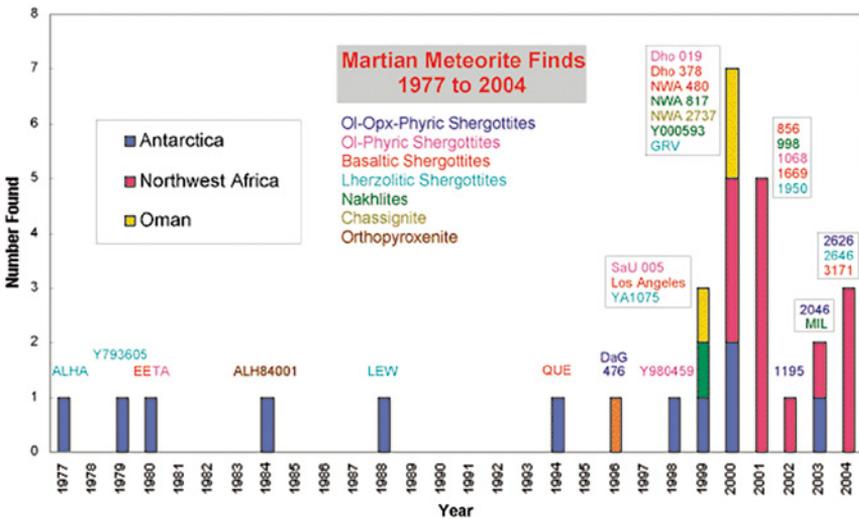


Figura 8. Gráfico mostrando la relación, tipología y frecuencia de hallazgos de meteoritos marcianos entre 1977 y 2004 en la Antártida, Omán y NO de África.

A nivel personal, debo confesar que me apasiona el estudio de la materia extraterrestre, especialmente los meteoritos. A lo largo de mi carrera, he tenido la fortuna de poder estudiar diferentes tipos de meteoritos asteroidales (Martínez Frías et al. 1989a; Muñoz Espadas et al. 2002; MERGE, 2013), algunos emblemáticos como el meteorito de Molina de Segura, Murcia (el mayor caído en España) (Martínez Frías y Lunar, 2008) o los de Toluca (González Toril et al. 2005) o Allende, en México (Rull y Martínez Frías, 2004; Campanero et al. 2015), e incorporar siete ejemplares de meteoritos al catálogo internacional (Meteoritical Bulletin), entre ellos el meteorito de Valencia (Muñoz Sanz et al. 1999).

Además, hace ahora 22 años, tuve la oportunidad de participar en un vuelo de la NASA/SETI (Fig.9) para estudiar las partículas de meteoroides cometarios de las Leónidas, procedentes del cometa Temple/Tuttle (NASA-Leonid, 2002).



Figura 9. Miembros del grupo de científicos participantes en el vuelo NASA/SETI de la campaña “Leonid MAC mission”. El experimento español del CAB fue el “Near IR Carbon Line (NIR/CL)”. De izquierda a derecha: Javier Martín Soler y Jesús Martínez Frías (Centro de Astrobiología), Peter Jenniskens (SETI Institute) y Rudiger Jehn (European Space Agency).

Los meteoritos asteroidales también son importantes desde el punto de vista astrobiológico en relación con Marte. Al igual que en la Tierra, las condritas carbonáceas, especialmente ricas en compuestos orgánicos (aminoácidos, ureas, purinas, hidrocarburos policíclicos aromáticos, azúcares e incluso las bases nitrogenadas; Ehrenfreund y Charnley, 2000; Oba et al, 2022), tuvieron que dejar una impronta geoquímica importante en el regolito (suelo) marciano y tal vez haber jugado un papel fundamental en la posible emergencia de la vida en el planeta.

Pero, si los meteoritos son interesantes en sí mismos, los meteoritos de Marte lo son aún más. ¿Quién no se asombra al tener entre sus manos y poder investigar un fragmento de otro planeta? De hecho, hasta el momento es el único planeta que somos capaces de estudiar de esta manera. Por eso, creo que fui afortunado cuando, en 2003, la Dra. Monica Grady nos facilitó un pequeño fragmento de 100 mg del meteorito marciano de

Nakhla, perteneciente a la colección del Museo de Historia Natural de Londres. Pudimos investigar su mineralogía mediante diferentes técnicas, entre ellas la espectroscopía Raman (Rull et al. 2004), descubriendo la presencia de carbonatos, principalmente siderita y calcita (Fig.10), y compararla con la de otro meteorito que estábamos estudiando, el mesosiderito de Vaca Muerta, llevando a cabo un análisis comparativo único en aquel momento.

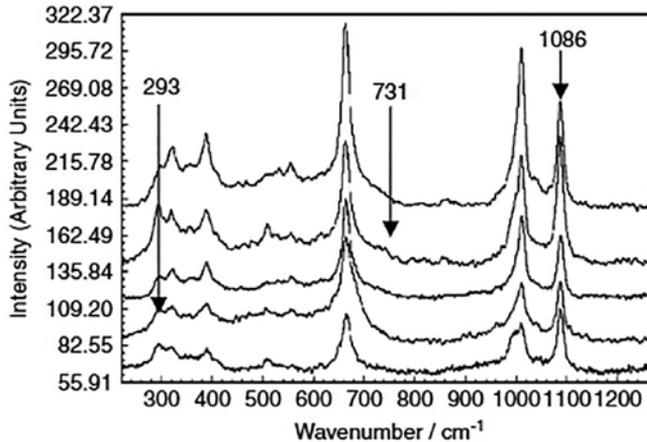


Figura 10. Espectros Raman de siderita descubierta en el meteorito marciano de Nakhla. Este carbonato aparece, en todos los casos, asociado a los clinopiroxenos (Rull et al. 2004).

Otra forma de trabajar en Marte desde la Tierra (salvando las distancias), es mediante el uso de las *cámaras de simulación planetaria (Marte)*, que consisten en una instrumentación muy sofisticada que nos permite emular las condiciones de Marte u otro planeta o luna, de manera que se pueden realizar análisis espectroscópicos y químico-mineralógicos bajo sus condiciones específicas; algunos con interesantes implicaciones astrobiológicas. En el caso concreto de Marte, con CO₂, radiación ultravioleta, baja temperatura y presión atmosférica.

En este contexto, se llevaron a cabo, por parte del equipo, varios estudios en una de las cámaras del Centro de Astrobiología (PASC: Planetary Atmosphere and Surfaces Chamber) (Mateo-Martí, 2014), combinando la petrología con la geoquímica y la mineralogía, bajo condiciones marcianas, con objeto de determinar sus implicaciones en la calibración de los instrumentos y también en astrobiología.

Para ello, utilizamos polvo basáltico (Fig.11), jarosita y yeso con objeto de establecer y cuantificar si estos podrían actuar como escudos frente a la radiación UV del planeta y en qué medida. Comprobamos que tan solo 300 μm de basalto o 1 mm de yeso o jarosita ya eran suficientes para que tuvieran un efecto de escudo (shielding) anti radiación UV, bajo condiciones marcianas (Muñoz Caro et al. 2006; Martínez-Frías et al. 2006). Es decir que una supuesta colonia de microorganismos, que estuviera viviendo a esta corta distancia, estaría protegida de la radiación, gracias al regolito basáltico o a los sulfatos, frente a las hostiles condiciones de la superficie de Marte.

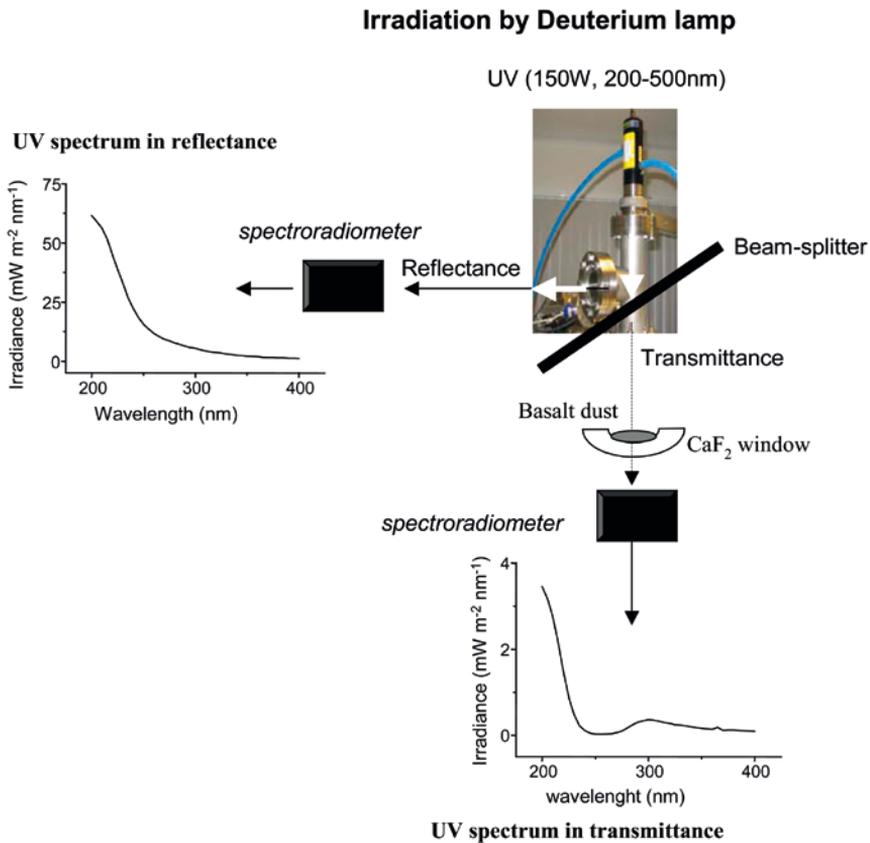


Figura 11. Esquema del conjunto de irradiación UV del polvo basáltico en la cámara de simulación de ambientes planetarios (Muñoz Caro et al. 2006)

Otra investigación novedosa, utilizando también la misma cámara planetaria, fue la de hacer interaccionar aminoácidos con material basáltico (simulando el regolito volcánico marciano) (Lalla et al. 2014), con objeto de analizar, mediante distintas técnicas espectroscópicas y químico-mineralógicas, cómo tiene lugar su adsorción-interacción. Esto nos permitió comprender mejor el tiempo y las condiciones de preservación de compuestos orgánicos en el planeta y sus implicaciones para futuras misiones, como la ExoMars (ESA, 2023) en las que se perforará hasta 2 m por debajo de la superficie y, entre otros objetivos científicos, se intentará detectar posibles biomarcadores.

En todas estas actividades científicas y sus subsecuentes interpretaciones, la geología planetaria juega un papel fundamental. Solamente mediante un buen conocimiento geológico, mineralógico y geoquímico de los significados de todas las asociaciones de minerales y sus texturas, en los marcos geodinámicos de nuestro planeta, se pueden establecer extrapolaciones termodinámicas, referidas al contexto genético en el que se formaron en otros cuerpos planetarios, ya sean asteroides, la Luna o Marte. Las investigaciones de los meteoritos, específicamente los meteoritos marcianos y las desarrolladas en las cámaras de simulación ejemplifican muy bien estas correlaciones planetarias.

5. DE LOS MARS EXPLORATION ROVERS AL PERSEVERANCE. MISIONES E IMPORTANCIA DE LOS ANÁLOGOS TERRESTRES

Las *misiones a Marte* constituyen la forma más directa de abordar numerosos estudios sobre el planeta, tanto mediante los orbitadores, como los aterrizadores (landers) y los exploradores (rovers) (Fig. 12). Considero importante subrayar que, en estos últimos, más del 60% de los miembros de los equipos científicos son (somos) geólogos. Se ha puesto claramente de manifiesto que un buen conocimiento geológico es fundamental para determinar y seleccionar las zonas de aterrizaje, en una planificación previa, planteando objetivos científicos a la medida de cada misión. Y también para establecer las rutas de exploración e investigación de los rovers durante su desarrollo, que, dada la extraordinaria capacidad y resistencia de estos vehículos, puede durar años.

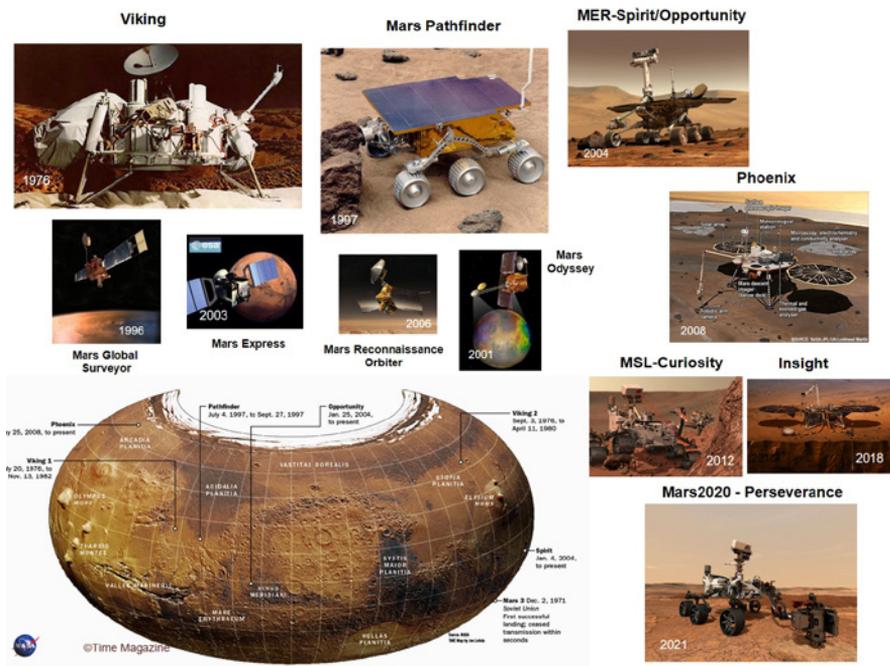


Figura 12. Selección de algunas de las principales misiones a Marte de la NASA (orbitadores, aterrizadores (landers) y exploradores (rovers). En la figura inferior izquierda se muestran algunas zonas de aterrizaje en el planeta.

Las misiones de la NASA (Mars Science Laboratory –rover Curiosity y Mars2020– rover Perseverance) que están funcionando actualmente en Marte son realmente asombrosas, con vehículos que pesan una tonelada, cerca de 3 m de alto y con decenas de kilos de instrumentos científicos miniaturizados, de última generación. Pero, aunque la NASA sigue a la cabeza de la exploración del cosmos, Marte ya no es solo algo que se restrinja a la agencia espacial de un país; es un objetivo global. Prácticamente, todos los países, y también los agentes privados, están interesados en llegar a él por diferentes razones.

2021 ha sido definido como “El Año de Marte” (Martínez Frías, 2021a). Tres misiones de países tan dispares tecnológica y socioculturalmente como China, Estados Unidos y Emiratos Árabes Unidos lograron alcanzar Marte con sus sondas espaciales; las dos primeras con rovers y la tercera con un orbitador. China consiguió poner un rover en Marte (rover Zhurong) (Fig.13), acompañando a los dos rovers activos de la NASA, el Curiosity y el Perseverance.

El interés por la exploración de Marte es, en mi opinión, un magnífico indicador tecnocultural que ejemplifica cómo la humanidad se está abriendo al espacio.



Figura 13. Técnicos de la Agencia Espacial China ultimando los análisis y revisión final del rover Zhurong antes de su partida hacia Marte. Foto: Agencia Espacial China/ People's Daily.

El término Zhurong corresponde al de una figura mitológica china que suele asociarse con el fuego y la luz, ya que a Marte se le llama “el planeta del fuego”. El nombre fue elegido con el significado de “*encender el fuego de la exploración interestelar en China y simbolizar la determinación del pueblo chino de explorar las estrellas y descubrir incógnitas en el universo*” (Xia et al. 2021). La zona de aterrizaje del rover chino fue Utopia Planitia, la mayor cuenca de impacto del hemisferio norte de Marte (Li et al. 2021) y estuvo activo durante 347 soles (días marcianos; sol: 24 horas 39 minutos, 35,24 segundos). Sin embargo, desde el 22 de Mayo de 2022 permanece aparentemente inactivo, en hibernación (Pappas, 2023). Aunque las noticias sobre esta misión son confusas y no muy transparentes, se ha publicado recientemente un interesante artículo (Zhang et al. 2023), proporcionando nuevos datos obtenidos mediante el radar de penetración del rover. Concretamente, el hallazgo de estructuras poligonales bajo el suelo marciano, con tamaños de centimétricos a métricos, que se han interpretado como resultado de procesos antiguos de hielo-deshielo. Es interesante señalar que, en 2016, publicamos un estudio sobre el origen e importancia de polígonos similares existentes en la zona del cráter Gale de Marte (Oehler et al. 2016), en el marco de la misión del rover Curiosity, proponiendo una interpretación genética equivalente.

