

# ESTUDIANDO METEORITOS LUNARES

## COMPRENDER LA EVOLUCIÓN COLISIONAL DE LA LUNA Y EL TRANSPORTE DE METEORITOS A LA TIERRA

JOSEP MARIA TRIGO, ELOY PEÑA, ALBERT RIMOLA, JORDI IBÁÑEZ Y JORDI SORT

La Luna es un cuerpo planetario carente de atmósfera que ha sufrido el bombardeo continuo por proyectiles de origen diverso. Explicamos las enseñanzas que los meteoritos y las muestras de las misiones *Apollo* nos aportan de los materiales formativos de nuestro satélite y las pistas para el desarrollo de técnicas de utilización *in situ* de recursos (ISRU). Estos son aspectos que centran nuestros estudios en diferentes centros de investigación de Barcelona, con interés en aportar nuevas ideas a la exploración de la Luna en las misiones Artemisa de NASA.



Flujos de lava volcánica

Tierras altas;  
bajas en titanio y hierro

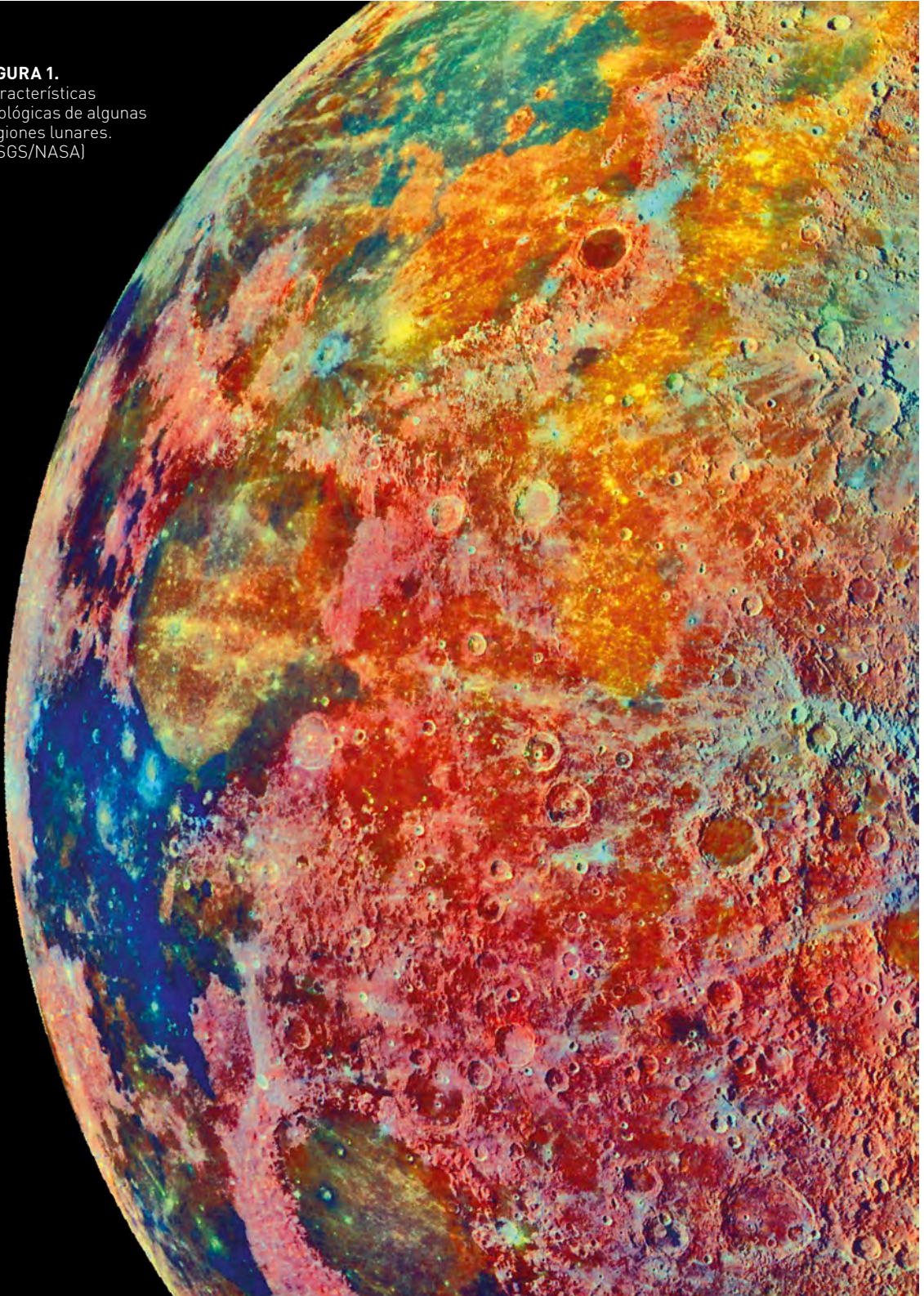


Mare Tranquillitatis;  
rico en titanio



Impactos recientes;  
terreno fino rico  
en minerales

**FIGURA 1.**  
Características  
geológicas de algunas  
regiones lunares.  
(USGS/NASA)



La Luna es un motivo de fascinación constante para los amantes de la astronomía. Nuestro satélite ha estado sometido a un bombardeo intenso a lo largo de los eones que, de hecho, nos ha permitido cuantificar el flujo de cuerpos que recibe la Tierra (Trigo Rodríguez, 2012, 2022). El estudio de nuestro satélite posee una importancia extrema desde un punto de vista cosmogónico, tal y como vinieron a demostrar las primeras misiones *Apollo* y *Luna* de retorno