

## DISCURSO DE INGRESO

---

### **El regreso a la Luna: recursos, habitabilidad y el programa Artemisa\***

#### **Return to the Moon: resources, habitability and the Artemis program**

Jesús Martínez Frías

Académico Correspondiente de la Sección de Ciencias Experimentales de la Real Academia de Doctores de España

[j.m.frias@igeo.ucm-csic.es](mailto:j.m.frias@igeo.ucm-csic.es)

#### **RESUMEN**

La Luna es importante por diversas razones: geológicas, astronómicas, astrofísicas, de ingeniería, cosmoquímicas y socioculturales en general, acrisoladas a través de la integración interdisciplinar de diferentes áreas de conocimiento. Constituye nuestro primer paso para salir al espacio y desarrollar posteriores misiones tripuladas a Marte y más allá. En esta contribución se introducen sucintamente los principales aspectos relacionados con el origen y evolución de la Luna, imprescindibles para comprender la situación actual acerca del, cada vez más cercano, retorno a nuestro satélite. Asimismo, se aborda, desde la geología planetaria y otras disciplinas, la descripción de sus principales recursos (ISRU: in situ resource utilization) y su importancia para la habitabilidad de las futuras misiones tripuladas, en especial en el marco de una base semipermanente, probablemente en el polo Sur y en el contexto del programa Artemisa. Finalmente, se exponen algunos proyectos de investigación y actividades que se vienen desarrollando en España, conectadas con el regreso a la Luna.

**PALABRAS CLAVE:** Luna, ISRU, habitabilidad, geología planetaria, Artemisa

#### **ABSTRACT**

The Moon is important for several reasons: geological, astronomical, astrophysical, engineering, cosmochemical, and socio-cultural in general, all of which are achieved through the interdisciplinary integration of different areas of knowledge. It constitutes our first step to go into space and develop subsequent manned missions to Mars and beyond. This contribution succinctly introduces the main aspects related to the origin and evolution of the Moon, essential to understand the current situation regarding the ever closer return to our satellite. The description of its main resources (ISRU: in situ resource utilization) and their importance for the habitability of future manned missions, especially in the framework of a semi-permanent base, probably at the South Pole and in the context of the Artemis program, is also addressed from the point of view of planetary geology and other disciplines. Finally, some research projects and activities being developed in Spain in connection with the return to the Moon are presented.

**KEYWORDS:** The Moon, ISRU, habitability, planetary geology, Artemis.

---

\* Discurso pronunciado por el Dr. D. Jesús Martínez Frías en su Toma de Posesión como Académico Correspondiente de la Real Academia de Doctores de España el día 25-10-2023.

## 1.- LA LUNA COMO PRIMER PASO HACIA EL ESPACIO

---

La vida no ha dejado de explorar desde que apareció en la Tierra hace casi 4000 millones de años. Se ha extendido de los mares y océanos a los continentes y de éstos a la atmósfera. La humanidad continúa este proceso hacia el espacio y nosotros, nuestra generación, está siendo testigo de ello. Somos la generación que está viviendo los primeros pasos científicos, tecnológicos y socio-culturales que está dando el ser humano de la Tierra al Espacio, con todo lo que ello conlleva como desafío presente y futuro.

La Luna es importante por diversas razones: geológicas, astronómicas, astrofísicas, de ingeniería, cosmoquímicas, e incluso, como se ha apuntado anteriormente, socioculturales, acrisoladas a través de la integración interdisciplinar de diferentes áreas de conocimiento. Sería absurdo pretender realizar aquí una contribución detallada sobre todas las implicaciones asociadas con la exploración e investigación de nuestro satélite. Pero, sí resulta factible proporcionar un barniz general sobre su relevancia, fundamentalmente geológica (astrogeológica), y sobre cómo a través de la geología planetaria se están obteniendo datos cruciales que constituyen una especie de hilo conductor entre el pasado remoto hace miles de millones de años y nuestros orígenes, con la futura expansión de la humanidad hacia el cosmos.

La Luna nos ha acompañado a lo largo de todo nuestro periplo evolutivo. De hecho, se ha propuesto que ha sido un factor clave para posibilitar la propia emergencia y evolución de la vida en la Tierra (Gronstal et al. 2007). Curiosamente, la Luna constituye nuestro primer paso para salir al espacio y desarrollar posteriores misiones tripuladas a Marte. Así, aunque el programa Artemisa se centra especialmente en nuestro satélite, su objetivo, tal y como está reflejado oficial e institucionalmente, está más lejos: en el planeta rojo. Por ello, es crucial comprender qué recursos contiene la Luna, fundamentalmente recursos geológicos, y cuáles serán los pros y los contras relativos a nuestra futura habitabilidad en el espacio (Martínez Frías et al. 1997,1998; Martínez Frías, 1999, Lunar, 2006).

Además, ahora podemos observar nuestro planeta y otros planetas y lunas con una perspectiva distinta. La Tierra es un Sistema, pero también un Modelo. Esto implica nuevos criterios, procedimientos y conexiones interdisciplinares para la investigación y exploración espacial. En ellas, se integran, por ejemplo, vanguardistas aspectos astrobiológicos relacionados con la búsqueda de vida extraterrestre o sus posibles biomarcadores pasados y con nuestra propia traslación a la Luna y otros planetas, mediante las misiones tripuladas y el establecimiento de bases semipermanentes y permanentes. Un proceso que ya está en marcha, especialmente en el contexto del denominado Espacio Cercano a la Tierra (Luna, Marte y asteroides) y que, en el marco del ambicioso y extraordinario programa Artemisa, se aborda en la presente contribución.

Como se expondrá más adelante, el programa Artemisa, en sus distintas fases, aborda estas cuestiones y continúa todo lo realizado hace ya medio siglo en las misiones Apolo y las sucesivas misiones robóticas enviadas por diferentes países. Gracias a todas ellas disponemos de un conocimiento excelente de las principales rocas y minerales lunares, sus recursos y elementos estratégicos, una cartografía lunar muy detallada (Fig. 1) y muchos otros datos que nos permiten plantear los objetivos científicos y tecnológicos a través de una detallada planificación.

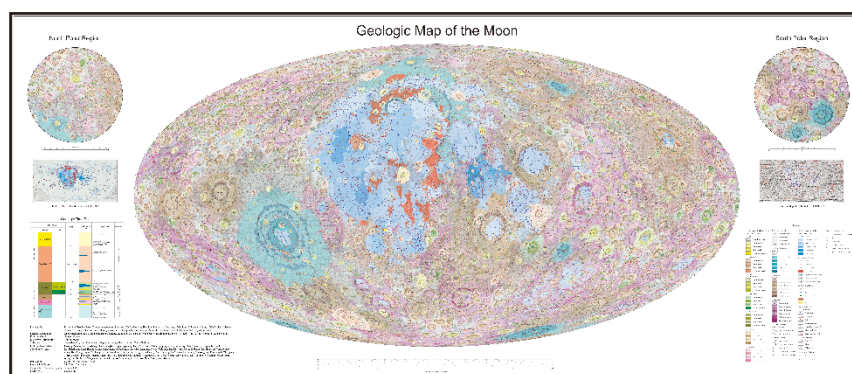


Fig. 1: Mapa geológico global de la Luna, escala 2.500.000 (Jinzhui et al. 2022) y Science Data Bank (acceso libre) <https://www.scidb.cn/en/detail?dataSetId=972277454573928448%3FdataSetId%3D972277454573928448>

Pero, hay algo más que, sin ser puramente científico, no es por ello menos importante. Como han puesto de manifiesto las misiones Apolo, gracias a la exploración de nuestro satélite hemos podido contemplar nuestro planeta con una nueva perspectiva (Fig.2), algo que está suponiendo, casi sin ser conscientes de ello, un cambio de paradigma sociocultural a escala global de toda la humanidad.



Fig. 2: Imagen icónica de la Tierra desde la Luna, tomada por el astronauta Bill Anders, (Apolo 8). Créditos: NASA

Concretamente, en su punto 13, en dicha Resolución se expresa oficialmente:

No es de extrañar que, dada la relevancia de nuestro satélite, la ONU decidiera declarar el 20 de julio de 2021, como “Día Internacional de la Luna”. De hecho, es incluso más reciente, ya que la Resolución 76/76 de Naciones Unidas se aprobó el 9 de diciembre de 2021 y se publicó y distribuyó el 15 de diciembre de ese mismo año, como parte del septuagésimo periodo de sesiones, Tema nº 53, Cooperación internacional para la utilización del espacio ultraterrestre con fines pacíficos (Martínez Frías, 2023).

13. Declara el 20 de julio Día Internacional de la Luna, para conmemorar cada año a nivel internacional el aniversario del primer aterrizaje de seres humanos en la Luna, el 20 de julio de 1969, en el marco de la misión lunar Apolo 11, tomando en consideración los logros de todos los Estados en la exploración de la Luna, y para sensibilizar sobre la exploración y utilización sostenibles de la Luna.

Más específicamente, la importancia geológica estratégica de la Luna también está contemplada en la propia Resolución de Naciones Unidas, concretamente en el punto 34, cuando se especifica que “se tengan en cuenta la importancia de las aplicaciones de la ciencia y la tecnología espaciales y la utilización de datos geospaciales obtenidos desde el espacio”. Y conviene recordar que el único científico que ha estado hasta el momento en la Luna ha sido un geólogo: Harrison Schmitt, en la misión Apolo 17 (Fig.3).