Con respecto al Curiosity y al Perseverance (Fig.14), nada más lejos de mi intención que pretender exponer aquí las características, prolegómenos y todo lo conseguido en estas dos extraordinarias misiones de la NASA. Pero sí comentar la implicación de nuestro grupo de investigación en relación con Marte y específicamente con ellas, destacando algunos resultados que considero relevantes, no solo desde una perspectiva científica, sino también personal.

Tanto la misión del rover Curiosity como la del rover Perseverance tenían objetivos afines, aunque con algunas diferencias sustanciales ligadas a la nueva instrumentación, que ha proporcionado desarrollos tecnológicos espectaculares. Ambos aterrizaron en dos cráteres de impacto. Curiosity aterrizó el 5 de agosto de 2012 en el cráter Gale y Perseverance lo hizo el 18 de febrero de 2021 en el cráter Jezero. El hecho de que los cráteres de impacto sean zonas relevantes de exploración planetaria tiene sus razones geológicas (Martínez Frías y Ormó, 2005). Gracias al proceso impactogénico se puede profundizar en su geología más antigua, materiales y procesos, más allá de limitarse al estudio de su superficie. Además, los impactos generan la removilización y reconcentración de fluidos

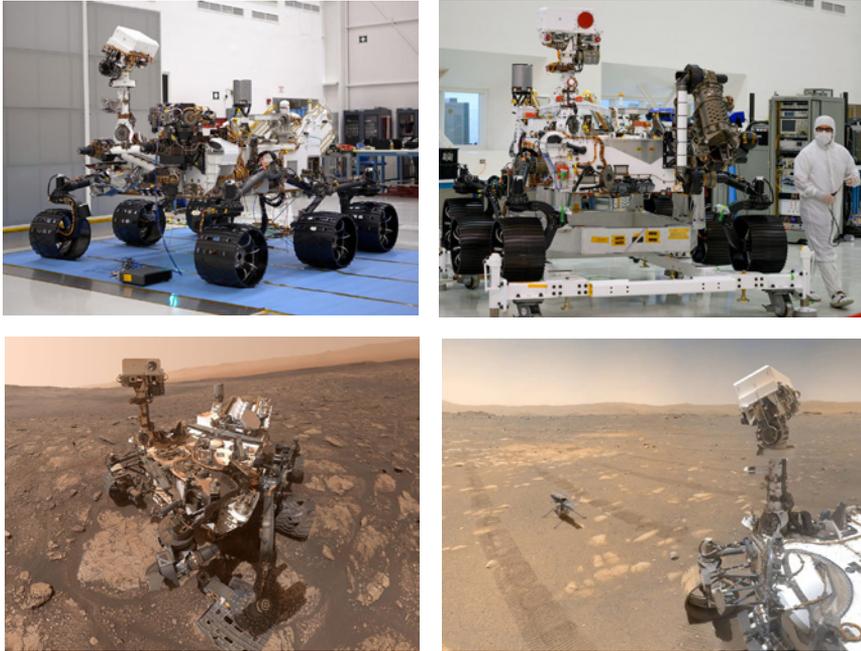


Figura 14. Comparación de los dos rovers de la NASA actualmente activos en Marte. Sus estructuras son similares, pero el salto cualitativo de Perseverance en cuanto a instrumentación (incluyendo un dron helicóptero) y capacidades analíticas es extraordinario. Izquierda: rover Curiosity. Derecha: Rover Perseverance. Fotos: NASA

y aportan energía al sistema (algo importante desde el punto de vista geodinámico y astrobiológico). Debido a sus dimensiones y su peso, la forma en que se estructuró el aterrizaje del rover Curiosity supuso un antes y un después para posteriores misiones. Perseverance siguió la misma pauta de descenso (Peiman, 2021) al planeta que Curiosity, su rover antecesor, lo que se conoce coloquialmente como “los siete minutos de terror”. Esto se refiere a que, tras un viaje de 470 millones de kilómetros de la Tierra a Marte, durante el aterrizaje, su velocidad debe pasar, en el descenso, de 19.500 km/h a tan solo 3 km/h, justo antes de tocar suelo marciano (Hand, 2012). Si la misión del Curiosity tenía como objetivo fundamental saber si Marte fue habitable en el pasado (que lo fue), Perseverance incide ya en aspectos científicos y de instrumentación relativos a la futura habitabilidad humana, suponiendo, en cierto modo, un punto de inflexión hacia las futuras misiones tripuladas. En este sentido, uno de los instrumentos, MOXIE (Mars Oxygen In-Situ Resource Utilization Experiment) (Hecht et al. 2021; Hoffman et al. 2023), tiene como finali-

dad producir oxígeno a partir del CO₂ de la atmósfera marciana (algo que está consiguiendo). Lo que está considerado como la primera extracción experimental de un recurso natural de otro planeta para uso humano, en el contexto de la denominada *ISRU: In situ resource utilization* (NASA, 2023). Además, al rover le acompaña un extraordinario dron helicóptero, el Ingenuity (Fig. 15), que estaba previsto que realizar_a 5 vuelos y ha completado 72.

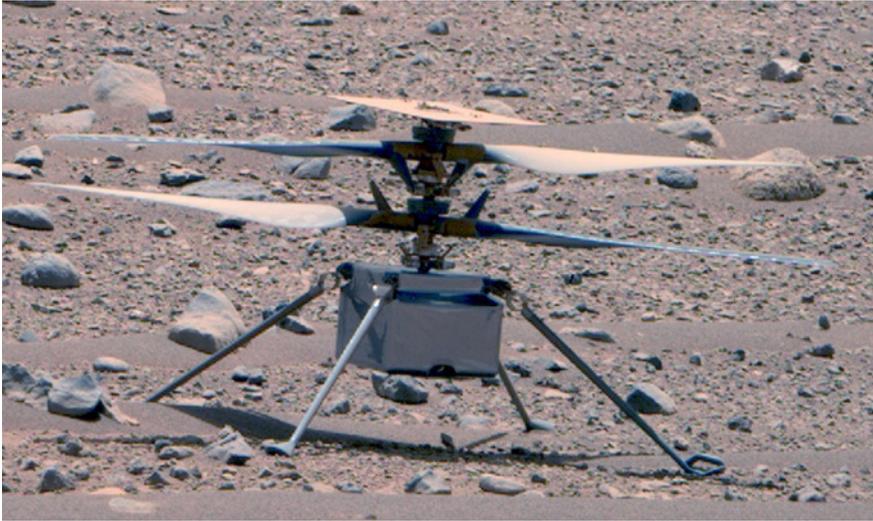


Figura 15.: Fotografía de Ingenuity sobre la superficie de Marte tomada el 16 de abril de 2023. Ingenuity es una especie de ayudante técnico del rover geólogo Perseverance. A fecha de 6 de enero, ya ha completado más de 127 minutos de vuelo, cubriendo una distancia de 17 km y alcanzando una altitud de 24 m.

Es realmente extraordinario, pues es la primera vez que se consigue que un dron helicóptero consiga volar en la tenue atmósfera de Marte y ha servido de prueba para otros similares en futuras misiones.

Otro aspecto muy interesante y único de Perseverance, relacionado con la habitabilidad y el estudio mineralógico, geoquímico y astrobiológico, es la recogida y selección de muestras que se está llevando a cabo (Fig.16). En el futuro, estas muestras, integradas en cápsulas cilíndricas especialmente diseñadas, se traerán a la Tierra mediante otra misión: Mars Sample Return (Meyer et al. 2022). Considero un privilegio estar participando en los estudios sobre selección y recogida de muestras, principalmente del regolito marciano (Wiens et al. 2018; Hausrath et al. 2023).

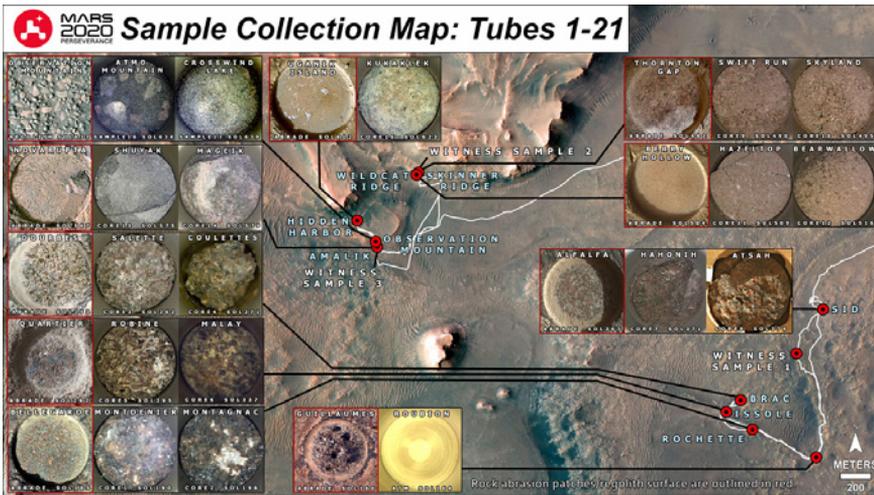


Figura 16. Representación de los 21 tubos de muestras (recogidos a fecha 21 de diciembre de 2022), conteniendo roca, regolito y atmósfera), que se planea lleguen sellados a la Tierra en la futura misión Mars Sample Return. Los puntos rojos indican las zonas de muestreo.

Aún queda mucho por hacer en cuanto a las futuras misiones tripuladas a Marte. La propia misión Artemisa, centrada en un principio en el regreso a la Luna, pretende alcanzar Marte como objetivo estratégico (The White House, 2020; Richardson, 2020; Cranford y Turner, 2023; Martínez Frías, 2023). La Luna será una plataforma extraordinaria para la realización de pruebas útiles para las futuras misiones marcianas.

Aunque mis estudios específicos en relación con Marte se remontan a finales de los 90 del siglo pasado, mi participación concreta en misiones, en colaboración con la NASA (y posteriormente la ESA a través de ExoMars), comenzó hace ahora 21 años, en 2003. Todo se inició a través de la Sociedad Planetaria, de la que fui coordinador en España (Martínez Frías, 2004) y una interesante iniciativa de la NASA para fomentar las vocaciones de los más jóvenes, teniendo como premio la visita a sus instalaciones para participar como “astronautas estudiantes” en la misión Mars Exploration Rover (MER), formándose como futuros científicos. Recibimos 16 solicitudes que cumplían los requisitos y de todos ellos seleccionamos a cuatro niños españoles para formar un grupo total de 64, de 24 países diferentes, escogidos para seguir adelante con el proyecto. Solamente uno de ellos, Tomás Kogan, de 14 años, consiguió superar todas las pruebas y fue finalmente el seleccionado. Conseguimos que un niño español pudiera viajar al Jet Propulsion Laboratory para formar parte de esta extraordinaria

misión (TPS, 2003b). Sí, mi primera incursión marciana con la NASA no fue a través de un proyecto científico, sino educativo y no puedo estar más orgulloso de ello. Hoy, Tomás Kogan es un distinguido Ingeniero Aeronáutico, graduado en la Universidad de Cambridge (UK), pasando después al prestigioso MIT y realizando además interesantes actividades de divulgación científica (Cernuda, 2004; Inmune, 2021).

2004 fue el año decisivo de mi incorporación a una misión realmente asombrosa: la NASA-Mars Science Laboratory, con el instrumento REMS del Centro de Astrobiología, que forma parte (pues aún sigue funcionando) del rover Curiosity. Una implicación que continuó después con mi participación en la misión NASA-Mars2020 (rover Perseverance), en la que formo parte del equipo de ciencia del instrumento SuperCam del rover Perseverance, liderado desde Los Alamos National Laboratory. De todo ello, destacaría dos particularidades, una institucional y otra científica.

Desde el punto de vista institucional, la cooperación internacional. En el caso de España, en el rover Perseverance dos instrumentos tienen impronta española (Fig.17), MEDA (Mars Environmental Dynamics Analyzer), liderado por el Centro de Astrobiología y SuperCam, en el que participamos desde el Instituto de Geociencias (CSIC-UCM), junto con otros colegas de las Universidades de Málaga, País Vasco y Valladolid (CSIC, 2021).

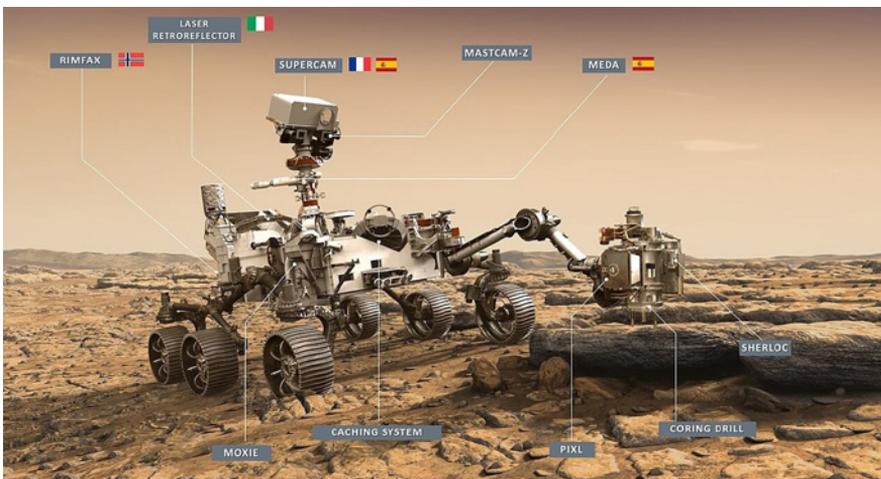


Figura 17. Una de las principales características de la misión NASA-Mars2020 (rover Perseverance) es la importante colaboración de instrumentación y ciencia, en las actividades del rover. En la imagen se detallan las colaboraciones en las que estamos implicados desde España en MEDA y SuperCam.

Desde el punto de vista científico, es incuestionable que, poco a poco, vamos desentrañando el complejo puzzle de la geología y evolución de Marte (también de la evolución de su atmósfera). Aunque existen numerosos problemas actuales de gran interés, ambas misiones se focalizan principalmente en la investigación del Marte antiguo, lo que se conoce como el “Marte húmedo” (Fairén, 2010). Las razones son obvias y ya se han esbozado previamente. Eran los momentos en los que el planeta mostró mucha más actividad geodinámica, tanto interna como externa, originando la geodiversidad paleoambiental que hoy desvelamos e investigamos y cuando se dieron las mejores condiciones de habitabilidad.

Obviamente, este discurso no es el lugar para detallar todo lo realizado y los resultados obtenidos. Los estudios de vanguardia que venimos llevando a cabo y las colaboraciones internacionales implicadas, constituyen un crisol, donde ha ido fraguándose mi propia personalidad como científico planetario durante los dos decenios que llevo ligado a ambas misiones de la NASA. Los resultados que vamos obteniendo han dado lugar a numerosas publicaciones en las mejores revistas científicas y a comunicaciones a congresos en los foros más prestigiosos, algunos de ellos siendo portada, como Science, Nature, o Geology (Fig.18).



Figura 18. Muestra representativa de algunos estudios realizados en Marte, en los que ha participado nuestro equipo, que han sido portada en revistas de alto impacto.

Si personalmente tuviera que destacar lo más relevante del hecho de formar parte de los equipos de ciencia del rover Curiosity y el Perseverance, lo resumiría en varios puntos:

- la curiosidad y la emoción de estar explorando e investigando otro planeta, contribuyendo a la toma de decisiones y a las actividades científicas que se están desarrollando;
- la fascinación de ir desvelando, a través de los análisis mineralógicos y geoquímicos y espectroscópicos en general, cómo ha sido la evolución de los paleoambientes marcianos a lo largo de las rutas definidas durante el recorrido de los rovers;
- el saber que estamos seleccionando, por primera vez, material (rocas y regolito) que llegará a la Tierra y que será estudiado en detalle por las futuras generaciones de científicos y
- el entusiasmo de que, tal vez, podamos ser capaces de detectar algún biomarcador de vida pasada en el planeta.