de muestras. Sus materiales sólidos aportan una información valiosísima para la comprensión de la evolución de nuestro propio planeta dado que podemos considerar al sistema Tierra-Luna un planeta binario en el que ambos cuerpos han sufrido una aportación similar de materiales exógenos. Mientras que buena parte de la historia de la Tierra ha estado marcada por una atmósfera densa y una actividad ígnea, la Luna ha sufrido siempre el bombardeo meteórico sin atmósfera ni el procesado impuesto por un volcanismo extensivo ni tampoco por la tectónica de placas (Trigo Rodríguez, 2012). La Luna cesó su actividad ígnea hace unos 4000 millones de años, pues al ser un cuerpo planetario relativamente pequeño fue enfriando su interior rápida y progresivamente.

Para que un meteorito lunar alcance la Tierra necesitamos que un asteroide excave un cráter en la superficie de la Luna. Durante la fase inicial de excavación del cráter algunas rocas de la superficie de la Luna que han sido fracturadas resultan impulsadas hacia fuera bajo la acción de la onda de choque. Aquellas rocas que superen la velocidad de escape, de unos 2,38 km/s para la Luna, po-

drán abandonar el campo gravitatorio de nuestro satélite. En general el destino de esas rocas será una travesía breve de pocos años hasta alcanzar la Tierra. Conocemos a fecha de hoy 541 meteoritos procedentes de la Luna, denominados como acondritas lunares o lunaitas. En este artículo pretendemos explicar las enseñanzas que hay detrás del estudio de estas afortunadas rocas.