Fig. 3.: El astronauta y geólogo planetario Harrison Schmitt utiliza un extractor especial para coleccionar muestras lunares. Misión Apolo 17. Créditos: NASA

Hace tan solo 4 años, se cumplía el 50º Aniversario del primer alunizaje protagonizado por Neil Armstrong, Edwin (Buzz) Aldrin y Michael Collins. A ellos, en el marco del programa Apolo, les siguieron otros 9 astronautas en un total de 11 misiones tripuladas a nuestro satélite, que completaron 367 órbitas alrededor de la Luna, 6 alunizajes y un tiempo total de permanencia allí de 81 horas y 5 minutos. La última misión tripulada (Apolo 17) se remonta a 1972 (Fig.4). Tras todas ellas, ha habido muchas más, aunque sin presencia humana, desarrolladas por numerosos países.

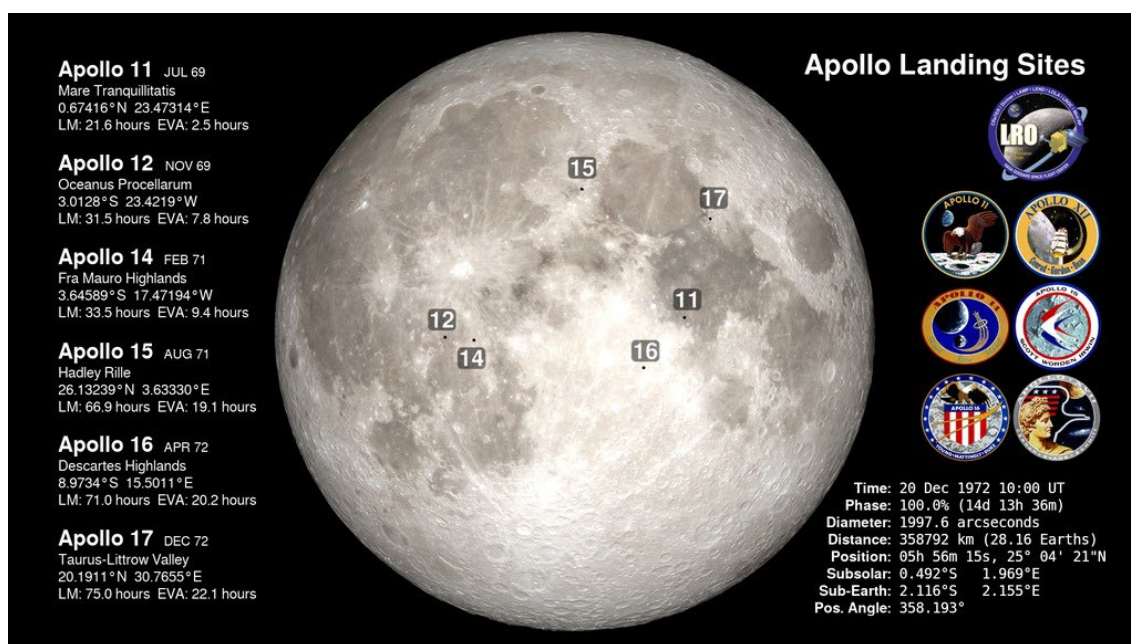


Fig. 4: Los astronautas han puesto su huella en la Luna en seis misiones tripuladas.  
Créditos. The Planetary Society

Si 2021 se ha definido como el Año de Marte, con la llegada casi simultánea de tres misiones de países tan distantes como EEUU (NASA/Mars2020), China (Tianwen1) y Emiratos Árabes Unidos (HOPE), el bienio 2022-2023 podría calificarse como el de la Luna, con los espectaculares resultados obtenidos con el arranque y lanzamiento en 2022 del ambicioso programa Artemisa y con las misiones de Rusia (Luna-25), India (Chandrayaan-3) y Japón (Hakuto-R, privada y SLIM, JAXA).

Hakuto-R fue una misión fallida privada japonesa de aterrizaje lunar sin tripulación que se lanzó en diciembre de 2022 y finalizó el 25 de abril de 2023. La nave espacial probablemente se estrelló durante su aterrizaje en la luna. Las misiones de Rusia e India alcanzaron nuestro satélite en agosto de 2023. Luna-25 pudo enviar imágenes de la Luna, concretamente del cráter Zeeman (aunque desafortunadamente se desvió de su trayectoria prevista y acabó también estrellándose contra la superficie de nuestro satélite). Roscosmos reconoció que

había perdido contacto con la nave el sábado 19 de agosto a las 13.57 h (hora peninsular española) y los intentos de contacto fueron infructuosos.

Sin embargo, Chandrayaan-3 sí consiguió un éxito sin precedentes. No solo aterrizando, por primera vez, el miércoles 23 de agosto, muy cerca del polo sur de la Luna, específicamente entre los cráteres Manzinus y Simpelius, sino desplegando su pequeño rover de exploración (rover Pragyan), para la realización de diferentes análisis, algunos de ellos, de importancia para la futura habitabilidad lunar (Fig.5).

SLIM, el pequeño aterrizador japonés, iba a ser lanzado el 26 de agosto de 2023, pero en principio se pospuso al 15 de septiembre y despegó exitosamente el 6 de dicho mes. Su principal objetivo es demostrar la viabilidad de utilizar sistemas de exploración más livianos, aterrizando en lugares específicos y más precisos (a una distancia de 100 m de su objetivo), para acelerar la exploración del sistema solar.

En esta contribución se abordan muchos de estos aspectos relativos a la geología, recursos y habitabilidad futura en la Luna, centrándonos en el programa Artemisa. Gracias a este más de medio siglo de actividades tripuladas y robóticas a nuestro satélite, disponemos de un cuerpo de conocimiento muy relevante, principalmente, aunque no solo, geológico, que nos permitirá progresar en nuestra salida hacia el cosmos.

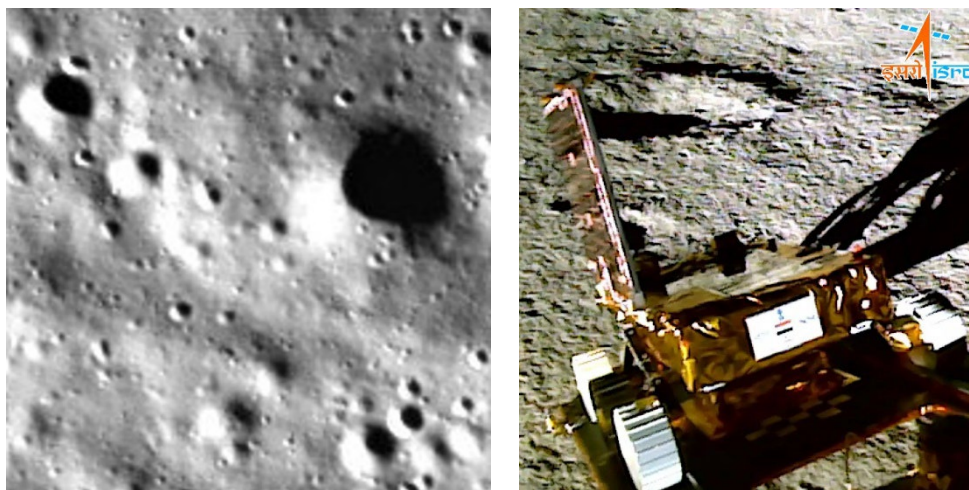


Fig.5: Izquierda: una de las primeras imágenes tomada por la Lander Horizontal Velocity Camera de la misión Chandrayaan-3 durante el descenso en esta zona inexplorada cercana al polo sur de la Luna. Derecha: Rover Pragyan. Créditos: ISRO

## 2.- GEOLOGÍA, PRINCIPALES RECURSOS Y HABITABILIDAD - ISRU

---

Los recursos de la Luna son fundamentalmente recursos geológicos (Martínez Frías et al. 1997, 1998, Lunar, 2006). Sería pretencioso intentar sintetizar en este apartado todo lo

relativo al origen y evolución geológica de nuestro satélite. Sin embargo, es casi obligado dar unas pinceladas sobre ello ya que, de ello, depende comprender los tipos de rocas, minerales y recursos para la habitabilidad del ser humano en las futuras bases semipermanentes, pues suponen el contexto en el que se desarrollarán las diferentes actividades.

La Luna no se formó coetáneamente con la Tierra y el conjunto de nuestro entorno de planetas terrestres. Esto es importante para comprender su importancia y abordar su investigación y exploración en conexión con el origen y evolución de la Tierra. Todos los modelos indican que su origen fue algo posterior, como consecuencia del enorme impacto de un objeto del tamaño de Marte contra la prototierra, al que se ha llamado Tea. Los modelos más importantes que explican su génesis son los de Canup (2012), Rufu et al. (2017) y Hosono et al. (2019). Recientemente, Kegerreis et al. (2022) proponen un origen muy rápido en la formación de nuestro satélite. Todos los modelos han sido evaluados sobre la base de datos petrológicos y geoquímicos comparativos de la Tierra y la Luna (en esta última incluyendo tanto rocas lunares de las misiones Apolo como meteoritos lunares) y mediante la utilización de simulaciones y modelos computerizados. Los tres modelos difieren en algunos aspectos del proceso de colisión, pero coinciden en el origen impactogénico (Fig. 6) de la Luna posterior a la acreción y diferenciación parcial de nuestro planeta.