Del conjunto de la actividad realizada, me gustaría incidir concretamente en algunos de los temas abordados, que me parecen de especial importancia y en los que he participado directamente, concretamente cuatro: los dos primeros relacionados con el rover Curiosity y los otros dos con el rover Perseverance:

- el descubrimiento de un ciclo diurno-nocturno actual del agua en Marte, en el que, los percloratos del regolito juegan un papel fundamental. Este estudio se publicó en 2015 y fue portada en la revista *Nature Geoscience* (Martín Torres et al. 2015). De acuerdo con nuestro modelo, los percloratos existentes en el regolito marciano actúan como si fueran esponjas y pueden formar compuestos hidratados estables, atrapando el vapor de agua atmosférico en los 5 cm subsuperficiales generando una especie de “barrillo”. Este intercambio ocurre en los ciclos día/noche, aunque los datos sugieren que la temperatura y la actividad del agua son probablemente demasiado bajas para mantener la presencia de microorganismos.
- el hallazgo de estructuras de sedimentos fluidificados en Marte, que responden a la circulación de fluidos acuosos en el pasado marciano. Esta investigación se publicó en 2017 y fue portada en la revista *Geology* (Rubin et al. 2017). En él descubrimos la existencia de chimeneas en los sedimentos del cráter Gale, formadas por el movimiento vertical de fluidos, en forma de estructuras concéntricas, proporcionando evidencias inequívocas de la importancia de los procesos acuosos subsuperficiales en el pasado marciano. Destaca su similitud con las chimeneas que descubrimos y estudiamos en la zona de Las Herrerías (Martínez

Frías et al, 1989; 1992; 2007) (Fig.19) relacionadas con el sistema hidrotermal del Jaroso (Almería), que se describirá en detalle más adelante (ver epígrafe 5.1.2).

- el análisis geológico, geomorfológico y estratigráfico de los sedimentos del antiguo delta, que se encuentra en el interior del cráter Jezero, con el rover Perseverance. Este estudio se publicó en 2021 y fue portada de la revista Science (Mangold et al. 2021). Uno de los aspectos más interesantes fue poder precisar las condiciones de altos flujo y energía del canal de entrada de agua y sedimentos, arrastrando bloques de hasta



Figura 19. Comparación de las estructuras descubiertas en Marte en forma de chimeneas de sedimentos fluidificados (arriba) (Rubin et al. 2017) con las que descubrimos en la zona de Las Herrerías, Almería (Sistema Hidrotermal del Jaroso; ver capítulo 5.1.2) (abajo). Ambas son indicadores de la circulación vertical de fluidos e importantes desde el punto de vista paleoambiental y astrobiológico.

más de 2 m (Fig.20). También pudimos determinar que hubo variaciones en dichas condiciones de flujo, identificado en los afloramientos. Básicamente, se pudo establecer una transición geodinámica de una actividad hidrológica sostenida más antigua en los niveles más basales a flujos fluviales altamente energéticos, con diferentes contextos hidrológicos y climáticos, realizando una estimación de la profundidad del agua del paleolago que rellenaba el cráter.

- la caracterización detallada de la petrología y geoquímica de las rocas ígneas del fondo del interior del cráter. Esta investigación se publicó en 2022 y fue portada en la revista Science (Wiens et al. 2022). Este estudio consistió en un análisis muy detallado, principalmente mediante el instrumento SuperCam del rover Perseverance, que nos permitió carac-

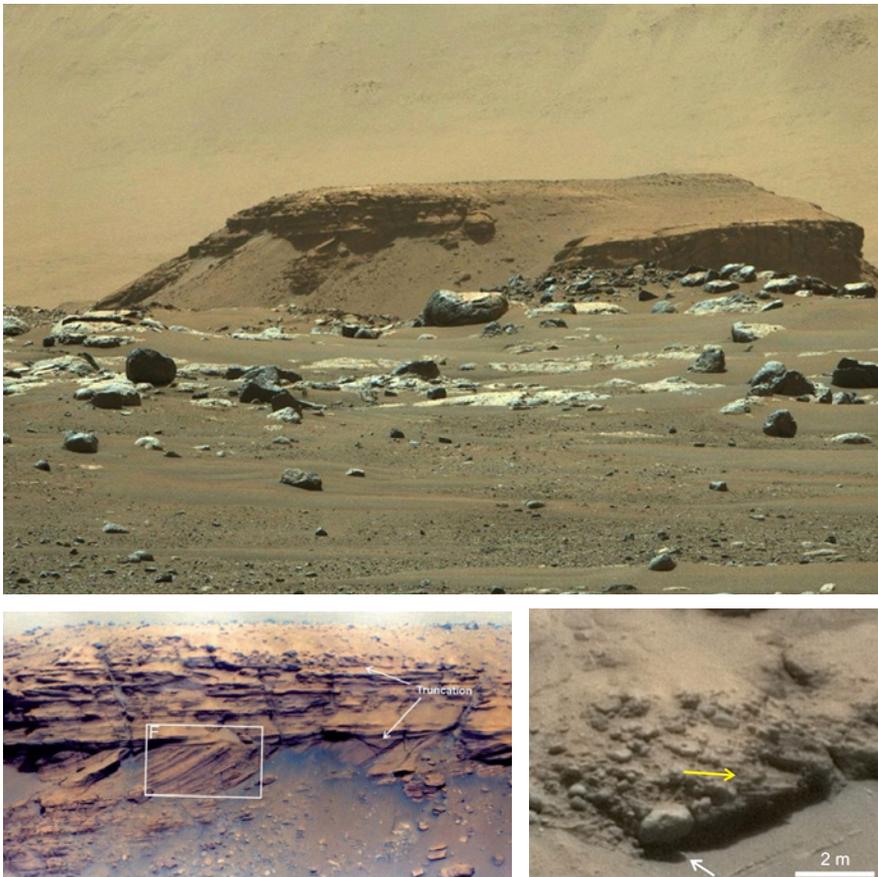


Figura 20. Impresionante imagen panorámica del afloramiento estratificado del delta del cráter Jezero (arriba) tomada desde el rover (Mangold et al. 2021). En las dos imágenes inferiores se pueden observar los detalles de la estratificación y del tamaño de algunos de los bloques arrastrados por este sistema de alta energía que estuvo funcionando en Marte hace más de 3000 millones de años.

terizar la petrología ígnea del fondo del cráter durante los primeros 286 días de recorrido. Las rocas son predominantemente basaltos, con enriquecimientos en plagioclasas en algunas zonas. Las rocas infrayacentes son acumulados de olivino. También identificamos un conjunto de minerales de alteración acuosa: carbonatos, sulfatos, percloratos, silicatos hidratados y óxidos de hierro, aunque no muy abundantes, lo que sugiere una breve duración de las condiciones lacustres.

Estos cuatro estudios son solamente ejemplos representativos e importantes de la actividad científica que venimos desarrollando y que aún continúa, siguiendo las rutas predefinidas de ambos rovers en el interior de los dos grandes cráteres de impacto. Las cuestiones astrobiológicas que se plantean, asociadas a estas misiones e investigaciones paleoambientales, siguen abiertas:

- ¿Seremos capaces de encontrar huellas de vida pasada, si es que existió?
- ¿Se habrán conservado sus biomarcadores durante miles de millones de años en las rocas y sedimentos?
- ¿Podremos detectarlos con las sofisticadas técnicas a bordo de los rovers?
- ¿Existe vida actualmente bajo la superficie de Marte, protegida de las hostiles condiciones de la superficie?

No tenemos respuestas aún a ninguna de estas preguntas, pero estamos decididos a continuar investigando y la conexión científica entre la geología planetaria y la astrobiología es crucial para ello. Las futuras misiones seguirán profundizando en todos estos temas de exploración geológica, ya que conocemos aún muy poco del planeta, pero también estarán mucho más centradas en aspectos de habitabilidad humana. Por ejemplo, la sonda Mars Express (ESA) acaba de localizar ingentes cantidades de agua en la zona de Medusae Fossae en el ecuador de Marte, en forma de sedimentos estratificados ricos en hielo, con espesores que pueden alcanzar los 3,7 km (ESA, 2024). Se está preparando a la humanidad para el desarrollo de futuras misiones tripuladas e incluso el establecimiento de bases semipermanentes, similares a las que ya están en marcha para el polo sur de la Luna. Para ello, la identificación y caracterización de los análogos terrestres es, como se ha apuntado anteriormente, fundamental. Podemos acreditar esto con ejemplos españoles, que constituyen una parte más de los métodos de investigación para resolver el intrincado puzle que conforma la evolución multiambiental de Marte.

5.1 Análogos terrestres y exploración de Marte

Existe un vínculo casi inseparable entre la participación en las misiones del Curiosity y Perseverance con las actividades sobre análogos terrestres que empecé a desarrollar en España a finales de los 80 del siglo pasado. Los estudios sobre sistemas de mineralización asociados con el volcanismo y con el agua, con los que inicié mis investigaciones, en principio enfocadas a nuestro planeta, fueron los que abrieron este campo de trabajo más allá de la Tierra, extrapolándose con posterioridad a otras zonas, procesos, ambientes y contextos a distintas escalas. Si lo pensamos y lo vemos de manera retrospectiva, es algo totalmente lógico. El volcanismo es uno de los procesos geológicos más extendidos en el sistema solar. Y volcanes y agua son dos elementos de importancia esencial en Marte, y cuya comprensión es imprescindible para cualquier investigación relacionada con la posible existencia de vida en otros cuerpos planetarios.

Afortunadamente, el estudio de los análogos se percibe hoy en día como algo casi imprescindible y consustancial, que forma parte del contexto de cualquier investigación sobre Marte, Venus e incluso sobre Europa, Encélado, Titán y otros planetas y lunas. Sí, **los análogos terrestres** son otro de los pilares en los que se sustentan los estudios planetarios y a los que aludía en el capítulo anterior, junto a los meteoritos de Marte, las cámaras de simulación de Marte y las misiones a Marte.

Mi interés específico por los análogos terrestres se iniciaba en 1987. Mi colega, el Dr. José Antonio Rodríguez Losada, de la Universidad de La Laguna, estaba realizando su tesis doctoral sobre el complejo traquítico-fonolítico de La Gomera (Rodríguez Losada, 1988) y, entre otros temas, le interesaba disponer de geotermómetros apropiados, que aportaran un valor adicional a los procesos que estaba estudiando en la isla. Ambos coincidimos haciendo análisis de microsonda electrónica en el Museo Nacional de Ciencias Naturales y, al saber que yo había trabajado con procesos de mineralización y estudios de desmezcla y soluciones sólidas en fases metálicas, me propuso colaborar estudiando las fases metálicas (minerales opacos) existentes en las muestras de su tesis, principalmente magnetitas e ilmenitas.

Al explicarme el problema, casi de manera fulminante, mi línea mental conectó la investigación de Canarias con la Luna. Sí, allí se habían descubierto, en el marco de la misión Apollo 17, los suelos anaranjados ricos en ilmenita (Apollo17, 1972; Steele, 1974) y, por ello, me pareció muy interesante profundizar en la caracterización de los minerales de Fe y Ti de las rocas volcánicas hidrotermalizadas de La Gomera. (Rodríguez Losada et

al, 1988). Estos estudios fueron los que abrieron mi trayectoria científica e intelectual a todo un campo nuevo de investigación (el de los análogos), con numerosas aplicaciones a otras muchas áreas.

Pero, permítanme ir un poco más allá exponiendo algo anecdótico que he descubierto y que me ha sorprendido al escribir este discurso, que correlaciona mis inicios en la investigación de análogos terrestres con esta Real Academia y mi ingreso en ella. La primera cita que consta en la introducción de nuestra publicación de 1988, sobre las fases metálicas de Tamargada (La Gomera), es la del hoy excelentísimo académico de esta distinguida institución, D. Antonio Cendrero Uceda, ya que él fue quien realizó y publicó el estudio geológico y petrológico del complejo basal de La Gomera (Cendrero, 1971). Curiosamente, el Prof. Cendrero también formó parte del tribunal de la tesis doctoral de mi colega, el Dr. Rodríguez Losada. Y fue él quien me contactó inicialmente para proponerme como Académico de Número.

Tras los comienzos en La Gomera, durante estos 36 años he tenido la fortuna de poder investigar -y de hecho proponer- la mayor parte de las zonas que se vienen utilizando en España y también en otros países desde esta perspectiva planetaria, como análogos terrestres para la exploración de Marte. Describiré sucintamente algunas de estas zonas, las que son a mi juicio más relevantes y representativas y de mayor contraste geológico-ambiental, así como los estudios llevados a cabo en ellas.

- **Estudios de rocas, minerales y procesos volcánicos e hidrotermales en la Antártida**, teniendo en cuenta también las investigaciones geomicrobiológicas sobre las colonias de microorganismos asociadas a estos ambientes extremos. Fue una colaboración entre el CSIC, el Instituto Español de Oceanografía y el Instituto Geológico y Minero de España (hoy también CSIC), conectando los estudios de geología planetaria y astrobiología en la zona de Isla Decepción (Martínez Frías, 2009b) en el marco del proyecto HYDRODEC (Hidrotermalismo en Isla Decepción) (Somoza et al. 2004) (Fig. 21).

Estas investigaciones fueron realmente vanguardistas desde el punto de vista geológico y astrobiológico. Tal es así, que en el Workshop de Exo/Astrobiología celebrado en noviembre de 2003 en el CAB, asociado a la NASA, nuestros estudios en la Antártida fueron una de las ponencias orales seleccionadas en esta reunión científica de alto nivel (Martínez Frías et al, 2003).

Considero relevante subrayar que un distinguido miembro de esta Real Academia fue uno de los conferenciantes españoles que participó en el simposio inaugural del CAB, el Prof. Esteban Domingo Solans, evento al que asistieron como conferenciantes invitados tres premios Nobel: Christian De Duve, Baruch Blumberg y Murrey Gell Mann.

Aunque los estudios antárticos desde esta perspectiva planetaria y astrobiológica los iniciamos a primeros de los 90 (Rey et al, 1994, 1995), continuaron a lo largo de toda la década contribuyendo al desarrollo de la campaña que se desarrolló entre 2000 y 2001 a bordo del Buque Oceanográfico Las Palmas (Somoza et al. 2004). El trabajo más reciente sobre este tema corresponde a 2018, en el que el material depositado durante varios años en una de las celdas de precipitación que dejamos instaladas en Isla Decepción fue estudiado, desde el punto de vista geomicrobiológico (Sánchez, 2018), para determinar la ecología microbiana existente.

- **Caracterización de cráteres de impacto meteorítico en diferentes áreas.** Desde observaciones de campo y análisis de laboratorio en estructuras impactogénicas en Suecia y Finlandia, en el cráter Lockne (Spray, 2023; Ormo et al, 2006) y Karikkoselka (Pesonen et al. 1997; Farjas et al. 2012) a la realización de una campaña científica al desierto del Sahara (Mauritania), para el estudio de meteoritos y estructuras impactogénicas o para las que, como una de las hipótesis genéticas, se había propuesto este origen: cráter de impacto de Aouelloul y estructura de Richat (Martínez Frías et al. 2008, 2011). Estas investigaciones fueron una colaboración con el Museo de la Naturaleza y Arqueo-

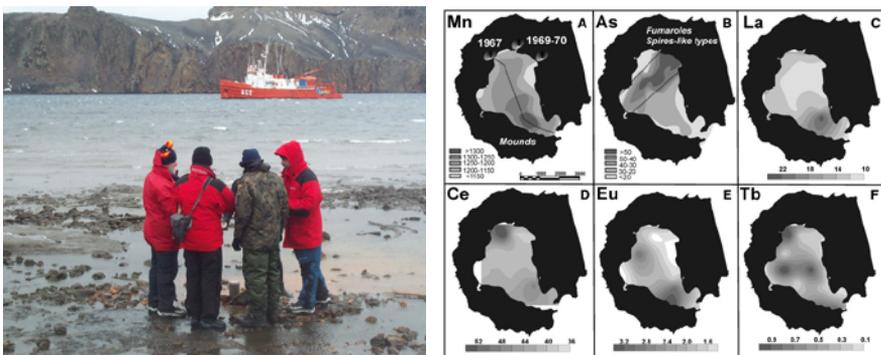


Figura 21. Izquierda: Fotografía de la colocación de una de las celdas de precipitación sobre las emisiones hidrotermales en Isla Decepción (Antártida). Al fondo, el Buque Oceanográfico “Las Palmas”. Derecha: Cartografía geoquímica de algunas anomalías (Somoza et al., 2004) detectadas en los sedimentos volcánicos del interior de la isla, siguiendo la tectónica.

logía de Tenerife, impulsadas por mi buen colega, el Dr. Francisco García-Talavera. Y son importantes como análogos en relación con Marte no solo para diferenciar aquellas estructuras geológicas circulares debidas a impacto de las que no lo son, sino también porque el estudio de su mineralogía, geoquímica y las transformaciones polimórficas generadas, sirven de guía para el estudio de otras similares en el planeta.