## LOS MINERALES QUE FORMAN

### LA LUNA: ROCAS Y METEORITOS LUNARES

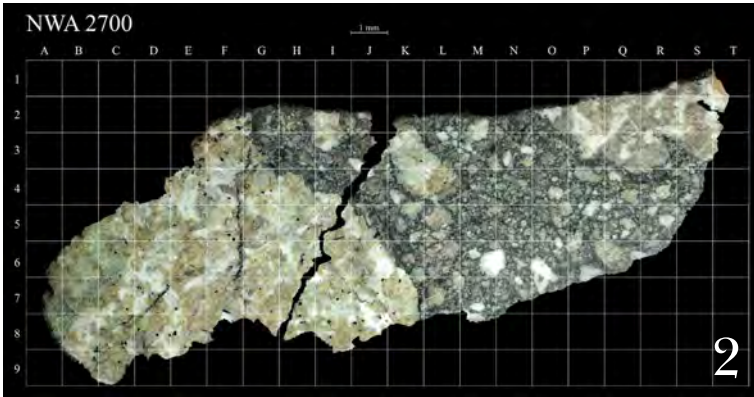
Las rocas de la superficie de la Luna poseen un origen ígneo, pues se formaron con el enfriamiento de los materiales primordiales fundidos (magma) para formar rocas que contienen diferentes minerales y vidrios. Conocemos que los minerales más abundantes en la Luna son los silicatos, particularmente tanto en la corteza como en el manto, donde domina el piroxeno, la plagioclasa feldespática y el olivino. Obviamente la superficie lunar ha estado sometida al influjo de la radiación solar y cósmica, así como a continuos impactos desde su formación. Eso hace que haya rocas más complejas fruto de ese procesado espacial, colisional y radiativo de su superficie. En general, el estudio de los minerales que conforman un cuerpo planetario como la Luna proporciona las claves para comprender las condiciones fisicoquímicas de formación de las rocas que lo componen. Por un lado, conocemos los mares lunares, que tienen composición basáltica y ceniza volcánica. Por otro lado, las tierras altas son ricas en rocas anortosíticas, compuestas mayoritariamente por un feldespato rico en un mineral común denominado plagioclasa. Esa

solución sólida contiene Na, Si, Al, Ca y O y, en el caso de la anortosita, la relación Ca/Na se aproxima a 1. Algunas rocas de esas regiones también contienen piroxeno y olivino. Como consecuencia de los impactos la Luna está cubierta de trozos de roca fragmentada y material pulverizado que se conoce como regolito. Desde los laboratorios del CSIC y la UAB estamos empleando técnicas punteras para comprender esos materiales formativos.

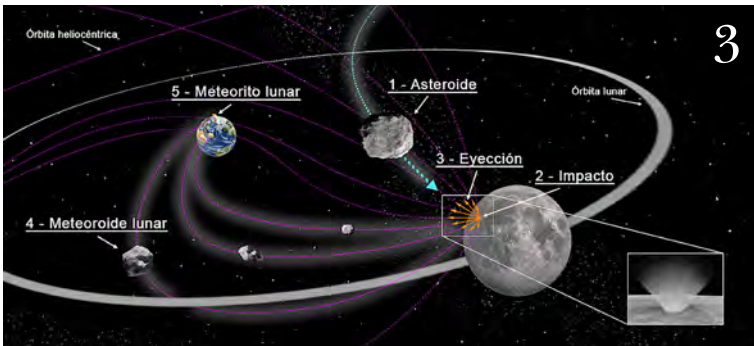
Además de los minerales mayoritarios se han identificado decenas de minoritarios en las rocas lunares. Muchos surgen de la implantación de materiales exógenos del viento solar o tras impactos con meteoroides. En cuerpos sin atmósfera es normal que la implantación sea eficiente, aunque también se forman minerales a alta presión que surgen de esos procesos tan energéticos como súbitos. Las misiones *Apollo* de NASA recopilaron de manera pionera información de esas rocas que conforman la superficie de la Luna. Esa hazaña de la exploración espacial fue realizada gracias al esfuerzo de una docena de astronautas a lo largo de las seis misiones que trajeron a la Tierra más de 382 kg de material lunar.