Fig. 6: Ilustración mostrando el modelo impactogénico de formación de la Luna a partir del choque con un objeto de grandes dimensiones contra la Tierra primitiva (Fuente: portalastronomico.com)

De cualquier forma, nuestro satélite se enmarca en el denominado sistema de planetas interiores o de tipo terrestre, en los que con posterioridad a la acreción, en sus primeros estadios evolutivos, tuvo lugar la diferenciación por densidades con núcleos metálicos y mantos y cortezas fundamentalmente silicatadas. En el contexto de la planetología comparada, sin entrar en la caracterización del resto de planetas terrestres, la Luna se considera un objeto diferenciado con núcleo, manto y corteza, de tipo monoplaca, con espesores corticales variables estimados entre los 60 y 100 km, con afloramientos

mantélicos muy cercanos a la superficie en las zonas de los maria (mares lunares de lava). Superficialmente, el rasgo lunar más característico es su intensa craterización, algo importante a tener en cuenta que denota la carencia de energía y de actividad geológica (geodinámica) para remodelar su superficie; remodelación que sí se observa en algunas lunas de planetas exteriores (por ej. Europa, Encélado). Esta craterización se observa en las dos caras de nuestro satélite, más desarrollada en una que en otra, mostrando lo que se ha denominado dicotomía lunar (Fig. 7). Además de la craterización, otra peculiaridad son las diferencias entre las zonas claras y oscuras. Los denominados maria o tierras bajas (antiguos mares de lava, fundamentalmente basáltica, generados como consecuencia de enormes impactos) y los terrae o tierras altas, caracterizadas por otro tipo de rocas. Sin pretender ser exhaustivo, más adelante se profundiza en su descripción detallada.

La historia geológica de la Luna se ha subdividido en seis grandes épocas, que empezaron hace casi 4.500 m.a. De manera muy sintética (Martínez Frías, 2020) se puede establecer la siguiente secuencia de eventos: Después de la formación de la corteza lunar y de la solidificación del “océano de magma” varios impactos meteoríticos produjeron grandes cuencas, generando enormes cantidades de brechas y fundidos de impacto “impact melts”. Las cuencas mayores se rellenaron parcialmente con enormes flujos de lava basáltica. Se supone que estos basaltos de los mares se formaron por fusión del manto lunar, un proceso que duró unos cientos de millones años. La actividad volcánica disminuyó con el tiempo y se asume que cesó hace unos 1,3 Ga.

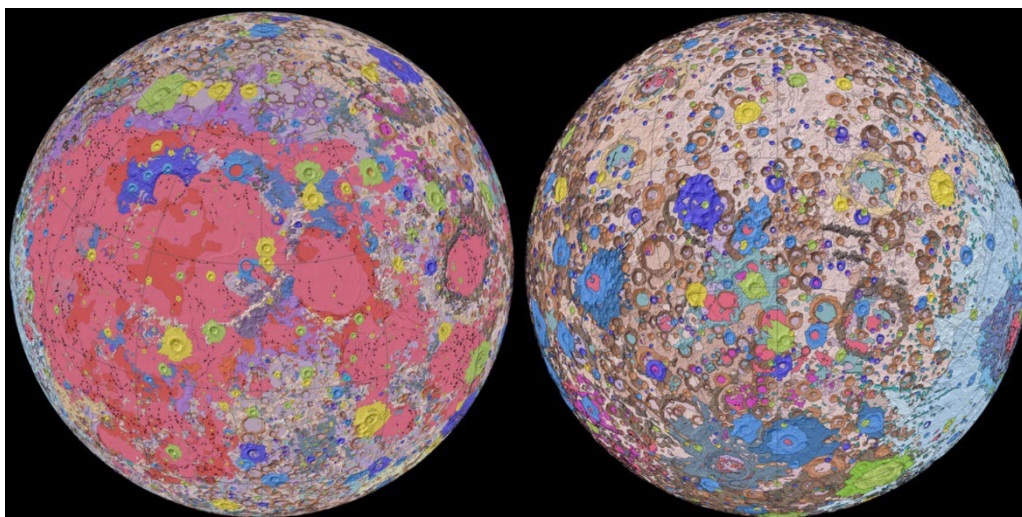


Fig. 7: Cara cercana (izquierda) y oculta (derecha) de la Luna mostrando la dicotomía y las diferencias geomorfológicas, principalmente de craterización de ambas. Es una síntesis de los seis mapas de la era Apolo.

<https://www.usgs.gov/media/images/orthographic-projections-unified-geologic-map-moon>.

Créditos: NASA/GSFC/USGS.

De acuerdo con este esquema evolutivo, esencialmente impactogénico y volcanogénico, las principales características volcánicas lunares son las siguientes:



Existen espectaculares frentes de flujo de lava que se extienden más de 1200 km desde las zonas de emisión (Mare Imbrium), junto con muchas otras unidades menos desarrolladas de flujos compuestos.

Unas estructuras singulares son los denominados Rilles sinuosos cuyo origen se ha asignado a tubos o canales lávicos (Fig. 8).

También se han identificado las denominadas terrazas de lava, los cráteres de halos oscuros (ej. cráter Shorty) y los depósitos piroclásticos.

Generalmente, los flujos lávicos están asociados con zonas de emisión en forma de domo y conos de escorias.

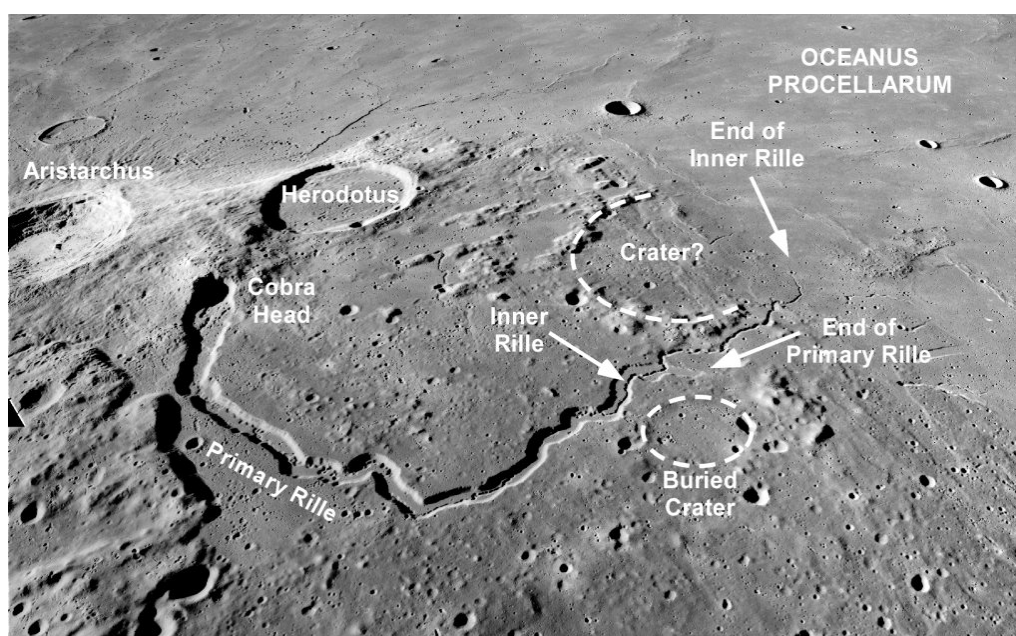


Fig. 8: Rille sinuoso lunar junto con otras estructuras geomorfológicas en la zona de Oceanus Procellarum.  
Imagen Apolo 15 AS15-M-2612.  
Créditos: NASA/JSC/Arizona State University

Asimismo, es importante destacar la existencia de fosas (formados por tectónica extensional y caracterizadas usualmente por dos fallas normales), crestas (generadas por esfuerzos compresivos) y domos lávicos. Los domos forman generalmente conjuntos complejos y son circulares a elípticos, con dimensiones desde unos pocos kilómetros de extensión y varios cientos de metros de altura. Los domos basálticos lunares parecen ser equivalentes de los volcanes en escudo terrestres. Algunos ejemplos son el Domo suroeste de Gambart, el Domo oeste de Kepler o el Domo al oeste de Milichius, entre otros.



Fig. 9: El especialista conservador de muestras Apolo, Ryan Zeigler, mostrando varios ejemplares de especímenes lunares colectados durante las misiones Apolo 15, 16 y 17. Laboratorio lunar del NASA Johnson Space Center. Créditos: NASA

Desde el punto de vista petrológico, cuando se observa la superficie lunar desde nuestro planeta, también pueden diferenciarse los dos tipos de terrenos lunares indicados previamente: los más brillantes denominados “terrae” (zonas elevadas) y los más oscuros 'maria' (zonas deprimidas). Existe un buen conocimiento de las principales tipologías petrológicas lunares gracias a los más de 382 kg de rocas, testigos de sondeos y suelo, que se trajeron a la Tierra durante las misiones del programa Apolo entre 1969 y 1972 (Stansbery, 2023). Todas ellas, se encuentran perfectamente conservadas y su análisis se lleva a cabo bajo condiciones de máxima seguridad para evitar cualquier tipo de contaminación (Fig.9).

A ello hay que unir el conocimiento adicional sobre las rocas de la superficie de nuestro satélite, obtenido a través de otras misiones robóticas posteriores (Martínez Frías, 1998; Lunar Hernández, 2006). Gracias a todas ellas sabemos que los principales tipos de rocas lunares son: 1) rocas gabroides de la serie Anortosita-Norita-Troctolita (ANT) y basaltos ricos en alúmina de las zonas elevadas (Terraes). Edad: 4.6-4.0 Ga; 2) rocas basálticas ricas en potasio, elementos de las tierras raras y fósforo (tipo KREEP). Edad: 4.0 y 3.8 Ga; 3) rocas basálticas ricas en hierro y titanio (tipo FeTi) que extruyeron como coladas entre los 3.8 y 3.2 Ga y 4) numerosas variedades de brechas de impacto y depósitos piroclásticos dispersos en el regolito lunar (Fig.10).