Otras campañas científicas para la identificación y estudio de análogos en relación con Marte, en las que hemos tomado parte fuera de España, incluyen zonas seleccionadas en Costa Rica (Bragado-Masa et al. 2014; Rejas et al. 2014), Ecuador (Daza et al. 2016; Miller et al. 2020), Islandia y México (Gázquez et al. 2012). Actualmente, estamos investigando también en Colombia (desierto de la Tatacoa), Perú (desierto de la Joya) y Paraguay (río Paraná). Las investigaciones se han centrado, fundamentalmente, en caracterizaciones paleoambientales y astrobiológicas, el análisis de procesos de alteración de rocas volcánicas y formación de minerales secundarios relacionados con el agua y el estudio de cuevas y tubos de lava.

En 2018 propusimos por primera vez una aproximación diferente al concepto de análogo, que no se basaba en un lugar o territorio concreto, es decir, en lo espacial, sino en aspectos ambientales y temporales (Galán Abellán y Martínez Frías, 2018). Para ello, utilizamos como modelo las condiciones paleoambientales del Triásico Inferior de la Península Ibérica en relación con la zona de Meridiani Planum (Marte).

Los resultados obtenidos planteaban una interesante y novedosa comparación entre ambos periodos y características geológicas y son de gran interés para comprender mejor las condiciones de habitabilidad del Marte antiguo y el establecimiento de criterios para la búsqueda de vida en paleoambientes acidófilos. La situación actual del tema de los análogos y su colofón conceptual corresponde al análisis pormenorizado que llevamos a cabo sobre la definición del término, hace apenas pocos años, en 2021 (Foucher et al. 2021). Como indicaba al principio, la geodiversidad de España es un hecho reconocido internacionalmente a nivel científico y ello explica la importante calidad y cantidad de análogos de Marte existentes en nuestro país (Muñoz Aragón, 2017). Me referiré a tres de ellos: Río Tinto, el Jaroso y Canarias (fundamentalmente, Tenerife y Lanzarote).

5.1.1 Río Tinto

Río Tinto es un ejemplo importantísimo y paradigmático a nivel mundial de un ambiente fluvial extremófilo acidófilo, con un ecosistema extraordinariamente interesante (Fig.22). Desde el punto de vista geológico, constituye un sistema petrológico, geoquímico y mineralogénico muy complejo, cuya geodiversidad y múltiples fases de los procesos actuales, han repercutido en el ecosistema fluvial en general y en cómo se organiza. Las investigaciones se centran principalmente (aunque no solo) en los microorganismos quimiolitotróficos, que obtienen su fuente de energía partir de los propios minerales allí existentes, principalmente la pirita.

Es importante hacer constar que hasta el momento no existen evidencias de vida en Marte, ni en ningún otro lugar que no sea la Tierra. Por ello, no se puede ni se debe hablar de análogos microbiológicos, de la misma manera que nos referimos a los materiales y procesos geológicos, físicos o químicos. La vida de la Tierra no tiene, hasta el momento, ninguna otra fuera de nuestro planeta con la que comparar ni establecer analogías. Sin embargo, sí se pueden establecer ciertas relaciones, de mane-

Río Tinto – proyecto M.A.R.T.E.



Figura 22. El proyecto M.A.R.T.E. tuvo una gran repercusión internacional y confirmó a Río Tinto como uno de los principales modelos astrobiológicos a nivel internacional. En la imagen, panorama de la zona y algunos sondeos realizados de manera robótica.

ra que, si los contextos son equivalentes en cuanto a geología, asociaciones minerales, físico-química del ambiente, condiciones termodinámicas, etc, es razonable inferir que los microorganismos y sus biomarcadores, en caso de existir, serían similares a los que encontramos en nuestro planeta bajo las mismas condiciones. Desde esta perspectiva, Río Tinto constituye un modelo magnífico donde geología, geomicrobiología y ecología microbiana tienen una importancia astrobiológica crucial para la exploración de los ambientes del pasado de Marte que comparten esas mismas características. El proyecto M.A.R.T.E. (Mars Astrobiology Research and Astrobiology Experiment) (Fig.22) del CAB en colaboración con la NASA, que desarrollamos en Río Tinto (Amils et al., 2004; Stoker et al. 2008; Prieto et al. 2008)), supuso un revulsivo notable para este tipo de investigaciones y especialmente para la vocación de los investigadores más jóvenes.

Uno de los estudios más interesantes y pioneros que realizamos sobre Río Tinto y que relaciona los meteoritos, la geología planetaria y la astrobiología con este análogo de Marte, comenzó casi como una idea aparentemente absurda, que, no obstante, decidimos llevar adelante. En el río, era bien conocido un consorcio común y característico de dos bacterias acidófilas ferroxidantes: *Leptospirillum ferroxidans* y *Acidithiobacillus ferroxidans* que, como he comentado anteriormente, utilizan el hierro, especialmente de la pirita, como fuente de energía (González Toril et al. 2005). Al mismo tiempo, nos encontrábamos estudiando y analizando el meteorito de Toluca, un siderito hallado en México en 1776. Casi sin quererlo, nos surgió la pregunta. ¿Sería posible que las bacterias de Río Tinto utilizaran como fuente de energía los minerales de hierro de los meteoritos? Es importante subrayar que las principales fases minerales de hierro de los meteoritos (kamacita y taenita) se encuentran presentes en ellos, pero no en contextos terrestres (salvo algún caso anecdótico; Nayak y Meyer, 2015).

El resultado del experimento fue positivo y significativo tanto desde el punto de vista geológico como astrobiológico. Fue la primera confirmación en la literatura científica de que microorganismos terrestres quimiolitotótrofos son capaces de utilizar material extraterrestre como fuente de energía, con implicaciones en posteriores investigaciones sobre Marte (ya que también se han encontrado meteoritos metálicos en este planeta) y en los estudios sobre panspermia.

5.1.2 El Jaroso

Esta zona del SE de España cubre mucho más de lo que en principio podría parecer con su simple denominación. De hecho, cuando se habla del Sistema Hidrotermal del Jaroso nos referimos a todo un complejo hidrotermal multiestadial de mineralizaciones, que se extiende a lo largo de más de 100 km, desde el sur de Murcia a la zona de Cabo de Gata, en Almería (Martínez Frías et al. 2004). Recibe su nombre por el geológicamente emblemático hidrotermalismo del Jaroso, en Sierra Almagrera, una de cuyas expresiones en superficie son las mineralizaciones del barranco con el mismo nombre y zona donde el mineralogista alemán, August Breithaupt descubrió, en 1852, la jarosita (Fig.23).

Pero ¿por qué es importante este mineral? ¿qué tiene de especial en relación con la investigación de Marte? Y, sobre todo ¿cómo se relaciona con estas investigaciones planetarias, de manera que constituye, en la actualidad, uno de los análogos internacionales más relevantes?

Nuestros estudios sobre esta zona del SE comenzaron en 1987, estando en el Museo Nacional de Ciencias Naturales de Madrid. Tras numerosas campañas científicas e investigaciones detalladas (Martínez Frías et al, 1989b; 1991; 1992; Martínez Frías, 1998b), habíamos conseguido tener una idea geológica a escala global de la conexión entre volcanismo, hidrotermalismo, tectónica y mineralizaciones, que estaban ocurriendo, casi de manera simultánea, con los procesos evaporíticos que se desarrollaban en conexión con la desecación del Mediterráneo, especialmente en el Mioceno. Básicamente, podíamos comprender la acción combinada de distintos procesos geológicos y climáticos, desde el punto de vista paleoambiental, volcánico y mineralogénico: aspectos también cruciales para la investigación de estas interacciones en Marte (Fig.23).

Además, parecía plausible que, bajo contextos geológicos y mineralógicos similares, en Marte aparecieran también las mismas fases minerales que en El Jaroso. Esta región podría ser, en nuestra opinión, un modelo para conocer lo ocurrido en determinadas zonas del planeta. Y eso es lo que pronosticamos y propusimos, adelantándonos en tres años (Martínez Frías et al, 2001 a,b; 2004) a lo que posteriormente el rover Opportunity descubrió en la zona de Meridiani Planum de Marte: la presencia de jarosita (Fig.23) y otras fases asociadas (Klingelhöfer et al. 2004). Este hallazgo fue muy relevante porque la jarosita requiere agua líquida para formarse, por lo que constituía un mineral geoindicador de habitabilidad, muy importante para las caracterizaciones paleoambientales y la búsqueda de vida.

A partir de este momento, El Jaroso ganó prestigio y fama internacional, con el desarrollo de tesis doctorales y la implicación de numerosos investigadores de los centros más prestigiosos (Frost et al. 2006, 2007), que se interesaron por su importancia mineralógica y como análogo de Marte. Como dato interesante, el propio Gostar Klingelhöfer, responsable del espectrómetro Mössbauer con el que se identificó la presencia la jarosita en Marte, nos acompañó de campaña geológica a la zona del Jaroso, donde la jarosita fue por primera vez descubierta y considerada, por ello, la localidad tipo a nivel mundial (Lunar y Martínez Frías, 2003, 2008b; Rull et al. 2008).

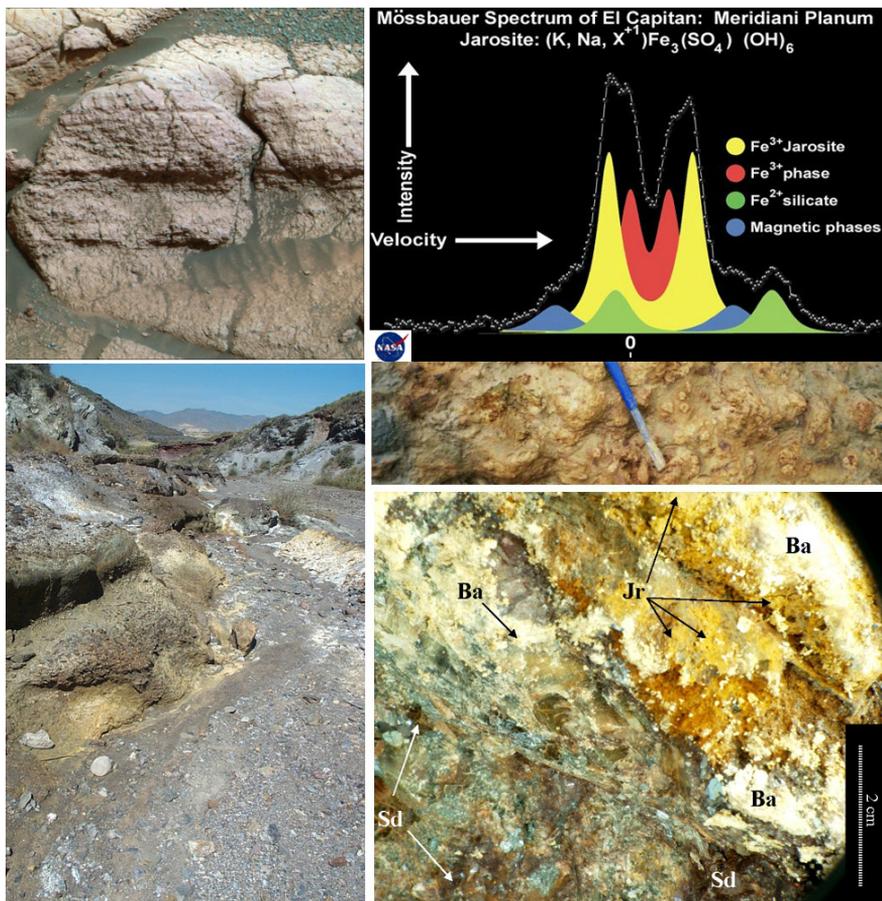


Figura 23. El sistema hidrotermal del Jaroso es un modelo análogo de Marte, concretamente de la zona de Meridiani Planum. Arriba izquierda: afloramiento de El Capitán (Marte), donde se descubrió la jarosita (Martínez Frías, 2008b). Arriba dcha: espectro de jarosita en Marte. Imágenes inferiores: izquierda: barranco del Jaroso, Sierra Almagrera, Almería (localidad tipo mundial de la jarosita); derecha: asociaciones de la jarosita (Jr) con otros sulfatos y carbonatos (siderita (Sd) y barita (Ba)).

5.1.3 Islas Canarias (Tenerife y Lanzarote)

Permítanme que concluya este viaje científico y personal a través de los análogos terrestres cerrando el círculo con las Islas Canarias. Si La Gomera fue el lugar donde abrí los ojos a estas temáticas, Tenerife y Lanzarote son dos islas ya emblemáticas desde la geología planetaria y la astrobiología, que forman parte de las misiones a Marte, de las investigaciones llevadas a cabo y del conocimiento que tenemos sobre este planeta (Martínez Frías, 2021b, 2022).

Nuestros primeros estudios en Tenerife en relación con Marte, se remontan a 1993, abordando las características texturales y químico-mineralógicas de las fases metálicas de la zona de Taganana (Rodríguez Losada et al. 1993; Rodríguez Losada y Martínez Frías, 1998). Posteriormente, esta investigación se abrió al contexto general de los sistemas hidrotermales submarinos de mineralización ligados a la actividad volcánica, que estuvieron activos durante los primeros estadios de formación de la isla. Esto nos llevó, de manera natural, a: 1) la caracterización detallada de estos ambientes extremos y 2) abordar la posible existencia de microorganismos participantes en los procesos de génesis y alteración mineral (Rodríguez Losada et al. 2000; Bustillo y Martínez Frías, 2003). La conexión geológica y astrobiológica con Marte era evidente. Detectamos procesos de biomineralización hidrotermal asociados sobre todo con el ópalo y los carbonatos presentes en el sistema. Una investigación posterior relacionada con las inclusiones fluidas presentes en estos minerales (Ayllón-Quevedo et al. 2005) nos llevó a obtener datos específicos sobre las mismas, concluyendo que se trataba de soluciones acuosas de baja temperatura y baja salinidad, con temperaturas inferiores a los 50°C.

Sin pretender entrar en muchos más detalles, la intensa labor científica realizada en Tenerife en relación con Marte se concreta en la caracterización geológica y astrobiológica de varias zonas de la isla, desde esta perspectiva como análogos, principalmente, aunque no solo, en la zona de Los Azulejos del Teide. Esto integra tesis doctorales, trabajos de máster internacionales y una importante batería de estudios científicos sobre espectroscopía mineral que aún continúa (Lalla et al, 2015 a,b; 2016; 2020; Gamsjäger, 2015; Aznar et al. 2023). Finalmente, en relación con Tenerife, considero relevante subrayar que muestras de la isla se están utilizando como estándares para comparar con las rocas que ha analizado el rover Curiosity en el cráter Gale de Marte, lo que confirma su importancia a efectos de petrología y geoquímica comparada.

Concluyo este discurso con Lanzarote (Fig.24). Lanzarote podría definirse como una perla científica como análogo planetario, y una de las zonas más importantes del mundo para llevar a cabo investigaciones y otras actividades desde esta perspectiva (Martínez Frías, 2020). Todo lo realizado en la isla no podría entenderse si no es en el contexto del Geoparque Mundial UNESCO de Lanzarote y Archipiélago Chinijo. Por primera vez, conseguimos integrar en un geoparque su importancia planetaria, en especial en relación con Marte, promoviendo un modelo científico y también educativo a escala internacional (Martínez Frías, et al. 2017; Martínez Frías y Mateo Mederos, 2018; Mateo Mederos et al. 2019; Martínez Martín, 2023), que ya se está empezando a extrapolar a otros geoparques.



Figura 24: Imagen panorámica del Parque Nacional de Timanfaya (Lanzarote). Lanzarote es uno de los análogos internacionalmente más importantes donde venimos desarrollando actividades científicas y educativas a distintos niveles, incluyendo la instrucción de astronautas.

De los numerosos estudios realizados, destacaría: 1) la caracterización mineralógica de determinadas zonas, como el volcán Tinguatón, con minerales de alteración importantes en relación con Marte (Sauro et al. 2021); 2) el estudio de los tubos de lava, como el del volcán Corona, por su importancia astrobiológica desde el punto de vista de la habitabilidad y el descubrimiento de tubos de lava en Marte (Sauro et al. 2019; Tomasi et al. 2022); 3) el establecimiento pionero de rutas planetarias en la isla (Martínez Frías y Mateo Mederos, 2016), en relación con el conocimiento que vamos disponiendo sobre Marte, que están siendo utilizadas para la instrucción de astronautas de la ESA, NASA, JAXA y Roscosmos (Sauro et al. 2023); 4) la preparación de simulantes basálticos con objeto de su utilización como recurso de habitabilidad (ISRU), tanto para la Luna como para Marte (Alberquilla et al. 2021) y 5) estudios biogeológicos relacionados con la resistencia de determinados organismos (líquenes) (De la Torre, 2019) bajo condiciones de Marte.