Como ya hemos mencionado, los impactos de meteoroides han sido constantes desde la formación de la Luna. Entre las innumerables rocas resultantes de su procesado colisional destacamos las brechas lunares. Un buen ejemplo es la brecha regolítica North West Africa 2700 (NWA 2700) que hemos estudiado mediante múltiples técnicas gracias a una lámina gruesa disponible en el ICE (Cortés *et al.*, 2012). La Figura 2 muestra un mosaico de esa lámina, en la que





**FIGURA 2.** Mosaico de la brecha lunar NWA 2700. (CSIC-IEEC)



**FIGURA 3.** Diagrama esquemático de la eyección lunar fruto de un impacto y las órbitas de transferencia de material hacia la Tierra. (Excepto donde se indique, todas las imágenes son cortesía de los autores)

se aprecia cómo los diferentes minerales que conforman la roca presentan aristas irregulares y apariencia de apilamiento. En él se aprecia que es un gabro mayoritariamente formado de olivino pero que también posee cristales de augita, pigeonita, plagioclasa, maskelinita, feldspato alcalino, espinela, ilmenita, fosfatos y troilita. Por ello, NWA 2700 representa un buen ejemplo de la complejidad y heterogeneidad a escala micrométrica que encontramos en los materiales lunares sometidos a impactos.

### LOS PROCESOS DE TRANSFERENCIA DE METEORITOS LUNARES

El incesante bombardeo de proyectiles que recibe la Luna y la falta de atmósfera permite la excavación de cráteres que, en el momento del impacto, eyectan rocas de su superficie a gran velocidad (Fritz, 2012). En ocasiones,

algunas rocas centimétricas son aceleradas por la onda de choque por encima de la velocidad de escape, por lo que consiguen superar la atracción gravitatoria lunar y comenzar su travesía cósmica. Cuando un objeto de cierta masa impacta a hipervelocidad en la superficie de la Luna produce un cráter de impacto eyectando casi cuatro órdenes de magnitud más masa que la del proyectil (Artemieva y Shuvalov, 2008). La mayor parte del material expulsado cae cerca del cráter y forma mantos de eyección continuos, mientras que el resto sigue principalmente una trayectoria balística formando un nuevo cráter lejos del impacto inicial. Sin embargo, una pequeña parte alcanza suficiente velocidad para escapar de la Luna (Melosh, 1989). La dinámica que siguen estos cuerpos es compleja: algunos salen disparados tan rápido que

pasan a orbitar el Sol alejándose del sistema Tierra-Luna, unos pocos vuelven a encontrarse con la Luna tras orbitar la Tierra, y otros, afortunadamente para la ciencia, llegan a la Tierra pudiendo producir meteoritos lunares.

El viaje de estos objetos hasta la Tierra depende de diversos factores, muchos experimentan carambolas orbitales durante miles de años y otros, simplemente, adquieren la velocidad en la dirección adecuada para alcanzar nuestro planeta en unos pocos días. Analizar dinámicamente las rutas que siguen estos fragmentos es precisamente el objetivo que perseguimos al simular los caminos de transferencia de material lunar. Gracias a las capacidades de los modernos supercomputadores y los potentes códigos de cálculo de órbitas, podemos calcular las trayectorias que seguirán diferentes rocas eyectadas por toda la superficie de la Luna con diferentes ángulos y aceleraciones. De esta manera, mirando hacia atrás en el tiempo, podemos monitorizar su viaje espacial durante millones de años y encontramos correlaciones entre las zonas de salida en la Luna y las zonas de llegada en la Tierra. La Figura 3 muestra un esquema de las simulaciones orbitales de los fragmentos expulsados por impactos lunares.

Nuestros resultados demuestran que las zonas ecuatoriales de la Tierra reciben más cantidad de