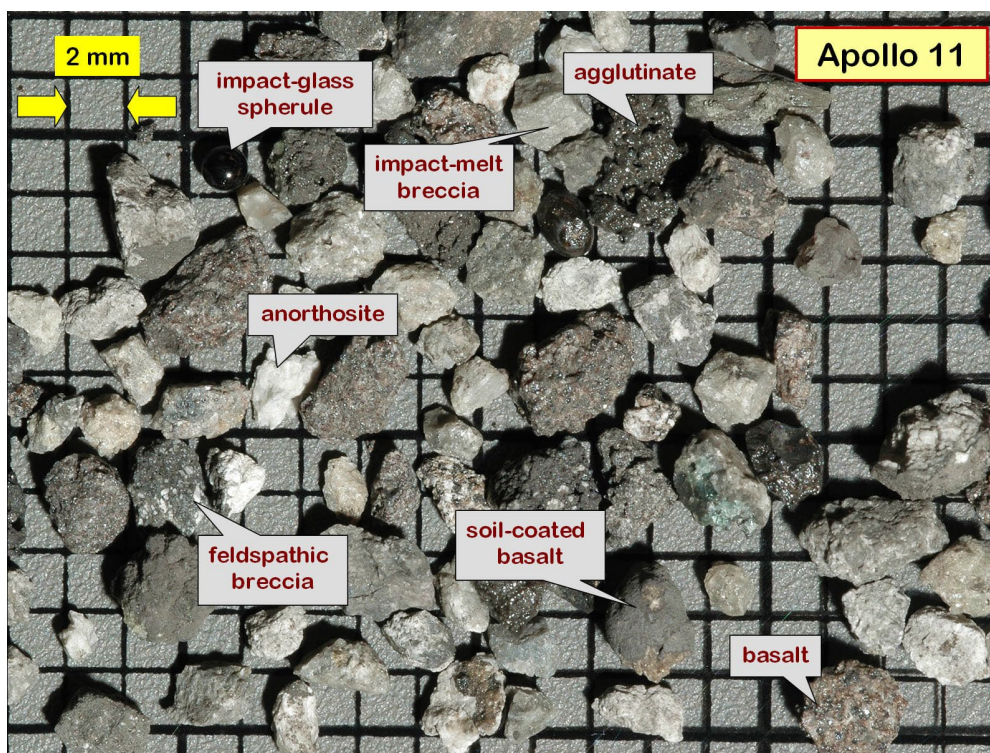


Fig. 10: Representación de distintos tipos de ejemplares de material lunar recogido en la misión Apolo 11. Básicamente son pequeños fragmentos (todos ellos entre e y 4 mm). Dominan los basaltos de los mareas. También se aprecian dos muestras de esférulas de vidrio de impacto. Foto: NASA

Como se ha indicado previamente, la composición de las rocas de los mareas es fundamentalmente basáltica y los basaltos presentan las siguientes características: 1) son de naturaleza principalmente vesicular; 2) muestran un alto contenido en Fe y Mg; 3) presentan un contenido bimodal en Ti; 4) están empobrecidos en elementos alcalinos con respecto a los basaltos terrestres; 5) muestran un bajo contenido en SiO<sub>2</sub>; 6) su mineralogía global es similar a la de los basaltos terrestres, aunque químicamente no tienen agua y 7) tienen una edad de entre 3.9 - 3.1 Ga. Al microscopio petrográfico y mediante otras técnicas, se confirma que olivino, plagioclasa y piroxenos son sus minerales principales.

Más específicamente, se puede indicar que la mineralogía lunar es relativamente simple, aunque limitada por el conocimiento aún parcial de nuestro satélite (Lewis, 1993, Martínez-Frías et al. 1997). Las fases mayoritarias principales son silicatos (principalmente plagioclasa, piroxenos (orto y clinopiroxenos) y olivino), y óxidos (principalmente ilmenita, espinelas, rutilo y badeleyita). El hallazgo de ilmenita y su riqueza en los basaltos de los mareas es muy relevante en el contexto del descubrimiento de los suelos anaranjados lunares (Fig. 11), no solo por lo que supone desde el punto de vista científico, sino por su futura utilización como recurso de habitabilidad (extracción de oxígeno a partir de los óxidos lunares: un tema importante que estamos actualmente investigando en Lanzarote) (Martínez Frías, 2020, Alberquilla et al., 2022).



Fig. 11: Suelos anaranjados lunares ricos en ilmenita, esferas vítreas y otros minerales. Zona del cráter Shorty, misión Apolo 17. Créditos: NASA

Es importante destacar también la existencia de nuevos silicatos lunares, tales como la piroxferroita  $(\text{Fe,Mn})\text{SiO}_3$  y la tranquillityita  $\text{Fe}_8(\text{Y,Zr})_2\text{Ti}_3\text{Si}_3\text{O}_2$ , que debe su nombre al lugar de alunizaje de la misión “Apolo 11”, el Mar de la Tranquilidad. Con respecto a los óxidos, también es relevante subrayar el hallazgo de nuevos óxidos lunares como la armalcolita  $(\text{MgFeTi}_2\text{O}_5)$ , que recibe su nombre en honor de los tres primeros astronautas Neil ARMstrong, Buzz ALdrin y Michael COLLins (Lunar y Martinez-Frias, 2004; Lunar Hernández, 2006). La armalcolita fue aprobada para su catalogación como un nuevo mineral por la International Mineralogical Association en 1970, un año después del primer alunizaje.

Además de los silicatos y óxidos, existen otras fases minoritarias lunares, tales como los sulfuros (principalmente calcopirita, cubanita, pentlandita, mackinawita), fosfatos (apatito y whitlockita) y metales nativos (hierro nativo con trazas de Ni y Co y aluminio nativo). Finalmente, otros minerales lunares, reconocidos gracias a los meteoritos son la schreibersita, cohenita, niningerita, lawrencita y hapkeita. Este marco litológico global es crucial para comprender la composición del regolito, caracterizado por la presencia de oxígeno, silicio, hierro, titanio, calcio, aluminio, magnesio y otros elementos.

En este tema –y considerando la circunstancia académica a la que se asocia el presente artículo –es obligado citar la publicación correspondiente al Discurso de Ingreso, como Académica de Número, de la Prof. Lunar “Creciendo hacia el espacio próximo a la Tierra. De la mineralogía y recursos terrestres a la exploración planetaria”. Esta obra constituye una

síntesis científica fundamental (Lunar, 2006), donde se describen pormenorizadamente todos estos materiales, contextualizándolos en el marco de la exploración e investigación.

La geología planetaria ha permitido dar un paso de gigante en el estudio de las rocas lunares y también de Marte y otros cuerpos planetarios y, como se ha indicado previamente, el único científico que ha estado hasta el momento en la Luna, ha sido un geólogo, el astrogeólogo o geólogo planetario Harrison Schmitt (Martínez Frías, 2009), descubridor de los suelos anaranjados lunares ricos en ilmenita (Fig. 11) y uno de los principales promotores (por no decir el principal) del reconocimiento de la importancia geológica de los recursos del espacio, en su caso, directamente los de la Luna.

El conocimiento de la composición y características de las rocas lunares enlaza directamente con su utilización como recursos in-situ (ISRU) de habitabilidad por los futuros astronautas en misiones permanentes y semipermanentes (Martínez Frías, 2020). De acuerdo con Fernández-Abellán (2005) cualquier desarrollo de estas utilidades conlleva: a) desarrollar sistemas de alta velocidad y con gran resolución óptica que permitan una caracterización más eficiente de los posibles emplazamientos mineros en la Luna; b) investigar el efecto de las condiciones de la Luna en los equipos de exploración y minería terrestres, para poder desarrollar unos prototipos lunares más adecuados y optimizados, y c) desarrollar sistemas robotizados y automatizados para trabajar en la Luna y otros planetas del sistema solar interior.

Como recurso geológico, también hay que considerar desde el punto de vista de la habitabilidad que el hielo es un mineral reconocido por la IMA (IMA-Rruff, 2005).