No querría finalizar sin destacar algo que -aunque parezca anecdótico— tiene para mí un valor añadido a toda la labor realizada en el archipiélago, en especial en Lanzarote. Los miembros del equipo de la misión NASA-Mars2020 (rover Perseverance) solemos nombrar las cuadrículas de trabajo de la zona de aterrizaje del rover. En este contexto, propuse el nombre de Timanfaya (Parque Nacional de Lanzarote) ¡Cuál fue mi sorpresa al comprobar que Timanfaya había sido situado justo en el centro de la elipse de aterrizaje! (Stack et al. 2020). Los ajustes finales hicieron que la sonda se desviara ligeramente del punto central, aunque curiosamente aterrizó entre dos zonas españolas en las que habíamos investigado: Teide y Timanfaya. Esta anécdota de las dos cuadrículas canarias en Marte y el rover de la NASA constituye un buen colofón para este viaje científico y personal.

6. CONSIDERACIONES FINALES

En este discurso, he intentado reflejar aspectos científicos, expresando también consideraciones que entran dentro de lo personal y lo emocional. Es realmente difícil plasmar el honor y el sentimiento de gratitud y de satisfacción que representa para mí el hecho de poder formar parte de esta Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Vaya de nuevo mi agradecimiento a todos los que lo han hecho posible.

Asimismo, considero extraordinariamente importante que la geología planetaria esté presente en esta prestigiosa institución, continuando, desde este ámbito científico, la labor de otros distinguidos académicos, que me han precedido en sus respectivas áreas. La naturaleza interdisciplinar de la geología planetaria, en el marco de la exploración espacial y en concreto en la investigación de Marte, impulsa novedosas y vanguardistas colaboraciones con diferentes líneas de investigación.

Desde los estudios de los análogos en la Tierra, se pueden establecer pautas, protocolos y modelos útiles para la futura exploración robótica y humana en Marte y otros planetas y lunas. Y también contribuir a la búsqueda de vida y a la futura habitabilidad de las misiones tripuladas en entornos hostiles, que requieren conocer cuáles son los materiales y los recursos con los que podremos contar cuando estemos a millones de kilómetros de nuestra casa, la Tierra.

El espacio es un crisol interdisciplinar y también sociocultural. Estamos siendo conscientes de que la exploración y nuestra migración hacia el cosmos requieren una visión y acción global y coordinadas, en la que es fundamental -yo diría que imprescindible-, la cooperación internacional. Una cooperación que puede generar sinergias, incluso más allá de lo esperado, propiciando una nueva visión de nuestro planeta como un todo. En este sentido, me gustaría destacar el denominado “efecto perspectiva” (overview effect) (Yaden et al. 2016). Este término, acuñado en 1987 por el escritor Frank White, conlleva el cambio cognitivo de la conciencia, reportado por algunos astronautas durante los vuelos espaciales, cuando observan la Tierra, estando en órbita, o desde la superficie lunar (Fig.25).

Los aspectos comunes más relevantes ligados a este efecto son la apreciación y la percepción de la maravillosa dinámica y belleza de nuestro planeta, y también su fragilidad, con una inesperada emoción y sensación de conexión de la humanidad en su conjunto, como un todo, donde no se ven fronteras ni divisiones. Este efecto está implícito en el enfoque de

cómo en muchos estudios se perciben las aportaciones de la geología planetaria, junto con otras ciencias de la tierra y del espacio, para la propia sostenibilidad de nuestro planeta, requiriendo una ineludible dosis de geoética (Martínez Frías et al. 2010) y astrobioética (Martínez Frías, 2016a; Chon, 2017). En lo que a nosotros nos concierne, protejamos y conservemos nuestro planeta; es nuestra casa. La exploración del espacio es una fuente de conocimiento y de progreso que contribuye a nuevos descubrimientos y al hallazgo de nuevos recursos, a nuestra habitabilidad, a la sostenibilidad de la Tierra y a la consecución de ese efecto común integrador.

Estoy convencido de que las iniciativas y actividades que se desarrollen y promuevan desde esta Real Academia, en el ámbito de la geología planetaria, en colaboración con otras disciplinas, no solo de nuestra sección sino de otras secciones, pueden marcar un punto de inflexión, conectando ciencia y sociedad, favoreciendo este cambio de paradigma en el que estamos inmersos y que nos llevará, en un futuro no muy lejano, de la Tierra a Marte... y más allá.



Figura 25. Vista de la Tierra desde la Luna (región Mare Smythii). La imagen se tomó antes de la separación del módulo lunar. Misión Apolo 11 (20 de Julio de 1969). Créditos: NASA - AS11- 44-6564

7. REFERENCIAS

Abramov, O. y Kring, D.A. (2005). Impact-induced hydrothermal activity on early Mars. *Journal of Geophysical Research*, 110, E12S09, doi: 10.1029/2005JE002453

Acuña, M.H., Connerney, J.E.P., Ness, N.F., et al. (1999). Global distribution of crustal magnetization discovered by the Mars Global Surveyor MAG/ER Experiment. *Science*, 284, 790–793

Alberquilla, F., Martínez-Frías, J., García-Baonza, V. (2022). LZS-1, Lanzarote (Canary Island, Spain) lunar (Apollo 14) basaltic soil simulant. *Nature/Sci Rep* 12, 16470 <https://doi.org/10.1038/s41598-022-20960-8>

Amils, R.; González-Toril, E.; Gómez, F.; Fernández-Remolar, D.; Rodríguez, N.; Malki, M.; Zuluaga, J.; Aguilera, A. y Amaral-Zettler, L.A. (2004) Importance of chemolithotrophy for early life on Earth: The Tinto River (Iberian Pyritic Belt) case. In *Origins*; Seckbach, J., Ed.; Springer: Amsterdam, The Netherlands, 2004; pp. 463– 480.

Anguita, F. (1993). *Geología planetaria*. Ed. Mare Nostrum. Madrid. 132 pp.

Apollo 17 (1972). NASA Apollo 17 Orange soil https://www.youtube.com/watch?v=ZNkmhY_ju8o

ASU (2023) <https://sese.asu.edu/research/focus-areas/planetary-science>

Ayllón Quevedo, F., Rodríguez-Losada, J.A. y Martínez Frías, J. (2005) Fluid and mineral phases related to hydrothermal alteration in the “Arco de Taganana” (Tenerife, Canary Islands). *ECROFI XVIII Siena*. <http://www3.unisi.it/eventi/ECROFIXVIII/Poster%20Program.Pdf>

Aznar, M., A. Sanz-Arranz, S. Shkolyar, E.R. Sawyers, M. Konstantinidis, G.Lopez- Reyes, M.Veneranda, E.A.Lymer, J.R.Freemantle, M.G.Daly, E.A.Cloutis, F.Rull- Perez, J.Martinez-Frias y E.A. Lalla (2023) Raman-IR spectroscopic, and XRD analysis of selected samples from Fogo Island, Cabo Verde: Implications for ancient Martian volcanology. *Advances in Space Research* DOI: 10.1016/j.asr.2023.01.013

Bibring, J. P., Langevin, Y., Mustard, J. F., Poulet, F., Arvidson, R., Gendrin, A., ... y Berthé, M. (2006) Global mineralogical and aqueous Mars history derived from OMEGA/MarsExpress data. *Science*, 312(5772), 400-404

BOE (2001) https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2001-24079

Bragado-Massa, E., Marchamalo, M. Rejas, J.G., Bonatti, J., Martínez-Frías, J. y Martínez, R. (2014) Monitoring hydrothermal alteration in active volcanoes using Remote Sensing: the case of Turrialba Volcano (Costa Rica). *Revista Geológica de América Central* 51: 69-82.

Bustillo, M. A. y Martínez-Frías J. (2003) Green opals in hydrothermalized basalts (Tenerife Island, Spain): alteration and ageing of silica pseudoglass. *Journal of Non- Crystalline Solids* 323:27-33.

Campanero, R., Lunar, R. y Martínez Frías, J. (2015) Comparación textural y químico-mineralógica de cóndrulos y matriz en condritas ordinarias y carbonáceas: Bechar 002 y Allende. *Geocaceta* 58: 31-34.

Cendrero, A. (1971) Estudio geológico y petrológico del complejo basal de la isla de La Gomera (Canarias). *Estudios Geol.* 27, 257-310

Cernuda, O. (2004). Misión de la NASA. Un niño espalo en Marte. <https://www.elmundo.es/elmundo/2003/12/18/ciencia/1071743328.html>

Chon, O. (2017) Astrobioethics. *International Journal of Astrobiology*, 17, 1, 51 - 56

Connerney, J.E.P., Espley, J., Lawton, P. et al. (2015) The MAVEN Magnetic Field Investigation. *Space Sci Rev* 195, 257–291. <https://doi.org/10.1007/s11214-015-0169-4>

Cranford, N. y Turner, J. (2023) <https://www.nasa.gov/humans-in-space/step-3-artemis-moon-missions-as-an-astronaut-testbed-for-mars/> <https://www.nasa.gov/humans-in-space/step-3-artemis-moon-missions-as-an-astronaut-testbed-for-mars>

CSIC (2021) ‘Perseverance’ lleva a Marte tecnología del CSIC <https://www.csic.es/es/actualidad-del-csic/perseverance-lleva-marte-tecnologia-del-csic>

Davila, A.F., Fairén, A.G., Schulze-Makuch y D., McKay, C.P. (2009). The ALH84001 Case for Life on Mars. In: Seckbach, J., Walsh, M. (eds) *From Fossils to Astrobiology. Cellular Origin, Life in Extreme Habitats and Astrobiology*, vol 12. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8837-7_24

Daza, R., Miller, Ana Z., Saiz-Jimenez, C., Gazquez, F., Calaforra, J.M., Forti, P., Rull, F., Medina, J., Sanz, A., Martínez-Frías, J. y Toulkeridis, T. (2016) Insights Into Speleothems From Lava Tubes Of The Galapagos Islands (Ecuador): Mineralogy And Biogenicity. 17th International Symposium of Vulcanspeleology, 1-7. At: Ocean View, Big Island, Hawaii (USA) DOI: 10.13140/RG.2.1.2054.8242

De Toffoli, B., Plesa, A.-C., Hauber, E., y Breuer, D. (2021) Delta Deposits on Mars: A Global Perspective. *Geophysical Research Letters*, 48, e2021GL094271

Di Achille, G., y Hynek, B. M. (2010) Ancient ocean on Mars supported by global distribution of deltas and valleys. *Nature Geosci.*, 3(7), 459-463.

Dickson, J.L., Lamb, M.P., Williams, R.M.E., Hayden, A.T. y Fischer, W.W. (2020) The global distribution of depositional rivers on early Mars. *Geology* (2021) 49 (5): 504–509

Ehlmann, B., Mustard, J., Murchie, S. et al. (2011) Subsurface water and clay mineral formation during the early history of Mars. *Nature* 479, 53–60. <https://doi.org/10.1038/nature10582>

Ehrenfreund, P. y Charnley, S. B. (2000) Organic molecules in the interstellar medium, comets, and meteorites: a voyage from dark clouds to the early Earth. *Ann. Rev. Astron. Astrophys* 38, 427–483

ESA (2013) Mars Mineral Globe <https://www.youtube.com/watch?v=64Ka6Q-Ki1Q> ESA (2023) https://www.esa.int/Science_Exploration/Human_and_Robotic_Exploration/Exploration/ExoMars

ESA (2024) Buried water ice at Mars's equator? https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Buried_water_ice_at_Mars_s_equator

ESA-PANGAEA (2016) Taking astronauts to other planets – on Earth <https://www.youtube.com/watch?v=fWsUHjVDJbY>

Fairén, A.G. (2010) A cold and wet Mars. *Icarus* Vol. 208, Issue 1: 165-175

Farjas Abadía, M., Hierro Vicente, J.M. y Martínez-Frías, J. (2011). 3D laser scanner techniques: A novel application for the morphological study of meteorite impact rocks. In: Aamir Saeed Malik, Tae-Sun Choi and

Humaira Nisar (Eds.) *Depth Map and 3D Imaging Applications: Algorithms and Technologies*. IGI Global. 500-527.

Farmer, J.D. (1996) Hydrothermal systems on Mars: an assessment of present evidence. 1996 *Evolution of hydrothermal ecosystems on Earth (and Mars?)*. Wiley, (Ciba 202) 273-299.

Foucher, F., K. Hickman-Lewis, A. Hutzler, F. Westall, J. Zipfel, N. Bost, J.C. Bridges, L. Ferrière, V. Debaille, L. Folco, K. Joy, M. Lee, J. Martínez-Frías, J. Michalski, P. Wozniakiewicz, H. Schroeven-Deceuninck, M. Zolensky, H. Yano, G. Kminek, M. Viso, C. Smith, y S. Russell (2021) Definition and use of functional analogues in planetary exploration. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2021.105162> *Planetary & Space Sciences* 197-105162: 1-13.

Frost, R. L., Wain, D. L., Reddy, B. J., Martens, W., Martínez-Frías, J. y Rull Fernando (2006) Sulphate efflorescent minerals from the El Jaroso ravine, Sierra Almagrera, Spain scanning electron microscopic and infrared spectroscopic study, *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 14: 167-178.

Frost, R.L., Wain, D., Martens, W.N., Locke, A.C., Martínez-Frías, J. y Rull, F. (2007) Thermal decomposition and X-ray diffraction of sulphate efflorescent minerals from El Jaroso Ravine, Sierra Almagrera, Spain.. *Thermochimica Acta* 460: 9-14.

Galán-Abellán, M.B. y Martínez-Frías, J. (2018). Environmental conditions of E Iberia's Early Triassic. An Earth example for understanding the habitability of ancient Mars. *Episodes* 41-1:33-50.

Gamsjäger, M. (2015) Petrological and geochemical study of areas affected by subaerial alteration and hydrothermal processes on Tenerife, Spain - Mars analog. Master of Science Faculty of Natural Sciences Karl-Franzens-University Graz Institute of Earth Sciences Department of Mineralogy and Petrology, Graz (Austria), 96p.

Gázquez, F., Calaforra, J.M^a, Forti, P., Rull, F. y Martínez-Frías, J. (2012) Gypsum- carbonate speleothems from Cueva de las Espadas (Naica mine, Mexico): mineralogy and palaeohydrogeological implications. *International Journal of Speleology* 41-2: 211-220.

González-Toril, E., Martínez-Frías, J., Gómez Gómez, J.M., Rull, F. y Ricardo Amils (2005). Iron Meteorites Can Support the Growth of Acidophilic Chemolithoautotrophic Microorganisms. *Astrobiology*. Jun 2005, 406-414.

Halevy, I., y Head III, J. W. (2014) Episodic warming of early Mars by punctuated volcanism. *Nature Geosci.*, 7(12), 865-868.

Hand, E. (2012) 7 minutes of terror. *Nature* 488, 16–17 <https://doi.org/10.1038/488016>.

Hausrath, E. M., R. Sullivan, Y. Goreva , M.P. Zorzano , E. Cardarelli, A. Vaughan, A. Cousin , S. Siljeström , A. Shumway, S. VanBommel , G. Martinez , J. Johnson, A. Bechtold, G. Paar , F. Poulet, C.D.K. Herd, K. Benison , M. Sephton , J.M. Madariaga, J. Lasue R.C. Wiens, J. Martinez-Frias, J.F. Bell III, A.D. Czaja, C.T. Adcock y N. Randazzo (2023) 54th Lunar and Planetary Science Conference 2023 (LPI Contrib. No. 2806) <https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2023/pdf/2379.pdf>

Hecht, M.; Hoffman, J.; Rapp, D.; McClean, J.; SooHoo, J.; Schaefer, R.; Aboobaker, A.; Mellstrom, J.; Hartvigsen, J.; Meyen, F. y Hinterman, E. (2021) Mars Oxygen ISRU Experiment (MOXIE). *Space Science Reviews*. 217 (1): 9.

Ho, M. (2023a) NASA Science. Mars Exploration. Mars Curiosity Rover. <https://mars.nasa.gov/msl/home/>

Ho, M. (2023b) NASA Science. Mars2020 mission. Perseverance rover. <https://mars.nasa.gov/mars2020/>

Hoffman, J.A., Hinterman, E.R., Hecht, M.H., Rapp, D. y Hartvigsen, J.J. (2023) 18 Months of MOXIE (Mars oxygen ISRU experiment) operations on the surface of Mars - Preparing for human Mars exploration. *Acta Astronautica* Vol. 210, 547-553

Ibn Battuta (1829). Los viajes de Ibn Battuta. Basado en la copia original de 1354. Soliman El-Azir (Redactor, Traductor), Samuel Lee (Traductor). ASIN: B0BPQ5D6HS. 187p.