material lunar que las polares, lo cual es consistente con el mayor número de hallazgos de meteoritos lunares en los desiertos de África en comparación con los recuperados en la Antártida. Existen algunas zonas altamente correlacionadas, por lo que podemos obtener pistas del posible origen de las lunaitas estudiadas. La Figura 4 (arriba) muestra cómo algunas zonas de la superficie lunar son más propensas a transferir material a la Tierra. En concreto, las zonas contrarias al sentido de avance de la Luna y preferentemente a latitudes cercanas a cero. Esto es debido a que las rocas eyectadas en estas zonas tienen más probabilidad de anular su velocidad con el movimiento lunar quedando, en relación con la Tierra, prácticamente en caída libre. Se observa también que la distribución de impactos en la Tierra es relativamente homogénea, habiendo una preferencia por las latitudes ecuatoriales. También en la Figura 4 (abajo) están marcadas las áreas de eyección e impacto más correlacionadas, es decir, las zonas que comparten el mayor número de rocas eyectadas desde la Luna e impactadas en la Tierra. De esta manera es posible identificar que algunos puntos de eyección lunar tendentes hacia latitudes cercanas al polo sur transfieren material a ciertas zonas del ecuador terrestre.

Existe hoy en un día una discusión acerca de la distribución de impactos sobre la superficie lunar que podría condicionar los flujos de transferencia de material lunar. Le Feuvre y Wiczorek (2008) estimaron que la relación entre el flujo polar y ecuatorial de impacto es 0,96. Sin embargo, nuevos cálculos muestran una tendencia contraria, obteniéndose una relación

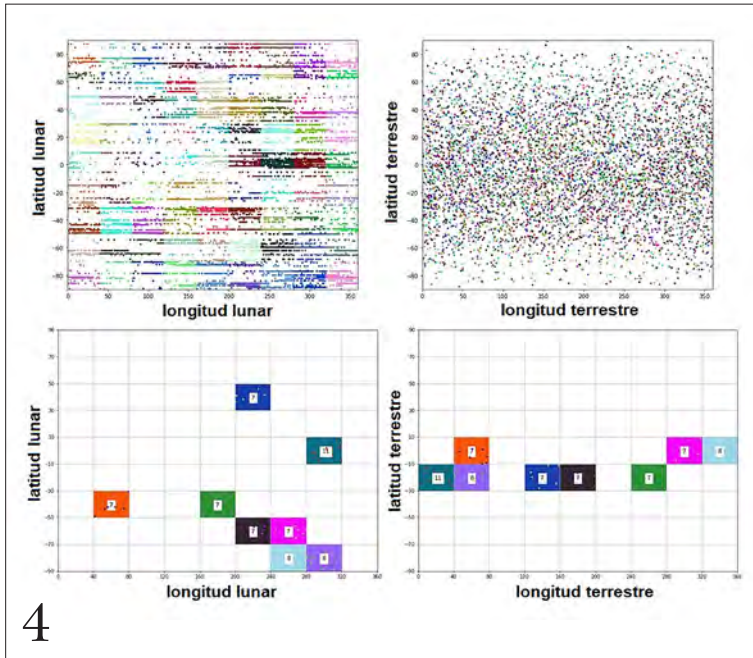
de flujos de 1,22 (Robertson *et al.*, 2021). Esto implicaría que los polos de la Luna están más expuestos a impactos que las zonas ecuatoriales, lo que podría condicionar significativamente las características de las transferencias.

#### **ESTUDIOS MEDIANTE MICROSCOPIO ELECTRÓNICO Y DIFRACCIÓN DE RAYOS X**

Otra parte de nuestros estudios pretende analizar los principales minerales constitutivos de estas rocas, conocer sus principales diferencias respecto a las terrestres y el grado de impurezas y fases chocadas que presentan. Mediante el microscopio electrónico de barrido (SEM) obtenemos imágenes de los haces de electrones en retrodispersión (BSE), lo que nos permite obtener imágenes similares a los mosaicos que creamos previamente con un microscopio óptico en reflexión para identificar las regiones de interés. Las imágenes de SEM contienen información sobre la topografía superficial y la composición elemental de la muestra. Para clasificar las fases minerales concretas empleamos la técnica analítica conocida como espectroscopia de rayos X de dispersión de energía (EDX), que se utiliza para estimar la composición elemental de una muestra determinada. Se basa en la interacción entre los electrones emitidos por el SEM y la muestra, dado que los electrones incidentes excitan a los elementos constituyentes de los minerales de la roca dando lugar a una emisión característica de rayos X que permite semi-cuantificar la composición elemental de la muestra. Esto se debe al principio fundamental de que cada elemento tiene una estructura atómica única, dando