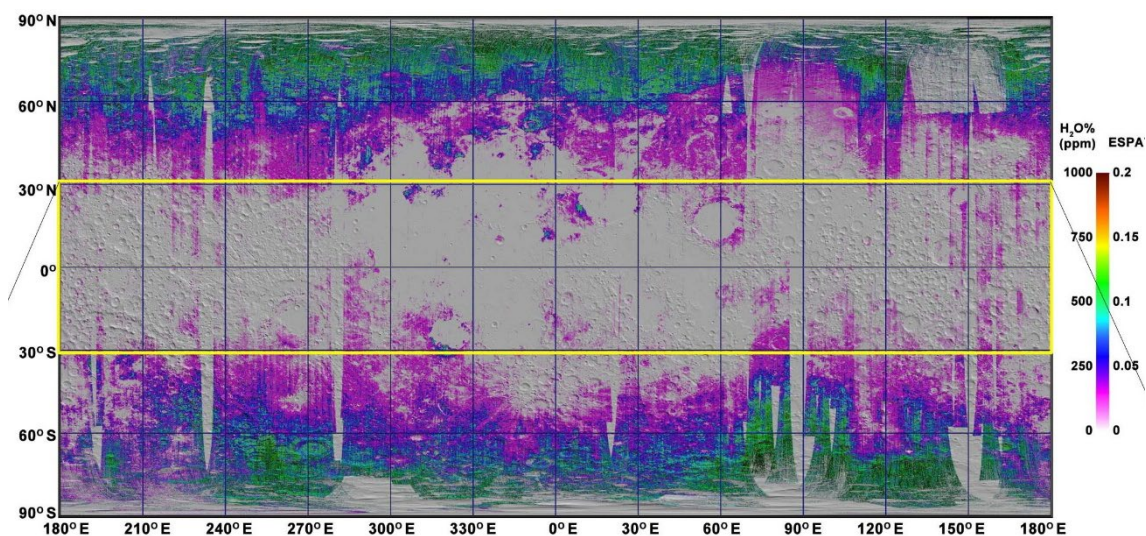


Fig. 12: Mapa global de distribución de agua en la Luna. Según datos del Moon Mineralogy Mapper, la abundancia en agua superficial puede variar en  $\sim 200$  ppm en un día lunar y el metro superior de regolito puede contener un total de  $\sim 1.2 \times 10^{14}$  g de agua como promedio a escala global.

Es evidente que, para futuras misiones, el recurso natural más importante en un satélite como la Luna es el oxígeno (Lewis, 1993), por lo que el conocimiento de la distribución de agua (hielo) en el regolito lunar y otras rocas y estructuras (cráteres) de nuestro satélite es fundamental (Fig. 12).

Más en general, en relación con los volátiles lunares, se ha propuesto que podrían tener diferentes aplicaciones importantes en relación con la habitabilidad y las actividades a desarrollar: 1) el hidrógeno: agua, combustible para cohetes, hidrocarburos; 2) el helio-3, depositado en el regolito por el viento solar: energía de fusión, propulsión; 3) el agua: soporte vital, oxígeno, crecimiento de plantas y alimentos; 4) el nitrógeno: alimentación, control de la atmósfera, reactivos; 5) CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>: alimentación, hidrocarburos, combustibles y algunos otros como el flúor, cloro y azufre (este último acaba de ser confirmado por la sonda India).

### **3.- EL REGRESO A LA LUNA: EL PROGRAMA ARTEMISA**

---

La avalancha de misiones a nuestro satélite (Marín, 2023) de numerosos países, con diferencias sociales indiscutibles, es una demostración y un indicador tecnocultural de que el espacio --y la Luna en particular— se ha abierto al conjunto de la humanidad. De todas ellas, el programa Artemisa --como continuación en el tiempo, con un salto importante de medio siglo, de las misiones Apolo--, es probablemente la más ambiciosa y con visos de éxito en cuanto a sistematización de recursos e iniciativas con solidez y experiencia.

El pistoletazo oficial de salida del programa Artemisa lo dio Jim Bridenstine, antiguo administrador de la NASA, en un tuit el pasado 14 de Mayo de 2019. Desde entonces, a pesar de todos los problemas globales, incluyendo la pandemia y muchos otros, podemos decir que todo está ya en marcha. Básicamente, consiste en una Lanzadera (SLS: Space Launch System) capaz de propulsar hasta 45 toneladas, la nave Orión que conectará la Tierra con la estación espacial lunar y una estación pequeña “Gateway” en órbita lunar, que servirá de punto de acceso para las misiones lunares y como lugar de residencia para estancias cortas de astronautas.

El programa, cuyo objetivo no es solo la Luna, sino también Marte, establece una serie de fases de desarrollo con unas fechas que, casi con toda seguridad, no se cumplirán exactamente pues son sobre todo referencias. Así el 29 de agosto de 2022 sería el vuelo de prueba de Artemis 1 (se retrasó al 16 de noviembre); en 2024, tendríamos Artemis 2, ya conocemos la primera tripulación y se realizaría la órbita lunar sin aterrizaje. La primera parte está cumplida, pero no la segunda (aunque aún quedan unos meses para que termine 2024); para finales de 2024 o primer cuatrimestre de 2025 se lanzarían los primeros

elementos del “Gateway”; la estación no será utilizada en las fases/misiones Artemis 2 y 3. Y en 2025, seguramente a finales o después, tendríamos Artemis 3, con aterrizaje humano en la Luna (2 astronautas), siendo el lugar elegido el polo sur. Artemis 4 (no antes de 2028) se desarrollaría ya intensamente en la superficie lunar.

Cuatro astronautas abordarán un Starship HLS (Sistema de Aterrizaje Humano) atracado en la estación y descenderán a la superficie lunar para una misión de varios días. Hasta el momento la fase Artemis 1 ha sido exitosa y el resto se encuentran en planificación (NASA, 2023a). Las imágenes que hemos podido ver de la nave Orión son realmente asombrosas (Fig. 13).



Fig. 13: La nave Orión utiliza su cámara exterior para tomar este selfi con la Tierra y la Luna al fondo. Créditos: NASA

Y si todo sigue el plan previsto, de aquí a 2028 vamos a vivir una vorágine relacionada con el programa, al que se añaden las iniciativas en desarrollo de otros países, principalmente China, India y Rusia. En relación con el próximo paso, Artemisa 2, como se ha indicado anteriormente, ya conocemos la tripulación que está formada por los astronautas de la NASA: Christina Koch, Victor Glover, Reid Wiseman y el astronauta de la Agencia Espacial Canadiense, Jeremy Hansen (Fig. 14).



Fig. 14: Los cuatro astronautas que viajarán alrededor de la Luna (Artemis 2). Christina Koch, Victor Glover, Reid Wiseman, Jeremy Hansen. Créditos: NASA

Uno de los proyectos más interesantes, vanguardistas e innovadores a largo plazo, es el denominado “Moon Village” (Fig. 15). No es un proyecto oficial de la ESA como tal, es más bien un concepto; es como la Agencia Espacial Europea imagina el futuro de la exploración lunar y la colonización del espacio. Supone el primer paso de Europa hacia un proyecto de colaboración global para establecer una estación permanente en la Luna donde puedan desarrollarse diversas actividades humanas.



Fig.15: Proyecto “Moon Village”. Sin ser un proyecto oficial de la ESA, se trata básicamente de un concepto colaborativo que pretende el desarrollo de una base en nuestro satélite, desde distintas perspectivas y sectores y con diferentes objetivos.



En palabras del director general de la ESA Johann-Dietrich Woerner:

“...Serán los estadounidenses, serán los rusos, serán los chinos, serán los indios, los japoneses, e incluso más países. [...] Realmente tendremos un equipo de exploración global en la Luna. [...] Alojará diferentes actividades, desde ciencia pura, pasando por los negocios, hasta incluso turismo o minería. [...] Tendrá múltiples usos, para múltiples usuarios, pero en un mismo lugar...”.

Una alternativa, en mi opinión parcial y complementaria, a las actuales propuestas de diseños modulares de habitabilidad lunar, podrían ser también los tubos de lava. Se han descubierto posibles tubos de lava en la Luna (Fig. 16) (Chappaz et al. 2017; Sauro et al. 2020; Horvath et al. 2022;). Desde esta y otras perspectivas, estamos estudiando análogos potenciales en Lanzarote, pues podrían servir de refugio para los futuros astronautas, bien total o parcial en sistemas de habitabilidad mixtos junto con los módulos inflables recubiertos de regolito, que podrían acoplarse en las entradas de los tubos.

Como se indica en Martínez Frías (2022), resulta curioso pensar que, si nuestros antepasados utilizaron en la Tierra las cuevas para refugiarse de las condiciones hostiles del entorno, en el futuro, los astronautas puedan considerarse también, en cierto modo, cavernícolas lunares (o marcianos), puesto que estas estructuras volcánicas se han descubierto también en la Luna y en Marte.

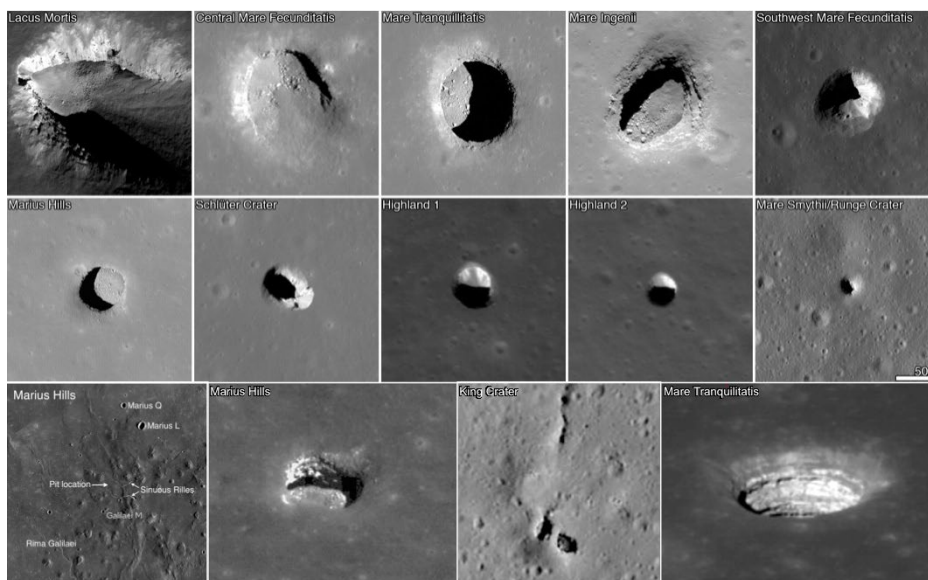


Fig. 16: La NASA y otras agencias han venido investigando geomorfologías peculiares en la Luna que podrían representar cavidades de entrada a cuevas de tipo tubos de lava o cráteres de colapso con cierta continuidad subsuperficial. Zona de Marius Hills.