ICOG (2001) https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2001-24079

ICOG (2009) La profesión de geólogo. Ilustre Colegio Oficial de Geólogos, ISBN: 978-84-9200-978

Klingelhöfer G, Morris RV, Bernhardt B, Schröder C, Rodionov DS, de Souza PA Jr, Yen A, Gellert R, Evlanov EN, Zubkov B, Foh J, Bonnes U, Kankleit E, Gütllich P, Ming DW, Renz F, Wdowiak T, Squyres SW y Arvidson RE. (2004) Jarosite and hematite at Meridiani Planum from Opportunity's Mossbauer Spectrometer. *Science*. 2004 Dec 3;306(5702):1740-5. doi: 10.1126/science.1104653. PMID: 15576610.

Inmune (2021) <https://www.youtube.com/watch?v=Wy1dVBEzOVE>

Li, Chunlai; Zhang, Rongqiao; Yu, Dengyun; Dong, Guangliang; Liu, Jianjun; Geng, Yan; Sun, Zezhou; Yan, Wei; Ren, Xin; Su, Yan; Zuo, Wei; Zhang, Tielong; Cao, Jinbin; Fang, Guangyou; Yang, Jianfeng; Shu, Rong; Lin, Yangting; Zou, Yongliao; Liu, Dawei; Liu, Bin; Kong, Deqing; Zhu, Xinying; Ouyang y Ziyuan (2021). "China's Mars Exploration Mission and Science Investigation". *Space Science Reviews*. 217 (4).

Lalla, E., Mateo-Martí, E., Medina, J., Sansano, A., Sanz, A. Martínez Frías y J., Rull, F. (2014) Analysis and adsorption-interaction of amino acids on basaltic mineral subjected to different simulated atmospheres. *ELBA-Bioflux*, vol. 6-2: 80-93

Lalla, E., López-Reyes, G., Sansano, A., Sanz-Arranz, A., Schmanke, D., Klingelhöfer, G., Medina-García, J., MartínezFrías, J. y Rull-Pérez, F. (2015a) Estudio espectroscópico y DRX de afloramientos terrestres volcánicos en la isla de Tenerife como posibles análogos de la geología marciana Spectroscopic analysis and XRD of terrestrial volcanic outcrops on the Tenerife Island as possible Martian analogue, *Estudios Geológicos* 71,2: 1-19.

Lalla, E., López-Reyes, G., Sansano, A., Sanz-Arranz, A., Martínez-Frías, J., Medina, J y Rull-Pérez, F. (2015b) Raman IR vibrational and XRD characterization of ancient and modern mineralogy from volcanic eruption in Tenerife Island: Implication for Mars. *Geoscience Frontiers*. doi: 10.1016/j.gsf.2015.07.009. 50

Lalla, E.A., Sanz-Arranz, A., Lopez-Reyes, G., Sansano, A., Medina, J., Schmanke, D., Klingelhofer, G., Rodríguez Losada, J.A., Martínez-Frías, J. y Rull, F. (2016) Raman– Mössbauer– XRD studies of selected samples

from “Los Azulejos” outcrop: A possible analogue for assessing the alteration processes on Mars. *Advances in Space Research*, 57: 2385-2395.

Lalla, E. A., M. Konstantinidis, E. Lymer., C. M. Gilmour, P. Such, K. Cote, G. Groemer, J. Martínez-Frías, y M. G. Daly (2020) Combined Spectroscopic analysis of terrestrial analogues from simulated astronaut mission using the LIBS Raman Sensor: Implications for Mars Applied Spectroscopy doi.org/10.1177/00037028211016892

Lunar, R. y Martínez-Frías, J. (2003) La Jarosita. *Historia Natural* 2: 34-36

Lunar, R. y Martínez-Frías, J. (2004) Carl Sagan: Un coloso de la Ciencia. *Tribuna Complutense* 16:16.

Mangold, N.; Gupta, S. ; Gasnault, O. ; Dromart, G. ; Tarnas, J. D. ; Sholes, S. F.; Horgan, B.; Quantin-Nataf, C. ; Brown, A. J. ; Mouélic, S. Le ; Yingst, R. A.; Bell, J. F. ; Beyssac, O. ; Bosak, T. ; Calef, F. ; Ehlmann, B. L. ; Farley, K. A.; Grotzinger, J. P.; Hickman-Lewis, K. ; Holm-Alwmark, S. LU ; Kah, L. C.; Martinez-Frias, J.; McLennan, S. M. ; Maurice, S. ; Nuñez, J. I. ; Ollila, A. M.; Pilleri, P. ; Rice, J. W. ; Rice, M. ; Simon, J. I. ; Shuster, D. L. ; Stack, K. M.; Sun, V. Z. ; Treiman, A. H. ; Weiss, B. P. ; Wiens, R. C. ; Williams, A. J.; Williams, N. R. y Williford, K. H. (2021) Perseverance rover reveals an ancient delta-lake system and flood deposits at Jezero crater, Mars. *Science*, 374, 6568: 711- 717.

Martín-Torres, F.J., Zorzano, M.P., Valentín-Serrano, P., Ari-Matti Harri, Genzer, M., Kemppinen, O., Renno, N., Mischna, M., Martínez-Frías, J., Vasavada, A., Hardgrove, C., Jun, I., Chevrier, V.F., Rivera-Valentin, E.G., McEwen, A.S., Navarro-González, R., Conrad, P., Wray, J., Bo Madsen, M., Goetz, W., McConnochie, T., Cockell, C., Berger, G., Sumner, D. y Vaniman, D. (2015) Transient liquid water and water activity at Gale crater, Mars. *Nature Geosciences* 8: 357–361.

Martínez-Frías, J., García Guinea, J. y Benito, R. (1989a) “Los Meteoritos. La Colección del Museo Nacional de Ciencias Naturales de Madrid” *Mundo Científico*, 9, 93: 742-750.

Martínez-Frías, J., García Guinea, J. López Ruiz, J. López, J.A. y Benito, R. (1989b) “Las mineralizaciones epitermales de Sierra Almagrera y de la cuenca de Herrerías (Cordilleras Béticas)” *Rev. Soc. Esp. Min.* 12: 261-271.

Martínez-Frías, J., García Guinea, J., López Ruiz, J. y Reynolds, G.A. (1992) "Discovery of fossil fumaroles in Spain" *Economic Geology*, 87, 444-447.

Martínez Frías, J., Lunar, R. y Rodríguez Losada (2001a). Hydrothermal mineralization in SE Spain as possible volcanic-related metallogenetic model for the early Mars. CAB MiniSymposium, Torrejón de Ardoz, Madrid.

Martínez Frías, J., Lunar, R., Mangas, J., Delgado, A., Barragán, G., Sanz, E y Díaz, E. (2001b) Evaporitic and hydrothermal gypsum from SE Iberia: geology, geochemistry and implications for searching for life on Mars. GSA Annual Meeting 33, 6, p.1390. <https://gsa.confex.com/gsa/2001AM/webprogram/Paper26777.html>

Martínez-Frías, J. y Somoza, L. (2002) TIERRA: Red Temática de Ciencias de la Tierra. Contenidos y recursos académicos de investigación y de difusión de la ciencia. Boletín RedIris. boletin/60/enfoque3

Martínez Frías, J., Delgado, A., Somoza, L., Maestro, A. y Rey, J. (2003) Carbon, oxygen and hydrogen isotopic signatures of cold and hot waters from Deception island (Antarctica): Lessons for Mars exploration. Simposio científico inaugural. Centro de Astrobiología.

Martínez Frías, J. (2004) http://tierra.rediris.es/merge/Carl_Sagan/

Martínez-Frías, J. y Madero, J. (2004) (Eds) Meteoritos y Geología Planetaria. Diputación Provincial de Cuenca, Ediciones Provinciales nº23, 305p.

Martínez-Frías, J., Lunar, R. y Rull, F. (2004a) Mineralogía espacial: de los meteoritos a la exploración de Marte, *Macla I*: 11-18.

Martínez-Frías, J., Lunar, R., Rodríguez-Losada, J.A. y Delgado, A. (2004b) "The volcanism-related multistage hydrothermal system of El Jaroso (SE Spain): Implications for the exploration of Mars Earth, Planets and Space 56: 5-8.

Martínez-Frías, J. y Örmö, J. (2005) Impactos meteoríticos. *Revista Sociedad Española de Física* Abril-Junio, 1-9.

Martínez-Frías, J. (2006). Interdisciplinariedad y Exploración Planetaria. *Tribuna de la Ciencia*, julio: 3.

Martinez-Frias, J., Amaral, G. y Vázquez, L. (2006). Astrobiological significance of minerals on Mars surface environment. In: Amils, R., Ellis-Evans, C., Hinghofer- Szalkay, H. (eds) *Life in Extreme Environments*. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6285-8_4

Martínez-Frías, J. y Hochberg, D. (2007) Classifying science and technology: two problems with the UNESCO system. *Interdisciplinary Science Reviews* 32-4: 315- 319.

Martinez-Frias, J., Lázaro, E. y Esteve-Núñez, A. (2007a) Geomarkers versus Biomarkers: Paleoenvironmental and Astrobiological Significance, *AMBIO: A Journal of the Human Environment* 36(5), 425-426

Martinez-Frias, J., Delgado-Huertas, A., García-Moreno, F., Reyes, E., Lunar, R. y Rull, F (2007b). Oxygen and carbon isotopic signatures of extinct low-temperature hydrothermal chimneys in the Jaroso Mars analog. *Planetary & Space Science* 55:441-448.

Martínez Frías, J. (2008a) Más de 10 años de astrobiología. Departamento de Planetología y Habitabilidad. Centro de Astrobiología (CSIC-INTA) http://tierra.rediris.es/varios/AniversarioCAB/aniversario_Dep_Planet_Habit_JMF.pdf

Martínez Frías, J. (2008b) Jarosite. Jaroso Hydrothermal System. TIERRA. <http://tierra.rediris.es/jarosite/>

Martínez Frías, J. y Lunar, R (2008) Molina de Segura: the largest meteorite fall in Spain. *Astronomy & Geophysics*, Vol. 49, Issue 4: 4.26-4.29.

Martínez Frías, J., Rodríguez Losada, Darwich, A. y Madero, J. (2008a) La Geología en la exploración planetaria. VII Congreso Geológico de España, Las Palmas de Gran Canaria. *Geo-Temas* 10: 1621-1624

Martínez Frías, J., García Talavera, F., Rull, F., López-Vera, F., Capote, R., Navarro Latorre, J.M., Sánchez-Pinto, L., López Rondón, J., Rodríguez Losada, J.A., Fernández Sampederro, M.T., Martín Redondo, M.P. y Menor-Salvan, C. (2008b) Impactos en Mauritania: nuevos datos mineralógicos, texturales y geoquímicos de las megabrechas de Richat y del cráter meteorítico de Aouelloul. *Geo-Temas* 10: 1487- 1490

Martínez Frías, J. (2009a) El geólogo planetario o astrogeólogo. En: La profesión de geólogo. Ilustre Colegio Oficial de Geólogos, ISBN: 978-84-9200-978-7, 201-218.

Martínez Frías, J. (2009b) Antarctica-Astrobiology. TIERRA (1994-2009). http://tierra.rediris.es/Antarctica_Astrobiology/

Martínez Frías, J., Horneck, G., de la Torre, R., y Rull, F (2010) A geoethical approach to the geological and astrobiological exploration and research of the Moon and Mars. 38th COSPAR Scientific Assembly. Held 18-15 July 2010, in Bremen, Germany, p.5

Martínez-Frías, J., Rull, F., Martín-Redondo, M.P., Delgado, A., Fernández Sampedro, M.T., García-Talavera, F., López-Vera, F. y Menor Salván, C. (2011) Multianalytical characterization of silica-rich megabreccias from the proposed natural area of Richat (Sahara desert, Mauritania). *Research Journal of Chemistry and Environment* 15-3: 49-54.

Martínez Frías, J. y de la Torre, R. (2014) La Red Española de Planetología y Astrobiología (REDESPA): Investigación, Educación, Divulgación y Comunicación. *100cias@uned* 7: 47-51.

Martínez-Frías, J. (2015) Search for Life on Mars: an astrogeological approach. In: Kolb, V. (Ed.) *Astrobiology: An Evolutionary Approach*. 301-323.

Martínez Frías, J. (2016a) Ethics in Space Exploration. From geoethics to astrobioethics. In: *Search for life: from early earth to exoplanets - XII Rencontres du Vietnam. Quy Nhon* <https://www.youtube.com/watch?v=S3OI0C-AuGU>

Martínez-Frías, J., Mateo Mederos, M^a E., y Lunar, R. (2016) Los geoparques como áreas de investigación, geoeducación y geoética en geociencias planetarias: el geoparque de Lanzarote y Archipiélago Chinijo. *Geotemas, Ejemplar dedicado a IX Congreso Geológico de España, Huelva*. ISSN 1576-5172, N^o. 16, 2, 343-346.

Martínez-Frías, J. (2016b) Lanzarote planetary analogue: a geological museum and a natural laboratory for Mars: CAVES & PANGAEA, European Space Agency (ESA). <http://blogs.esa.int/caves/2016/12/05/lanzarotepanetary-analogueue-a-geological-museum-and-a-natural-laboratory-for-mars/>

Martínez-Frías y Mateo Mederos, M^a E. (2016) Mars-related routes in the Lanzarote and Chinijo Island Global UNESCO Geopark. 7th International Conference on UNESCO Global Geoparks, English Riviera UNESCO Global geopark (UK), 27th – 30th Sept. 2016.

Martínez-Frías, J., Mateo-Mederos, M^a E. y Lunar, R. (2017) The scientific and educational significance of geoparks as planetary analogues: the example of Lanzarote and Chinijo Islands UNESCO Global Geopark. Episodes 40-4:343-347.

Martínez Frías, J y Mateo-Mederos, M.E (2018). Lanzarote: Marte en la Tierra. Guía Didáctica. Cabildo Insular de Lanzarote. 17 p.

Martínez Frías, J. (2020) De Lanzarote a la Luna y a Marte: claves geológicas y astrobiológicas. Discurso de ingreso como Académico Correspondiente. Academia de Ciencias, Ingenierías y Humanidades de Lanzarote. Discursos académicos 84. <http://www.academiadelanzarote.es/Discursos/Discurso-84.pdf>

Martínez Frías, J. (2021a) 2021: el Año de Marte. FEM. Molina de Segura. <https://www.youtube.com/watch?v=MWP93iSXkUU>

Martínez Frías, J. (2021b) Marte y la importancia geológica y astrobiológica de Canarias. SomosCSIC. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. <https://somoscsic.corp.csic.es/marte-y-la-importanciageologica-y-astrobiologica-de-canarias/>

Martínez Frías, J. (2022) Canarias. Cuando el magma alcanza el cosmos. Discurso de ingreso como Académico Numerario de Jesús Martínez Frías. Academia de Ciencias, Ingeniería y Humanidades de Lanzarote. 27 de Mayo de 2022. Discursos Académicos 94: <http://www.academiadelanzarote.es/Discursos/Discurso-94.pdf>

Martínez Frías, J. (2023) El regreso a la Luna: recursos, habitabilidad y el programa Artemisa. Anales de la Real Academia de Doctores de España. Volumen 8, número 4 – 2023, páginas 925-952.

Martínez Martín, J.E. (2023) Conceptos y Metodologías de Educación en Geoparques: Aplicaciones a los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Tesis Doctoral, UCJC. 155p.

Mateo-Martí E. (2014) Planetary Atmosphere and Surfaces Chamber (PASC): A Platform to Address Various Challenges in Astrobiology. *Challenges* 5 (2): 213–223. doi:10.3390/challe5020213

Mateo Mederos, M^a Elena, Martínez-Frías, J. & Vegas, J. (2019) Lanzarote and Chinijo Islands Geopark: from Earth to Space. Springer. ISBN 978-3-030-13130-2, DOI 10.1007/978-3-030-13130-2, 250 p.

Matsubara, Y., Howard, A. D., y Gochenour, J. P. (2013) Hydrology of early Mars: Valley network incision. *J. Geophys. Res.*, 118(6), 1365-1387.
McKay D.S., Gibson Everet K., Thomas-Keprta, K.L., Vali H., Romanek C.S., Clemett S.J., Chillier X.D.F., Maechling C.R. y Zare R.N. (1996) Search for life on Mars: Possible relic biogenic activity in Martian meteorite ALH84001. *Science* 273, 924-930.