lugar a un conjunto distinguible de picos en su espectro de emisión de fluorescencia de rayos X. Una de las principales ventajas de esta técnica es que no es destructiva, por lo que resulta muy adecuada para estudiar meteoritos. Obviamente, cuando necesitamos una composición elemental precisa utilizamos la microsonda electrónica (EPMA), aunque esta técnica puede destruir el material en el punto concreto analizado. Las abundancias mineralógicas de los diferentes tipos de rocas aportan claves sobre los materiales lunares más útiles y ofrecen pistas para el desarrollo de técnicas de utilización *in situ* de recursos (ISRU). En ese sentido, los minerales comunes ilmenita y apatita pueden ser fuente de oxígeno y agua, respectivamente. Además, el regolito se ha ido enriqueciendo en minerales como el piroxeno, olivino e incluso metales nativos como granos de Fe y Ni. También se pueden encontrar minerales hidratados y elementos de tierras raras. Como la mayoría de los metales se encuentran en forma de óxidos, esto hace que su extracción sea costosa en cuanto a energía ya que estos componentes tienden a ser químicamente estables, pero su uso potencial para producir piezas de naves espaciales y reparaciones *in situ* los podría hacer altamente provechosos (Trigo-Rodríguez *et al.*, 2020).

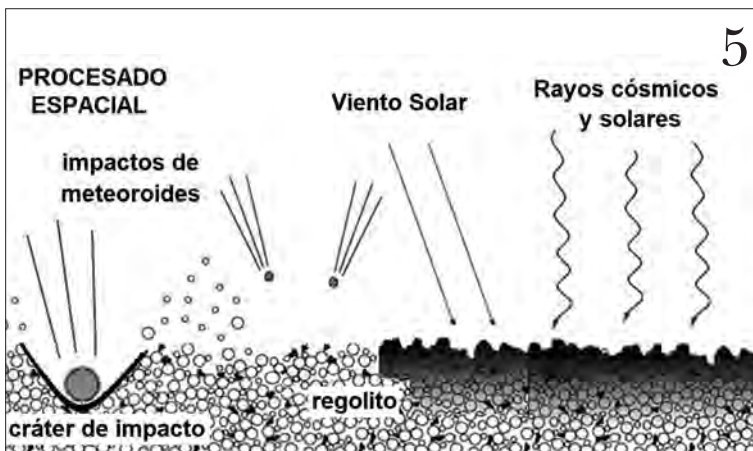
También utilizamos la difracción de rayos X (DRX) en polvo para determinar la composición mineralógica de los meteoritos. Esta técnica se basa en el fenómeno de la difracción óptica, que da lugar a la dispersión coherente de la luz cuando esta se encuentra un obstáculo o apertura de tamaño comparable a su longitud de



**FIGURA 4.** Arriba: fragmentos eyectados por impactos desde la Luna (izquierda) y sus lugares de impacto en la Tierra (derecha). Abajo: la correlación más alta entre zonas de eyección de la Luna (izquierda) y las zonas de impacto en la Tierra (derecha). La simulación ha sido realizada con 50 000 rocas lunares evolucionando dinámicamente durante un millón de años.