De momento, todo indica que el polo sur es la zona que, por diversas razones, agua, recursos, iluminación, etc. Ha sido seleccionada para el establecimiento de los primeros emplazamientos lunares (Fig.17). Las condiciones de trabajo no serán nada fáciles.

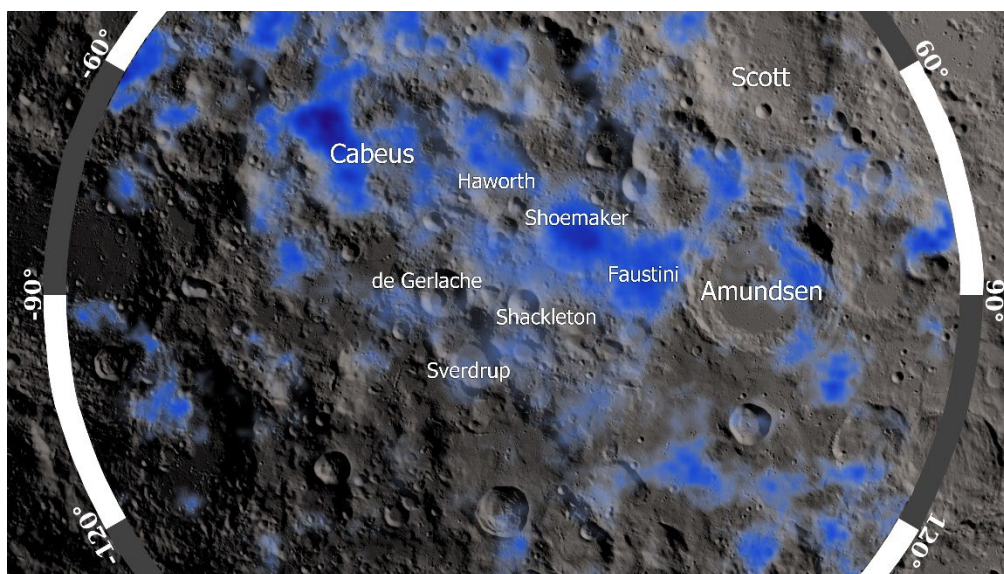


Fig.17: Zonas del polo sur de la Luna identificadas como potencialmente ricas en agua. LRO a través del detector de neutrones LEND. Créditos: NASA (<https://svs.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/details.cgi?aid=4057>)

Cualquier actividad que se vaya a desarrollar, tendrá que enfrentarse a las condiciones medioambientales específicas de nuestro satélite: gravedad (6 veces inferior a la terrestre), radiación (protones de las emisiones solares e iones pesados procedentes de la radiación cósmica galáctica), vacío (con una atmósfera extremadamente tenue), ciclo sinódico (29,53 días, aproximadamente 15 de luz y otros 15 de oscuridad), temperatura (entre - 160 y 110°C) y polvo (diminutas partículas regolíticas (< 70 µm) que en el ambiente lunar son extremadamente abrasivas y electrostáticamente muy “pegajosas”).

Todo ello se está teniendo ya en consideración para el futuro despliegue de los rovers VIPERS (NASA, 2023b), acrónimo de Rover de Exploración Polar de Investigación de Volátiles (Fig. 18). La fecha prevista de llegada de VIPER a la Luna es el 10 de noviembre de 2024, una fecha elegida para optimizar la cantidad de energía solar que puede recolectar el rover y que coincide con el Programa Artemis de la NASA, el conjunto de misiones para que el hombre regrese a la Luna”.

Tal y como indica la propia NASA: “A medida que busca hielo en la superficie, los hallazgos de VIPER informarán los futuros sitios de aterrizaje bajo Artemis al ayudar a determinar los lugares donde se puede recolectar agua y otros recursos para respaldar una presencia a largo plazo en la Luna” (NASA, 2023b).

VIPER planea llevar a la Luna cuatro instrumentos, incluyendo un martillo perforador, el Espectrómetro de Masas de Observación de Operaciones Lunares, el Sistema Espectrómetro de Infrarrojos Cercanos Volátiles y el Sistema Espectrómetro de Neutrones. Todo ello ayudará a la cartografía de los recursos lunares, a la exploración científica e identificación de nuevas regiones y a impulsar el establecimiento de las misiones tripuladas.



Fig.18: Imágenes artística (izquierda) y real, prototipo (derecha) del rover VIPER. Créditos: NASA

Lo que es indiscutible es que desde el punto de vista de la geología planetaria, se ha abierto todo un nuevo campo de aplicaciones geológicas hacia el espacio de estos estudios, que trascienden los objetivos considerados clásicos de la mineralogía, metalogenia y geología terrestre.

Como se ha indicado previamente, la futura habitabilidad requiere conocer y saber cómo utilizar estos recursos (ISRU: in situ resource utilization), que son recursos de habitabilidad. Desde aspectos básicos como la utilización del regolito volcánico lunar como protección frente a la radiación, la construcción de caminos, carreteras, pistas de despegue y aterrizaje o a los más sofisticados (sustrato para el crecimiento de plantas y alimentos, extracción de elementos (oxígeno) y minerales de interés, etc.). Artemisa cuenta con todos estos aspectos para su buen desarrollo y desde España estamos también colaborando en estas temáticas desde distintas perspectivas.

### 3.- INVESTIGACIONES SOBRE GEOLOGÍA PLANETARIA DESDE ESPAÑA EN EL MARCO DE LA FUTURA EXPLORACIÓN Y HABITABILIDAD LUNAR

---

Específicamente, en relación con la Luna, sus recursos y habitabilidad, en España se desarrollaron varias actividades que representaban modestas, pero importantes, incursiones científicas y de divulgación genéricas sobre el tema. Básicamente, se exponía esta posibilidad futura como algo real, y que España no debería quedarse fuera de su desarrollo. Sin ánimo de ser exhaustivo, las primeras iniciativas sobre geología lunar en nuestro país se remontan a 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 Prof. Alfredo San Miguel Arribas, en el que participó el Prof. Joan Oró (UB, 1970) y que tuvo otras ediciones en 1983 y 1986.

Personalmente, una de mis primeras actividades fue hace ahora 40 años, en 1983, el “Curso de Introducción a la Geología Planetaria”. Se desarrolló en la Facultad de Ciencias Geológicas de la UCM, en colaboración con el Instituto de Ciencias de la Educación. A través del Prof. Francisco Anguita, tuve la oportunidad de actuar como coordinador y profesor de este curso. Como anécdota, considero importante destacar que algunas de las diapositivas utilizadas, me fueron amablemente cedidas por el Prof. Alfredo San Miguel.

Con la llegada a España de la Sociedad Planetaria, a mediados de los 80, cofundada por Carl Sagan, a la que en principio me incorporé como miembro y posteriormente como coordinador en España durante casi 15 años, se dispuso de un foro más inequívoco para abordar algunas de estas temáticas geológicas y establecer contactos internacionales en un contexto específico para su desarrollo.

Posteriormente, a través del Foro MERGE (Meteoritos y Recursos Geológicos del Espacio), que establecí en 1988, en principio como una lista de distribución de RedIris, y posteriormente como parte de la Comunidad Virtual “TIERRA”, se canalizaron interesantes iniciativas y debates que abrieron nuevas líneas de colaboración acerca de esta temática. TIERRA se transformó posteriormente en la actual REDESPA (Red Española de Planetología y Astrobiología) (Martínez Frías y De la Torre, 2014). En el marco de la Comunidad Virtual Tierra y del Foro MERGE, ya desde los 80’ se realizaron numerosas actividades en forma de impartición de conferencias y publicaciones, con artículos sobre meteoritos, impactos y geología planetaria, que consideraban la importancia de los recursos del espacio en general y de la Luna en particular (Martínez Frías et al. 1989 a,b; Martínez Frías et al. 1997, 1998; Martínez Frías, 1999).

Creo relevante destacar dos iniciativas personales sobre el desarrollo de la geología planetaria en España, una científico-institucional y otra científico-museística. La primera de

ellas fue la creación del Centro de Astrobiología, CAB (CSIC-INTA, asociado al NASA Astrobiology Institute), del que fui miembro de su convenio fundacional, ya que estableció el primer Laboratorio de Geología Planetaria en España, del que fui director. El segundo aspecto, ya como miembro del CAB, fue la organización del I Congreso Ibérico de Meteoritos y Geología Planetaria (MERGE, 2002), del que fui presidente, que se celebró en el Museo de las Ciencias de Castilla-La Mancha, en 2002. Valga esta breve introducción para enmarcar y contextualizar el desarrollo de mis investigaciones lunares y planetarias durante los siguientes 21 años, hasta el momento actual.