MERGE (2013) Meteoritos y Recursos Geológicos del Espacio <http://tierra.rediris.es/merge/>

Meyer, C. (2012) Martian Meteorite Compendium. NASA. <https://curator.jsc.nasa.gov/antmet/mmc/alh84001.pdf>

Meyer, C. (2017) The Martian Meteorite Compendium. Updated and revised by K. Righter in 2017. <https://curator.jsc.nasa.gov/antmet/mmc/>

Meyer, M.A., Kminek, G., Beaty, D.W., Carrier, B.L., Haltigin, T. et al. (2022) Report of the Mars Sample Return Science Planning Group 2 (MSPG2). *Astrobiology*. Jun 2022. S-5-S-26. <http://doi.org/10.1089/ast.2021.0121>

Miller, Ana Z., Garcia-Sanchez, A.M., Coutinho, M.L., Pereira, M.F.C., Gazquez, F., Calaforra, J.M., Forti, P., Martínez-Frías, J., Toulkeridis, T., Caldeira, A.T., y Saiz- Jimenez, C. (2020) Colored microbial coatings in show caves from the Galapagos Islands (Ecuador): first microbiological approach *Coatings* 10, 1134; doi:10.3390/coatings10111134

Mouginis-Mark, P. (2018) Olympus Mons volcano, Mars: A photogeologic view and new insights. *Geochemistry*. Vol. 78, Issue 4, 397-431.

Muñoz Aragón, L., García Baonza, V. y Martínez Frías, J. (2017) Geodiversidad y geociencias planetarias. Análogos de Marte en España. *Tierra y Tecnología*. <http://www.icog.es/TyT/index.php/2017/09/geodiversidad-y-geociencias-planetarias-analogos-de-marte-en-espana/>

Muñoz-Caro, G., Mateo-Martí, E. y Martínez-Frías, J. (2006) Near-UV Transmittance of Basalt Dust as an Analog of the Martian Regolith: Implications for Sensor Calibration and Astrobiology. *Sensors* 6(6): 688-696.

Muñoz-Espadas, M.J., Martínez-Frías, J., Lunar, R., Sánchez, B. y Sánchez, J. (2002) The meteorite collection of the National Museum of Natural Sciences, Madrid, Spain: An update of the catalog. *Meteoritics & Planetary Science* 37 Supplement 89-95.

Muñoz Sanz, J., Martínez Frías, J., Lavielle, B. y Gillabert, E. (1999) Spain gets first approved meteorite in 50 years. *Geotimes. News Notes*. <http://www.geotimes.org/sept99/newsnotes.html>

NAI (2020) NASA Astrobiology Institute <https://astrobiology.nasa.gov/nai/>

NAS (2024) Eugene M. Shoemaker. <https://www.nasonline.org/member-directory/deceased-members/50506.html>

NASA (1999) <https://www2.jpl.nasa.gov/sl9/news82.html>

NASA (2004) Mars Olympus Mons. <https://archive.org/details/SVS-2883>

NASA (2021) Ingenuity Mars Helicopter. JPL/NASA https://www.jpl.nasa.gov/news/press_kits/mars_2020/download/ingenuity_landing_press_kit.pdf

NASA-Leonid (2002) Leonids. Leonid Multi-Instrument Aircraft Campaign <https://leonid.arc.nasa.gov/>

NASA (2023) ISRU: In situ Resource Utilization. <https://www.nasa.gov/mission/in-situ-resource-utilization-isru/>

Nayak, B. y Meyer, F. M. (2015) Tetraenaite in terrestrial rock *American Mineralogist* (2015) 100 (1): 209–214.

Nieto, M. L. (2001). Geodiversidad, propuesta de una definición integradora, *Boletín Geológico y Minero*, Vol.112, N.2, pp.3-12

NMCO (2021) <https://www.nmspacemuseum.org/inductee/harrison-h-schmitt/>

Oba, Y., Takano, Y. y Furukawa, Y. et al. (2022) Identifying the wide diversity of extraterrestrial purine and pyrimidine nucleobases in carbonaceous meteorites. *Nat Commun* 13, 2008. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-29612-x>

Oehler, D. Z., Mangold, N., Hallet, B., Fairén, A.G., Le Deit, L., Williams, A.J., Sletten, R.S. y Martínez-Frías, J. (2016) Origin and Significance of Decameter-Scale Polygons in the 3 Lower Peace Vallis Fan of Gale Crater, Mars *Icarus* 277: 56-72

ONU (2021) <https://documents-dds-ny.un.org/doc/UNDOC/GEN/N21/387/61/PDF/N2138761.pdf?OpenElement>

Ormö, J., Lindström, M., Lepinette, A., Martinez-Frias, J. y Diaz, E. (2006) Cratering and modification of wet-target craters: Projectile impact experiments and field observations of the Lockne marine-target crater (Sweden). *Meteoritics & Planetary Science* 41-10: 1605-1613

Pappas, S. (2023) <https://www.livescience.com/space/space-exploration/china-finally-admits-its-hibernating-mars-rover-may-never-wake-up>

Peiman, G. (2021) How NASA Landed the Perseverance on Mars (February 22, 2021). Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=3815131>

Pesonen, L.J., S.Elo, R. Puranen, T.Jokinen, M.Lehtinen, L.Kivekas y I. Suppala (1997) The Karikkoselka impact structure, central Finland: New geophysical and petrographic results, *LPI Contribution* 922, p. 39-40, Lunar and Planetary Institute, Houston, TX, pdf

Phinney, W.C. (2015) Science Training History of the Apollo Astronauts: NASA/SP- 2015-626. <https://history.nasa.gov/alsj/PhinneySP-2015-626.pdf>

Prieto-Ballesteros, O., Martinez-Frias, J., Schutt, J., Sutter, B., Heldmann, J., Bell, M.S., Battler, M., Cannon, H., Gomez-Elvira, J. y Stoker, C. (2008) The subsurface geology of Río Tinto: Material examined during a simulated mars drilling mission for the Mars Astrobiology Research and Technology Experiment (MARTE). *Astrobiology* 8(5): 1013-1021.

Ramírez, R.M. y Craddock, R. (2018) The geological and climatological case for a warmer and wetter early Mars *Nature Geoscience* 11(4):230

REDESPA (2023) Red Española de Planetología y Astrobiología <https://www.icog.es/redespa/>

Rejas, J.G., Martínez-Frías, J., Martínez, R., Marchamalo, M. y Bonatti, J. (2014) Análisis espectral de materiales geológicos en la Cordillera Volcánica Central de Costa Rica y su relación con la detección remota de anomalías. *Estudios Geológicos* 10.3989/egeol.41711.313

Rey, J., Somoza, L., Martínez-Frías, J. y Benito, R. (1994) “Caracterización geoquímica de los sedimentos volcánicos submarinos de Isla Deception (Antártida)” En: Martínez-Frías et al. (Eds) “Geología y Metalogenia en Ambientes Oceanicos. Depositos Hidrotermales Submarinos. Pub. Esp. Instituto Español de Oceanografía , 18: 95-107.

Rey, J., Somoza, L. y Martínez-Frías, J. (1995) “Neotectonic, volcanic and hydrothermal processes related to the geodynamic framework in the Western Bransfield Rift, Deception island (Antarctica)” *Geo-Marine Letters*, 15: 1-8.

Richardson, D. (2020) <https://www.orbital-velocity.com/news/nasa-details-how-artemis-missions-prepare-us-for-mars>

Riley, P. (2008) *Travel absurdities*. iUniverse. ISBN: 9780595524198, 296p.

Rodríguez Losada, J.A. (1988) *El complejo traquítico-fonolítico de la Gomera, Islas Canarias*. Tesis Doctoral. Univ. Complutense de Madrid.

Rodríguez-Losada, J.A., De la Nuez, J. y Martínez-Frías, J. (1988) “Minerales opacos en las intrusiones alcalinas de Tamargada, La Gomera (Islas Canarias). *Boletín de la Sociedad Española de Mineralogía*, Vol. 11, Nº 2: 30-31.

Rodríguez Losada, J.A., Martínez-Frías, J. & Hernández Pacheco, A. (1993) “The Taganana Alkaline Intrusions (Tenerife, Canary Islands): First data on their ore minerals” En: Fenoll, P., Torres Ruiz, J. & Gervilla, F. (Eds) *Current Research in Geology Applied to Ore deposits, SGA*, I:221-225.

Rodríguez-Losada, J.A. y Martínez-Frías, J. (1998) “Ancient oxide and sulphide mineralization in the islands of Tenerife and La Gomera (Canary Islands, Spain)” *Mineralium Deposita*, 33, 639-643.

Rodríguez-Losada, J.A., Martínez-Frías, J., Bustillo, M.A. Delgado, A., Hernández- Pacheco, A. y De la Fuente Krauss, J.V. (2000) “The hydrothermally altered ankaramite basalts of Punta Poyata (Tenerife, Canary Islands)”. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 103 (1-4): 367-376.

Rubin, D. M., A. Fairen, J., Martínez-Frías, J., Frydenvang, O. Gasnault, G. Gelfenbaum, W. Goetz, J.P. Grotzinger, S. Le Moulic, N. Mangold, H. Newsom, D.Z. Oehler, W. Rapin y R.C. Wiens (2017) Fluidized sediment pipes in Gale crater, Mars, and possible analogs in the Middle Jurassic of Utah. *Geology* G38339.1. doi:10.1130/G38339.1

Rull, F. y Martínez Frías, F. (2004) A Micro-Raman Spectroscopic Study of Allende Carbonaceous Chondrite. *GeoRaman2004* June 6-11 Honolulu, Hawai‘i, USA

Rull, F. Martínez-Frías, J., Sansano, A., Medina, J. y Edwards, H. G. M. (2004) Comparative micro-Raman study of the Nakhla and Vaca Muerta meteorites. *J. Raman Spectrosc.* 35: 497–503.

Rull, F., Fleischer, I, Martínez-Frías, J., Sanz, A., Upadhyay, C. y Klingelhofer, G. (2008) Raman and Mossbauer spectroscopic characterisation of sulfate minerals from the Mars analogue sites at Rio Tinto and Jaroso ravine, Spain. *Lunar and Planetary Science XXXIX* (2008) 1616.pdf

Russel, J. y Fonseca, F. (2019) Arizona Town Was Influential in Apollo Moon Missions. <https://learningenglish.voanews.com/a/arizona-town-was-influential-in-apollo-moon-missions/4993145.html>

Salomone, M. (2002) *El Universo y la Vida*. Edit. Centro de Astrobiología, Cromotex. 130p.

Sánchez, J.V. (2018) Aislamiento, identificación y caracterización de microorganismos procedentes de sedimentos marinos antárticos. TFG, UCM.

Schneider, J. (2023) “Interactive Extra-solar Planets Catalog”. *The Extrasolar Planets Encyclopedia*. Retrieved 1 December 2023 <https://exoplanet.eu/catalog/#catalog-table-section>

Sauro F., Pozzobon R., Santagata T., Tomasi I., Tonello M., Martínez-Frías J., Smets L.M., Gómez G.D. y Massironi M. (2019) Volcanic Caves of Lanzarote: A Natural Laboratory for Understanding Volcano-Speleogenetic Processes and Planetary Caves. In Lanzarote and Chinijo Islands Geopark: From Earth to Space, Springer 125- 142.

Sauro, F., Massironi, M., Pozzobon, R., Martínez Frías, J., Gasparetto, P., Pegoraro, S. y Tosato, F. (2021) Studio mineralogico del cono di scorie di Tinguatón (Lanzarote, Isole Canarie) tramite l'analisi dei campionamenti svolti nei programmi PANGAEA e PANGAEA X dell'Agenzia Spaziale Europea. *Micro* 19 (3-2021):174-192.

Sauro, F., Samuel J. Paylera, Matteo Massironi, Riccardo Pozzobon, Harald Hiesingere, Nicolas Mangold, Charles S. Cockell, Jesus Martínez Frías, Kåre Kullerud, Leonardo Turchia, Igor Drozdovskiy y Loredana Bessone (2023) Training astronauts for scientific exploration on planetary surfaces: The ESA PANGAEA programme. *Acta Astronautica* Vol. 204, March 2023, Pages 222-238.

Schulze-Makuch, D., Dohm, J.M., Fan, Ch., Fairén, A.G., Rodriguez, J.A.P., Baker, V.R. y Fink, W. (2007) Exploration of hydrothermal targets on Mars. *Icarus* 189 (2007) 308–324.

SGE-CGP (2018) <https://sociedadgeologica.org/comisiones-sge/comision-geologia-planetaria/>

Somoza, L., Martínez-Frías, J., Smellie, J.L., Rey, J., y Maestro, A. (2004) Evidence for hydrothermal venting and sediment volcanism discharged after recent short-lived volcanic eruptions at Deception Island, Bransfield Strait, Antarctica *Marine Geology* 3400: 1-23

Spray, J. (2023) http://www.passc.net/EarthImpactDatabase/New%20website_05-2018/Lockne.html

Steele, I.M. (1974) Ilmenite and Armalcolite in Apollo 17 Breccia. *American Mineralogist*, Volume 59, pages 681-689.

Stoker, C.R., Cannon, H., Dunagan, S., Lemke, L.G., Miller, D., Gomez Elvira, J., Glass, B., Davis, K., Zavaleta, J., Rodriguez Manfredi, J.A., Fernandez Remolar, D., Parro, V., Bonaccorsi, R., Prieto Ballesteros, O., Bell, M.S., Brown, A., Battler, M., Chen, B., Cooper, G., Davidson, M.,

Martinez-Frias, J., Gonzalez Pastor, E., Sutter, B y Schutt, J. (2008). The 2005 MARTE Robotic Drilling Experiment in Rio Tinto Spain: Objectives, Approach, and Results of a Simulated Mission to Search for Life in the Martian Subsurface. *Astrobiology* 8(5): 921-945.

Tanaka, K.L., Skinner, J.A., Jr., Dohm, J.M., Irwin, R.P., III, Kolb, E.J., Fortezzo, C.M., Platz, T., Michael, G.G., y Hare, T.M. (2014a) Geologic map of Mars: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Map 3292, scale 1:20,000,000, pamphlet 43 p., <https://dx.doi.org/10.3133/sim3292>.

Tanaka, K.L., Robbins, S.J., Fortezzo, C.M., Skinner, J.A., Hare y T.M. (2014b) The digital global geologic map of Mars: Chronostratigraphic ages, topographic and crater morphologic characteristics, and updated resurfacing history. *Planetary and Space Science*, 95: 11-24

The White House (2020) A New Era for Deep Space Exploration and Development. <https://aerospace.csis.org/wp-content/uploads/2020/07/A-New-Era-for-Space-Exploration-and-Development-07-23-2020.pdf>

TIERRA (2002) <http://tierra.rediris.es/merge/congremeteor/>

TIERRA (2004) http://tierra.rediris.es/merge/Carl_Sagan/

TIERRA (2011) <http://tierra.rediris.es/>

TPS (2023a) <https://planetary.s3.amazonaws.com/web/assets/pictures/mars-exploration-family-portrait-v13.jpg>

TPS (2003b) International Student Team Selected to Work in Mars Rover Mission Operations https://www.planetary.org/press-releases/1106_international_student_team_selected_to

UB (1970) I Seminario de Geología Lunar; organizado por el Instituto de Investigaciones Geológicas de la Excm. Diputación Provincial de Barcelona con la colaboración del Excmo Ayuntamiento de esta ciudad, 19-20 de mayo de 1970. Volume 25 of Universidad de Barcelona. Instituto de Investigaciones Geológicas. https://books.google.es/books/about/I_Seminario_de_Geolog%C3%ADa_Lunar_org_ani_zad.html?id=0pChzQEACAAJ&hl=en&output=html_text&redir_esc=y

USGS (2023) <https://web.archive.org/web/20170706011251/https://astrogeology.usgs.gov/>

Wiens, R.C., Maurice, S., Mangold, N., Anderson, R., Beyssac, O., Bonal, L., Clegg, S., Cousin, A., DeFlores, L., Dromart, G., Fischer, W. Forni, O., Fouchet, T., Gasnault, O., Grotzinger, J., J. Johnson, J., Martinez-Frias, J., McLennan, S., Meslin, P.Y., Montmessin, F., Poulet, F., Rull, F., Sharma, S. y the SuperCam team (2018) Plans For Selection And In-Situ Investigation Of Return Samples By The Supercam Instrument Onboard The Mars 2020 Rover. 2nd International Mars Sample Return 2018 (LPI Contrib. No. 2071) <https://www.hou.usra.edu/meetings/marssamplereturn2018/pdf/6072.pdf>

Xia, Cui; Xu, Jing; Li, Chen; Cai, Jinman (2021). Zhurong”—China’s first Mars rover has a name! En Qiu, Jing, ed. CCTV News (en chino). <http://m.news.cctv.com/2021/04/24/ARTIGlCivXtKtZPaf0ifoehv210424.shtml>

Yaden, David B.; Iwry, Jonathan; Slack, Kelley J.; Eichstaedt, Johannes C.; Zhao, Yukun; Vaillant, George E.; Newberg y Andrew B. (2016). The overview effect: Awe and self-transcendent experience in space flight. *Psychology of Consciousness: Theory, Research, and Practice*. 3 (1): 1–11.