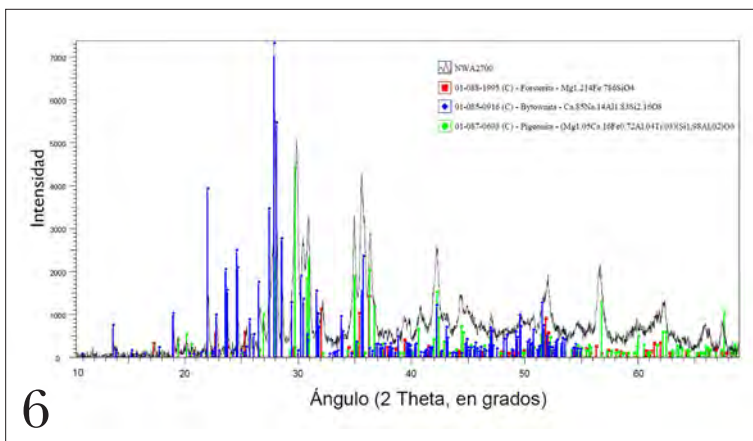
**FIGURA 5.** Procesos físicos que dan lugar al procesado espacial (*space weathering*).

**FIGURA 6.** Difractograma del meteorito lunar NWA 2700, obtenido con un difractómetro Bruker D8-A25 (tubo de rayos X de cobre).



onda. La luz dispersada interfiere constructiva o destructivamente con ella misma, dando lugar a un patrón de difracción que depende del tamaño y forma del obstáculo o apertura. En el caso de los rayos X, su longitud de onda es comparable a los espaciados interplanares de las redes cristalinas de los sólidos, típicamente de unos pocos angstroms ( $\text{\AA}$ ), por lo que es posible obtener un patrón de difracción único y característico para cada una de las fases cristalinas presentes en una muestra. El descubrimiento de este interesante fenómeno le valió a Max von Laue el premio Nobel de física en 1914.

Aunque esta técnica no permite detectar las fases minoritarias, sí permite identificar y cuantificar los minerales mayoritarios que resultan claves para establecer estrategias de extracción futura. La Figura 6 muestra el difractograma en polvo del meteorito NWA 2700, donde se pueden observar diferentes picos, o máximos de radiación difractada, en función del ángulo que forman el haz incidente y el difractado. Ese difractograma está dominado por los picos de la bytownita (plagioclasa con al-



6

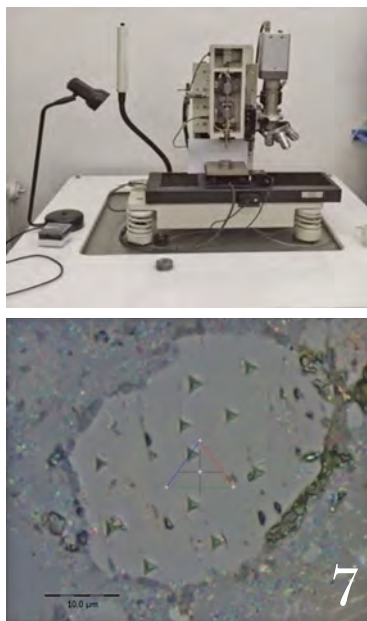


to contenido en Ca), la pigeonita y la forsterita (olivino). Un análisis más profundo usando el método de Rietveld (Young, 1993) permite cuantificar las fases minerales presentes en la muestra y determinar los parámetros de red de los minerales identificados. Dado que los espaciados interatómicos son muy sensibles a la composición de los materiales, la DRX permite evaluar de forma rápida el contenido promedio de cationes en diferentes minerales de los meteoritos (p. e., Mg/Fe en el olivino, Mg/Fe/Ca en las fases de piroxenos, o Ca/Na en las plagioclasas), proporcionando información complementaria a la obtenida con las técnicas elementales (SEM-EDX o EPMA).

### PROPIEDADES MECÁNICAS DE METEORITOS GRACIAS A LA TÉCNICA DE NANOINDENTACIÓN

Otra técnica que estamos aplicando sobre meteoritos lunares es la nanoindentación. Esta técnica permite conocer las propiedades mecánicas con gran precisión a escala local. Las medidas se realizan con un instrumento conocido como nanoindentador (Figura 7). Se trata de un pequeño pistón acabado en una punta de diamante de tamaño nanométrico que realiza una presión predefinida (aplicando fuerzas en el rango 0,2 – 500 mN). Al generar muescas en el material, el equipo mide tanto la profundidad alcanzada por el indentador como la recuperación plástica del material en la descarga. Con estos datos se pueden extraer las propiedades elásticas y plásticas del material a partir del estudio de las curvas de descarga.