Específicamente en relación con la Luna, mis primeros estudios acerca del establecimiento de una base en nuestro satélite, preludio de los actuales Moon Village y el programa Artemisa, se remontan 20 años atrás, cuando, en colaboración con el Prof. Pedro Vilarroig, propusimos desarrollar un Trabajo Fin de Ingeniería en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía, Madrid. El trabajo fue desarrollado bajo nuestra supervisión por José Luis Fernández Abellán y presentado en 2005 con el título: “Estudio del establecimiento de una base semipermanente en la Luna: condiciones y viabilidad de la explotación de sus recursos naturales”. En él se sugería: a) el emplazamiento seleccionado: el polo sur; b) se realizaba el levantamiento topográfico de la zona; c) se proponían los tipos de habitáculos de residencia y laboratorios y 4) el prototipo de mina lunar. Este estudio, que recibió la calificación de Matrícula de Honor, tiene su continuidad actual, con la tesis doctoral sobre arquitectura lunar de Yasmina Eid Macheh-Sánchez, que se desarrolla en la Universidad Politécnica de Valencia y que cuenta con las aportaciones extraordinarias de 28 astronautas (Eid-Macheh-Sánchez et al. 2022, 2023a). La contribución más reciente sobre este tema se presentó este año al Congreso Europeo de Astrobiología, EANA (Eid-Macheh- Sánchez et al. 2023b).

Otros aspectos científicos relacionados con la futura habitabilidad lunar en los que venimos investigando en España, desde la geología planetaria y la astrobiología, se centran en la fabricación de simulantes regolíticos lunares con los que poder investigar y realizar determinados análisis y ensayos, de la agricultura espacial, la geotecnia, la arquitectura e ingeniería espaciales, a procesos de extracción de oxígeno y otros elementos cruciales para la habitabilidad.

Los primeros ensayos los iniciamos en 2009, con muestras procedentes de basaltos de varias islas del archipiélago de Canarias y se publicaron en 2010 (Rodríguez Losada et al. 2010) y recientemente hemos profundizado en el tema, enfocando nuestros estudios en el Geoparque Mundial UNESCO de Lanzarote y Archipiélago Chinijo, identificando la zona de Tao como extremadamente interesante, desde el punto de vista mineralógico y geoquímico, para la obtención de este tipo de simulantes regolíticos. El estudio, a partir del cual se

obtuvo el primer simulante regolítico lunar español (Fig.19), se publicó en Nature/Scientific Reports (Alberquilla et al. 2022).



Fig. 19: Simulante regolítico basáltico lunar (dos fracciones) que se asemeja a los materiales de la zona de Fra Mauro (Apolo 14) (Alberquilla et al. 2022; Alberquilla y Martínez Frías, 2022)

Este mismo material basáltico “en bruto” (aunque previamente caracterizado con diferentes técnicas mineralógicas, geoquímicas, espectroscópicas y petrofísicas) fue el seleccionado para un experimento de habitabilidad lunar en colaboración con la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Madrid y otras instituciones. Por primera vez, instalamos un experimento utilizando basalto perfectamente caracterizado de la zona de Tao (Lanzarote) en un picosatélite que fue lanzado desde Cabo Cañaveral en un cohete Falcon 9 de Space X. Despegó el 13 de enero de 2022 y estará orbitando y enviando información durante tres años en los que estamos observando su comportamiento bajo condiciones de espacio.

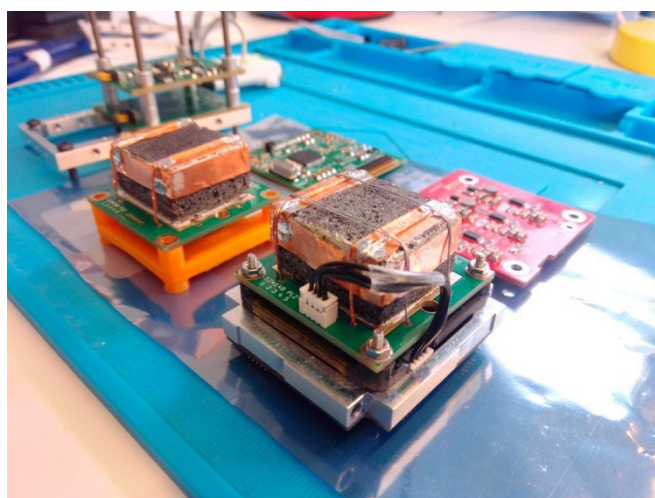


Fig.20: Experimento con material basáltico previamente caracterizado, que se ha enviado al espacio el 13 de enero de 2022. Sus análisis ayudarán a la habitabilidad lunar ya que materiales similares son los que se utilizarán para la construcción de infraestructuras en nuestro satélite.

Se espera que los resultados obtenidos ayuden a comprender mejor el uso del basalto de los maria lunares como ISRU en las futuras misiones tripuladas, entre ellas las del programa Artemisa.

Lanzarote está siendo un fabuloso laboratorio natural para la Luna y para Marte (Martínez-Frías, 2016; Martínez-Frías et al. 2017), cuyas aplicaciones e importancia van más allá de la simple experimentación y ensayos, validación de modelos científicos, prueba de prototipos y espectrómetros portátiles, etc. La isla se está utilizando, desde hace ya seis años, como una de las zonas para la instrucción de astronautas (PANGAEA, 2016, Sauro et al, 2023). Esta actividad se originó en paralelo al convenio de colaboración entre el IGEO y el Cabildo Insular de Lanzarote para la realización de actividades en la isla como análogo terrestre. El Curso de instrucción, en el que participo como instructor y en el que diseñé las rutas educativas de campo en la isla, se denomina ESA-PANGAEA (PlanetaryANalogue Geological and Astrobiological Exercise for Astronauts). Por Lanzarote ya han pasado diversos astronautas de la ESA, NASA, Roscosmos y JAXA.

La última edición tuvo lugar en septiembre de 2023 y por ella pasaron tres astronautas: ESA: Thomas Pesquet, NASA: Jessica Witnner y JAXA: Takuya Onishi. Uno de los atractivos científicos de Lanzarote son los espectaculares tubos de lava: uno de ellos el tubo del volcán de la Corona constituye una de las rutas de instrucción.



Fig.21: En el marco del Curso ESA-PANGAEA se llevan a cabo diversas rutas de instrucción de astronautas. Una de ellas es en un tubo de lava. Esta imagen refleja las actividades de astronautas e instructores en las instalaciones del Laboratorio de Geociencias de Lanzarote del IGEO, unos en la Cueva de los Verdes y otros en el módulo subterráneo del Parque Nacional de Timanfaya. Créditos: ESA-PANGAEA.

El hecho de que en el Instituto de Geociencias, contemos con un Laboratorio con dos módulos subterráneos, en el Parque Nacional de Timanfaya y la Cueva de los Verdes (Fig. 21) es un valor añadido a este tipo de estudios donde ciencia, exploración y educación al máximo nivel, se combinan para la futura investigación en nuestro satélite.

## 5.- CONSIDERACIONES FINALES

---

Como se indicaba al principio, la humanidad se encuentra en un momento de cambio a escala planetaria. Por primera vez, el hito de ser una generación interplanetaria puede conseguirse en las próximas dos décadas y Marte será el objetivo. Pero, para ello, aunque se desarrollen iniciativas específicas sobre el planeta rojo, serán cruciales los programas, proyectos, ensayos y experimentos multidisciplinares en la Luna. Una plataforma intermedia que nos proyectará a Marte y más lejos. Esta es una de las claves del programa Artemisa, que no está centrado solo en el retorno a nuestro satélite.

Desde la ingeniería aeroespacial, la geología planetaria y la astrobiología se han dado ya pasos de gigante para el establecimiento de una futura misión semipermanente en la Luna, probablemente localizada en el polo sur. Sin embargo, la humanidad se está abriendo al espacio y este a la humanidad, como nunca se ha visto. El espacio ya es objeto prioritario de agencias espaciales de todo el mundo y no es solo cuestión de dos o tres áreas de conocimiento. Será un sitio donde desarrollaremos nuestras actividades, agricultura espacial, medicina espacial, derecho espacial, arquitectura espacial, periodismo espacial, etc. Algo a tener en cuenta en foros tan prestigiosos y relevantes como la Real Academia de Doctores de España, que puede jugar un papel sobresaliente en este proceso que se encuentra en desarrollo. Y el retorno a la Luna es solo el primer paso.

## 6.- AGRADECIMIENTOS

---

Este artículo relativo a mi Discurso de Ingreso como Académico Correspondiente de la Sección de Ciencias Experimentales de la Real Academia de Doctores de España, integra investigaciones que cubren un largo período de tiempo y que no podrían haberse llevado a cabo sin la colaboración de numerosos colegas. Gracias a todos ellos por sus contribuciones y su dedicación. Asimismo, agradezco su aceptación, como miembro de esta prestigiosa institución, al conjunto de los Académicos de la RADE. Específicamente, agradezco al EXCMO. Sr. Dr. D. Rafael Bachiller García su extraordinaria presentación y a la EXCMA. Sra. D<sup>a</sup> Rosario Lunar Hernández su continuo respaldo científico e institucional. Finalmente, gracias a mi familia, Joaqui, Enrique y Beatriz por su comprensión, cariño y apoyo.