Zhang, L., Li, C., Zhang, J. et al. (2023) Buried palaeo-polygonal terrain detected underneath Utopia Planitia on Mars by the Zhurong radar. *Nat Astron.* <https://doi.org/10.1038/s41550-023-02117-3>

Zimelman, J.R., Brent Garry, W., Elvin Bleacher, J. y Crown, D.A. (2015) Volcanism on Mars. *The Encyclopedia of Volcanoes*, 717-728 <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00041-9>

**CONTESTACIÓN
DE LA
EXCMA. SRA. D^a LAIA ALEGRET BADIOLA**

Excelentísimo señor Presidente,
Excelentísimos miembros de la Academia,
Autoridades,
Señoras y señores,

Quisiera agradecer a la presidencia de la Academia el haberme designado para contestar el discurso de ingreso del Dr. Jesús Martínez Frías. Es para mí un gran honor recibirle como Académico Numerario en nombre de los miembros de esta Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de España.

Recibo este encargo con responsabilidad por el reto que supone sintetizar en apenas unas líneas una carrera científica y profesional tan brillante, y también con una gran satisfacción, ya que se da la coincidencia de que mi director de tesis y amigo, el profesor Eustoquio Molina Martínez, me habló poco antes de fallecer sobre una nueva colaboración que iba a emprender junto a un brillante científico español llamado Jesús Martínez Frías. Estoy segura de que se hubiera alegrado muchísimo de su entrada en esta Real Academia.

Siguiendo el protocolo habitual de los discursos de contestación, a continuación, trataré de exponer brevemente los logros científicos y profesionales del nuevo académico.

D. Jesús Martínez Frías obtuvo la Licenciatura y el Doctorado en Ciencias Geológicas en la Universidad Complutense de Madrid. En 1986 defendió su tesis doctoral sobre sistemas hidrotermales de mineralización asociados al volcanismo. A partir de 1987 comenzó una serie de estancias postdoctorales en la Universidad de Leeds en el Reino Unido, y en el Museo Nacional de Ciencias Naturales en Madrid, donde trabajó en meteoritos y en los sistemas hidrotermales del Jaroso y Canarias. También desarrolló estancias de formación e investigación en las Universidades de Leeds (Reino Unido), Heidelberg (Alemania), Toronto (Canadá) y California-San Diego (Estados Unidos), donde se especializó en el estudio de meteoritos, Geología planetaria y Astrobiología.

Ha desarrollado su actividad investigadora en el Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra (Granada), en el Museo Nacional de Ciencias Naturales y en el Centro de Astrobiología (Madrid), asociado al Instituto de Astrobiología de la NASA, donde fue miembro de su convenio fundacional, jefe del Laboratorio de Geología Planetaria y director del Departamento de Planetología y Habitabilidad. Actualmente, es Investigador Científico del CSIC en el Instituto de Geociencias (centro mixto CSIC-UCM), donde fundó el grupo de investigación de Meteoritos y Geociencias planetarias. Es Profesor Honorífico en el Departamento de Bioingeniería e Ingeniería Aeroespacial de la Universidad Carlos III de Madrid. Desde 2002 hasta 2014, fue fundador y responsable, por parte del CSIC, de la Unidad Asociada de la Universidad de Valladolid-CSIC, de Cosmogeología y Astrobiología. Entre 2015 y 2017 fue Investigador Asociado del Laboratorio para la investigación espacial de la Universidad de Hong Kong, y desde 2015 hasta 2022, fue jefe del Laboratorio de Geociencias de Lanzarote. Actualmente es el responsable científico del Módulo de Análogos Planetarios de dicho laboratorio.

Todo este bagaje se ha traducido en una carrera investigadora caracterizada por una visión interdisciplinar de los problemas científicos. Tal y como describe perfectamente en su discurso, “Marte, como tema en sí mismo, tiene un carácter poliédrico, de manera que su investigación puede abordarse desde distintas perspectivas y aproximaciones científicas”. Siendo consecuente con esta visión, Martínez Frías ha fomentado las conexiones entre las geociencias y otras áreas de conocimiento, combinando las Ciencias de la Tierra, del espacio y de la vida. Conoce muy bien el campo de la Geología planetaria, y de hecho promovió su incorporación en el Boletín Oficial del Estado como una de las funciones profesionales de los geólogos. Como él mismo afirma, la Geología planetaria “se sustenta también en las Matemáticas, Física, Química y Biología en un cruce científico-técnico que, además de enriquecer el área de las Ciencias de la Tierra, es una base fundamental para la evolución interdisciplinar del conocimiento en su sentido más amplio”. Esta aproximación, unida a una dosis importante de colaboraciones internacionales, ha dado como fruto originales investigaciones sobre meteoritos asteroidales y de Marte, sobre simulantes regolíticos para investigaciones en la Luna y Marte, y sobre cráteres de impacto. Ha incorporado siete nuevos meteoritos al catálogo internacional de la Meteoritical Society, y ha colaborado en la puesta en órbita de un picosatélite con basalto de Lanzarote para la habitabilidad lunar. Martínez Frías ha abordado de manera pionera el estudio de análogos para la comprensión de la relación entre la presencia de agua y la habitabilidad en otros cuerpos planetarios, y ha realizado campañas científicas para el estu-

dio de ambientes extremos como análogos planetarios en la Antártida, Islandia, Mauritania y Costa Rica.

Para realizar estas actividades ha colaborado en más de 50 proyectos de investigación nacionales e internacionales, entre los que destaca su participación, como miembro de los equipos de ciencia, en las misiones de la NASA (National Aeronautics and Space Administration) a Marte con los rovers Curiosity y Perseverance y en la misión ExoMars (rover Rosalind Franklin, Agencia Espacial Europea ESA - Agencia Espacial Federal de Rusia Roscosmos), o su participación en el vuelo de la NASA/SETI (Search for Extra Terrestrial Intelligence) para el estudio de las Leónidas (Leonid MAC Mission). Además, es el único científico español instructor de astronautas (de la Agencia Espacial Europea, NASA, la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial JAXA y Roscosmos) sobre Geología planetaria y Astrobiología en el Geoparque Mundial UNESCO de Lanzarote, temas en los que ha sido pionero y principal promotor. También ha formado parte de proyectos europeos COST y H2020, es colaborador científico del proyecto BIOMEX de la Estación Espacial Internacional, y ha sido investigador principal de proyectos nacionales.

Ha participado en iniciativas científicas para la creación de sinergias y la fundación de nuevos centros y organizaciones. Así, ha sido fundador y es actual presidente de la Red Española de Planetología y Astrobiología (REDESPA), de la Comisión de Geología Planetaria de la Sociedad Geológica de España, y cofundador y presidente de la Asociación Internacional de Geoética (IAGETH).

Autor y editor de 12 libros y más de 360 publicaciones y capítulos de libros, incluyendo más de 160 artículos en revistas científicas del Science Citation Index como Nature, Science, Geology, Astrobiology, Meteoritics and Planetary Sciences, Icarus, o Planetary and Space Science, entre otras. Sus investigaciones han sido portada en varias de estas revistas, y recogen en Google Scholar más de 12.000 citas, con un índice h de 48.

Fundador y editor principal de la revista Geosciences (Suiza) y coeditor de la Serie de libros Springer “Geoheritage, Geoparks and Geotourism” y “GeoGuide”. Ha actuado y actúa como miembro del consejo editorial de varias revistas científicas españolas e internacionales (Episodes, International Journal of Astrobiology, Sustainability, Minerals, Life, Challenges, Interdisciplinary Science Reviews, Sci, o el Boletín del Instituto Geológico y Minero de España, entre otras).

Cuenta con el reconocimiento de seis sexenios de investigación y seis quinquenios de docencia. Ha desarrollado tareas docentes en siete universidades, y ha dirigido cuatro cursos online del Colegio Oficial de Geólogos, y ocho tesis doctorales. Entre las más de 500 conferencias presenciales en 19 países, destaca su participación en el prestigioso programa “Lecture Tour” de la Asociación Mineralógica de Austria.

Ha participado en multitud de comisiones y comités científicos nacionales e internacionales, y por citar sólo algunos, destacaré su labor como representante de España en el Comité de Recursos Naturales de la ONU (UN ECOSOC Natural Resources Committee) y en la Comisión de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo de Naciones Unidas, de la que fue vicepresidente. Entre 2010 y 2016 presidió la Comisión Internacional de Geoeducación de la Unión Internacional de Ciencias Geológicas (IUGS-COGE), y desde 2013 es presidente de la Asociación Internacional de Geoética (IAGETH). Ha colaborado con agencias de evaluación como la European Science Foundation o The National Geographic. En España, fue miembro del Comité Científico Asesor del Área de Recursos Naturales del CSIC y miembro de la Junta Directiva de la Sociedad Española de Mineralogía. Durante más de 15 años ha sido coordinador en España de The Planetary Society, fundada por Carl Sagan, y es experto de la Comisión de Seguimiento de Situaciones de Crisis de Presidencia del Gobierno (actual Departamento de Seguridad Nacional) sobre riesgos de impactos asteroidales y cometarios.

De manera paralela a sus investigaciones, a lo largo de su carrera ha colaborado con los medios de comunicación y ha participado en actividades de divulgación y de asesoramiento científico.

Esta dilatada trayectoria ha sido reconocida con premios entre los que destacan cuatro de la NASA (NASA Group Achievement Award) y siete de la Agencia Espacial Europea por su labor en el Geoparque de Lanzarote y como instructor de astronautas, o el premio «Julio César García Valencia» como reconocimiento a la labor educativa. En 2020 fue distinguido como Académico Correspondiente de la Academia de Ciencias, Ingenierías y Humanidades de Lanzarote, en 2022 como Numerario, y en 2023 como Académico Correspondiente de la Real Academia de Doctores de España. En 2024, científicos de la Sociedad Científica de Astrobiología del Perú le han dedicado el “Laboratorio Martínez Frías” de Astrobiología.

Considero que la fórmula para una carrera tan exitosa resulta de la combinación de varios ingredientes: una base de visión y capacidad, grandes dosis de trabajo y colaboración, curiosidad y entusiasmo a partes iguales, y un poco de casualidad. Su visión en ciencia le ha acompañado a lo largo de su carrera, y los estudios sobre sistemas de mineralización asociados con el volcanismo y el agua, con los que inició sus investigaciones a finales de los años ochenta del siglo pasado, y que en principio estaban enfocados a nuestro planeta, fueron posteriormente extrapolados, y hoy en día estos análogos terrestres de ambientes extremos son uno de los pilares para la búsqueda de evidencias de vida en Marte y en otros planetas. Otra evidencia de su visión es el hecho de que su grupo pronosticó y propuso que en Marte deberían de aparecer las mismas fases minerales que en El Jaroso, adelantándose en tres años a lo que posteriormente el rover Opportunity descubrió en la zona de Meridiani Planum de Marte: la presencia de jarosita y otras fases asociadas. Este hallazgo fue muy relevante porque la jarosita requiere agua líquida para formarse, por lo que constituía un mineral geoindicador de habitabilidad. Su capacidad de trabajo y colaboración quedan sobradamente plasmados en un extenso currículum que, créanme, resulta difícil de sintetizar. La cooperación internacional es una parte intrínseca de la carrera de Martínez Frías, quien la considera imprescindible para generar sinergias, incluso más allá de lo esperado. Los siguientes ingredientes de esta fórmula se hacen evidentes al preguntar al propio Jesús sobre qué aspectos considera más relevantes de su participación en los equipos de ciencia de la NASA. Lejos de resaltar el prestigio que aporta su participación en estos programas, o ahondar en el alto nivel científico de los mismos, él destaca como aspectos más relevantes una serie de vivencias con las que me siento totalmente identificada, pero en mi caso no por investigar otros planetas, sino por haber participado en la exploración de un continente sumergido y apenas conocido, Zelandia. Se trata de sentimientos intrínsecos a la exploración y al descubrimiento en ciencia, y que se resumen en la curiosidad y emoción de explorar lo desconocido; la fascinación de ir desvelando, a través de análisis científicos, cómo ha sido la evolución de los paleoambientes marcianos en su caso, y de un continente en el mío; el saber que estamos trabajando con material único y que será estudiado en detalle por las futuras generaciones de científicos; y finalmente, el entusiasmo de que, tal vez, podamos ser capaces de detectar algún biomarcador de vida pasada.

En mi opinión, la fórmula de esta carrera tan exitosa no estaría completa sin una pequeña dosis de casualidad, que no digo suerte, puesto que no podría estar más de acuerdo con Pablo Picasso y su tantas veces repetida

frase “La inspiración existe, pero tiene que encontrarte trabajando”. Si bien hay puntos de la carrera en los que hay que estar en el momento y lugar adecuados, de nada sirven estas casualidades si no hay un gran trabajo por detrás, y en el caso de Jesús, ha habido mucho. De la misma manera que el rover Perseverance de la misión NASA-Mars2020 no podría haber aterrizado entre dos cuadrículas canarias en Marte, denominadas Teide y Timanfaya, si no hubiera habido detrás un equipo español que investigara y nombrara ambas zonas. Algo de suerte sí que se podría decir que ha tenido esta Real Academia de Ciencias al recibir como Académico a Jesús Martínez Frías, aunque de nuevo, esto tampoco habría ocurrido si él no hubiera desarrollado una carrera tan brillante, y sin la inestimable labor de los Académicos Antonio Cendrero, Jon Marcaide y Caridad Zazo, que presentaron su candidatura para cubrir la vacante en Geología planetaria.

No querría acabar esta contestación sin dar una breve pincelada personal sobre el nuevo Académico, pues considero que la relación entre lo humano y lo científico-profesional es un buen indicador que trasciende cualquier otro índice. Para ello consulté a su directora de tesis, la Catedrática de la Universidad Complutense y directora de su Instituto de Geociencias, Rosario Lunar Hernández. Por encima de los numerosos logros científicos anteriormente mencionados, ella destaca la faceta exploradora del Dr. Martínez Frías: “Ha explorado los sistemas hidrotermales volcánicos en la Antártida, en Islandia, Costa Rica, Hawaii y en España, donde tenemos también fabulosos ejemplos en Canarias, en el sureste Peninsular (Murcia y Almería) y en la zona de Calatrava, en Ciudad Real. Ha explorado los fondos marinos del Golfo de Cádiz, los cráteres de impacto y los domos volcánicos en el desierto del Sáhara, en Mauritania y alguno más en Finlandia y Suecia. Ha explorado los estromatolitos de Pilbara en Australia y zonas geológica y astrobiológicamente extraordinarias de Colombia, Perú y Paraguay. En la atmósfera, ha explorado la formación de los megacriometeoros y la llegada de meteoroides cometarios del cometa Temple-Tuttle, participando en un vuelo de la NASA. Y en la Tierra, la llegada de meteoritos, incluso procedentes del planeta rojo. Y qué decir de sus exploraciones en Marte con los rovers Curiosity y Perseverance y sus rutas de exploración en Lanzarote con las que se instruyen los astronautas. Además de esto, se ha adentrado como escritor en la exploración de los mundos interiores, también importantes, con dos novelas de ficción científica”. La Dra. Lunar Hernández subraya además la calidad humana de su antiguo estudiante, sus principios y empatía, su generosidad, tenacidad, y su disposición siempre a atender y ayudar, por muy ocupado que estuviera en sus numerosas actividades. Pero para que no parezca que todo queda en casa,

es justo mencionar que al preguntar por el nuevo Académico a otros colaboradores de la unidad de Astrobiología de la NASA y de su Mars Science Laboratory, a quien tengo en muy alta estima, se refieren a él como un miembro altamente respetado de la comunidad científica española.

Para concluir, el Dr. Jesús Martínez Frías es uno de los grandes investigadores de nuestro país, reconocido internacionalmente en el campo de la Geología planetaria y Astrobiología. Es una gran satisfacción que a partir de ahora represente a este campo en nuestra institución, que ya es su casa. Querido Jesús, la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de España se honra en recibirte entre sus miembros, y en su nombre es para mí un placer darte la bienvenida.

Muchas gracias.