## BIBLIOGRAFÍA

---

- ALBERQUILLA, F., MARTÍNEZ-FRÍAS, J., GARCIA-BAONZA, V. (2022) LZS-1, Lanzarote (Canary Island, Spain) lunar (Apollo 14) basaltic soil simulant. *Nature/Sci Rep* 12, 16470 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-20960-8>
- ALBERQUILLA, F. Y MARTÍNEZ FRÍAS, J. (2022) La Luna en un bote. *The Conversation* <https://theconversation.com/la-luna-en-un-bote-192526>
- CANUP, R. M. (2012) Forming a Moon with an Earth-like composition via a giant impact. *Science* 338, 1052–1055.
- CHAPPAZ, L., SOOD, R., MELOSH, H. J., HOWELL, K. C., BLAIR, D. M., MILBURY, C., & ZUBER, M. T. (2017). Evidence of large empty lava tubes on the Moon using GRAIL gravity. *Geophysical Research Letters*, 44, 105–112. <https://doi.org/10.1002/2016GL071588>
- EID-MACHEH-SÁNCHEZ, Y., MATÍNEZ-FRÍAS, J., GARCÍA-VALVERDE, J., BLANCA-GIMÉNEZ, V. (2022). *Geología y Arquitectura Planetaria: análisis bibliográfico y situación actual*. *Tierra y Tecnología*, 59. <https://doi.org/10.21028/yes.2022.02.23>
- EID-MACHEH-SÁNCHEZ, Y., GARCÍA-VALVERDE, J. ., MARTÍNEZ-FRÍAS, J. ., & BLANCA-GIMÉNEZ, V. (2023a). Proyecto FOCARIS, habitar la Luna. *Informes De La Construcción*, 75(569), e487. <https://doi.org/10.3989/ic.93103>
- EID-MACHEH-SÁNCHEZ, Y., GARCÍA-VALVERDE, J. Y MARTÍNEZ-FRÍAS, J. (2023b) Architectural contribution to Planetary Habitability. EANA Conference, Madrid, 19-22 September 2023. P2A.06.
- FERNÁNDEZ ABELLÁN, J.L. (2005) Estudio del establecimiento de una base semipermanente en la Luna: condiciones y viabilidad de la explotación de sus recursos naturales. Proyecto Fin de Carrera (Dirección: J. Martínez Frías y Pedro Vilarroig). Departamento de Física Aplicada a los recursos Naturales. ETSIMM. 480 p.
- GRONSTAL, A., COCKELL, C., PERINO, M.A. BITTNER, T., CLACEY, E., CLARK, O., INGOLD, O., ALVES DE OLIVEIRA, C. y WATHIONG, S. (2007) Lunar Astrobiology: A Review and Suggested Laboratory Equipment. *ASTROBIOLOGY* Volume 7, Number 5: 767-782
- HORVATH, T., HAYNE, P.O. Y PAIGE, D.A. (2022) Thermal and Illumination Environments of Lunar Pits and Caves: Models and Observations From the Diviner Lunar Radiometer Experiment. *Geophysical Research letters*, Vol. 49, Issue14, e2022GL099710
- HOSONO, N., KARATO, SI., MAKINO, J. (2019) Terrestrial magma ocean origin of the Moon. *Nat. Geosci.* 12, 418–423 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0354-2>
- IMA/RRUFFU (2005) Ice. <https://rruff.info/doclib/hom/ice.pdf>

- JINZHU JI, DIJUN GUO H, JIANZHONG LIU, SHENGBO CHEN, ZONGCHENG LING, XIAOZHONG DING, KUNYING HAN, JIANPING CHEN, WEIMING CHENG, KAI ZHU, JINGWEN LIU, JUNTAO WANG, JIAN CHEN, ZIYUAN OUYANG (2022) he 1:2,500,000-scale geologicmap of the global moon, ScienceBulletin(2022), doi: <https://doi.org/10.1016/j.scib.2022.05.021>
- KEGERREIS, J. A., RUIZ-BONILLA, S., EKE, V. R., MASSEY R. J., SANDNES, T. D. AND TEODORO L. F. A. (2022) Immediate Origin of the Moon as a Post-impact Satellite. The Astrophysical Journal Letters, 937:L40
- LEWIS, J.S. (1993) Resources of Near-Earth Space, (University of Arizona Space Science Series), USA. 977 p
- LI, S. AND MILLIKEN, R.E. (2017) Water on the surface of the Moon as seen by the Moon Mineralogy Mapper: Distribution, abundance, and origins. Sci. Adv. 2017;3: e1701471
- LUNAR, R. Y MARTÍNEZ-FRÍAS, J. (2004) La Armalcolita. Historia Natural 3: 64-66.
- LUNAR HERNÁNDEZ, R. (2006) Creciendo hacia el espacio próximo a La Tierra: De la mineralogía y recursos terrestres a la exploración planetaria. Real Academia de Doctores de España, ed. Madrid: Real Academia de Doctores de España, 2006, 112 p.
- MARÍN, D. (2023) La avalancha de misiones a la Luna del programa CLPS estadounidense. Eureka. <https://danielmarin.naukas.com/2023/08/30/la-avalancha-de-misiones-a-la-luna-del-programa-clps-estadounidense/>
- MARTÍNEZ-FRÍAS, J., GARCIA GUINEA, J. & BENITO, R. (1989a) "Los Meteoritos. La Colección del Museo Nacional de Ciencias Naturales de Madrid" Mundo Científico, 9, 93: 742-750.
- MARTÍNEZ-FRÍAS, J., RODRIGUEZ, J.A., GARCIA GUINEA, J. & BENITO, R. (1989b) "Mineralogía y texturas del meteorito de Nulles. Colección del MNCN (Madrid)" Geogaceta, 6: 5-7.
- MARTÍNEZ-FRÍAS, J., LÓPEZ-VERA, F. & GARCÍA-GUINEA, J. (1997) "La búsqueda de agua y recursos minerales y energéticos en la Luna". Fronteras de la Ciencia y la Tecnología, CSIC, 14, 61-64.
- MARTÍNEZ-FRÍAS, J., GARCÍA-GUINEA, J. & LÓPEZ-VERA, F. (1998). Materias primas para la colonización lunar. El País/Futuro, 35-36.
- MARTÍNEZ-FRÍAS, J. (1999) El regreso inevitable a la Luna. El Mundo/Ciencia, 20 de Julio de 1999.
- MARTÍNEZ-FRÍAS, J. (2009). El Geólogo Planetario o Astrogeólogo. En: Barrera, J.L. (Ed) La profesión de Geólogo. ICOG, 201-218.

- MARTÍNEZ-FRÍAS, J. & 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. (2016) Lanzarote planetary analogue: a geological museum and a natural laboratory for Mars. ESA blog.  
<https://blogs.esa.int/caves/2016/12/05/lanzarote-planetary-analogue-a-geological-museum-and-a-natural-laboratory-for-mars/>
- MARTÍNEZ-FRÍAS, J., MATEO-MEDEROS, M<sup>a</sup> E. & 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. (2020) Canarias: una plataforma geológica y astrobiológica mundial para la Luna y Marte  
<https://www.investigacionyciencia.es/blogs/astronomia/71/posts/canarias-unaplataforma-geologica-y-astrobiologica-mundial-para-la-luna-y-marte-18809>
- MARTÍNEZ-FRÍAS, J. (2022) La Luna, Marte y la importancia sociocultural de las otras aplicaciones de los ISRU.  
<https://www.investigacionyciencia.es/blogs/astronomia/71/posts/la-luna-marte-y-laimportancia-sociocultural-de-las-otras-aplicaciones-de-los-isru-21690>
- MARTÍNEZ FRÍAS, J. (2023) 20 de Julio “Día Internacional de la Luna”: importancia de la Geología Planetaria. *Tierra y Tecnología*  
<https://www.icog.es/TyT/index.php/2023/07/20-de-juliodia-internacional-de-la-luna-importancia-de-la-geologia-planetaria/>
- MERGE (2002) Congreso Ibérico de Meteoritos y Geología Planetaria  
<http://tierra.rediris.es/merge/congremeteor/>
- NASA (2023a) Artemis <https://www.nasa.gov/specials/artemis/>
- NASA (2023b) VIPERS <https://science.nasa.gov/mission/viper/>
- PANGAEA (2016) Taking astronauts to other planets – on Earth  
<https://www.youtube.com/watch?v=fWsUHjVDJbY>
- RODRÍGUEZ-LOSADA, J.A., HERNÁNDEZ, S., MARTÍNEZ-FRÍAS, J., HERNÁNDEZ, L. & LUNAR, R. (2010) Study of lunar soil from terrestrial models (Canary Islands). In Olalla et al. (Eds.) *Volcanic Rock Mechanics. Rock Mechanics and Geoengineering in Volcanic Environments*. CRC Press, 2010. 301– 306
- RUFU, R., AHARONSON, O. & PERETS, H. B. (2017) A multiple-impact origin for the Moon. *Nat. Geosci.* 10, 89–94.

- SAURO, F., POZZOBON, R., MASSIRONI, M., DE BERARDINIS, P., SANTAGATA, T. Y DE WAELE, J. (2020) Lava tubes on Earth, Moon and Mars: A review on their size and morphology revealed by comparative planetology. *Earth-Science Reviews* <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103288>
- SAURO, F. SAMUEL PAYLER, S., MASSIRONI, M., POZZOBON, R., HIESINGER, H., MANGOLD, N., COCKELL, CH., MARTÍNEZ FRIAS, J., KULLERUD, K., TURCHI, L., DROZDOVSKIY, I. Y BESSONE, L. (2023) Training astronauts for scientific exploration on planetary surfaces: The ESA PANGAEA programme *Acta Astronautica* Vol. 204: 222-238
- STANSBERRY, E. (2023) Lunar Rocks and Soils from Apollo Missions. NASA. Curation. Lunar. Ares Developers. <https://curator.jsc.nasa.gov/lunar/>
- 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\\_organizado.html?id=0pChzQEACAAJ&hl=en&output=html\\_text&redir\\_esc=y](https://books.google.es/books/about/I_Seminario_de_Geolog%C3%ADa_Lunar_organizado.html?id=0pChzQEACAAJ&hl=en&output=html_text&redir_esc=y)