Mediante la nanoindentación cuantificamos localmente las propiedades de cada mineral, así como el conjunto de la roca es-



**FIGURA 7.** (Arriba) fotografía del equipo de nanoindentación; (abajo) nanoindentaciones sobre una fase mineral de DHOFAR 1084.

tudiada, en función de la fuerza aplicada durante el experimento. Caracterizando los minerales que conforman las rocas se determinan parámetros claves para la comprensión de la respuesta mecánica de esos materiales como son la resistencia a la fractura, la dureza, la recuperación elástica o el módulo de Young. Así estudiamos las propiedades mecánicas de rocas lunares con el objetivo de que sean útiles para posibles prospecciones mineralógicas en la Luna. (A)

### Agradecimientos

Este artículo se enmarca en el campo del Proyecto de Investigación (PGC2018-097374-B-I00, PI: JMT-R), financiado por FEDER/Ministerio de Ciencia e Innovación–Agencia Estatal de Investigación. Agradecemos al Antarctic Search for Meteorites (ANSMET) y el Johnson Space Center por proporcionarnos meteoritos y rocas lunares bajo estudio

en el Instituto de Ciencias del Espacio. También se agradece financiación por parte de la Generalitat de Catalunya (2017-SGR-0292) y la Agencia Estatal de Investigación por el proyecto PID2020-116844RB-C21.

### Bibliografía

- Artemieva, N. A., Shuvalov, V. V., (2008). «Numerical simulation of high-velocity impact ejecta following falls of comets and asteroids onto the Moon». *Solar System Res.* 42, 329–334.
- Cortés, J., Trigo-Rodríguez, J. M., Llorca, J. (2012). «The Lunar Breccia NWA 2700: Origin, Description, and Its UV to NIR Reflectance Spectrum». 43rd LPSC, The Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 1659, id.1455.
- Fritz, J. (2012). «Impact ejection of lunar meteorites and the age of Giordano Bruno». *Icarus* 221, 1183-1186.
- Le Feuvre, M., Wieczorek, M. (2008). «Nonuniform cratering of the terrestrial planets». *Icarus* 197, 291-306.
- Melosh, J. (1989). «Impact Cratering. A Geologic Process». *Oxford Monographs on Geology and Geophysics Series no. 11*, Oxford: Clarendon Press.
- Robertson, D. K., Pokorný, P., Granvik, M. M. S., Wheeler, L. C., Rumpf, C. M. (2021). «Latitude Variation of Flux and Impact Angle of Asteroid Collisions with Earth and the Moon». *The Planetary Science Journal*, 2(3), id. 88.
- Trigo-Rodríguez, J. M., Mas-Sanz, E., Ibáñez-Insa, J., Alonso-Azcárate, J. (2020). «Moon in-situ resources: clues from the study of Lunar achondrites in preparation for Artemis sample return missions». 14th EPSC 2020, id. EPSC2020-714
- Young, R. A. (1993). «Introduction to the Rietveld Method», en Young, R.A. (Ed.), *The Rietveld Method*. Oxford University Press, Oxford.

**Josep M. Trigo-Rodríguez<sup>1,2</sup>, Eloy Peña-Asensio<sup>1,2,3</sup>, Albert Rimola<sup>2,3</sup>, J. Ibáñez-Insa<sup>4</sup> y Jordi Sort<sup>3,5</sup>.**

<sup>1</sup>Instituto de Ciencias del Espacio (CSIC-IEEC), <sup>2</sup>Institut d'Estudis Espacials de Catalunya (IEEC), <sup>3</sup>Universitat Autònoma de Barcelona (UAB), <sup>4</sup>Geosciences Barcelona [GEO3BCN-CSIC] y <sup>5</sup>Institució Catalana de Recerca i Estudis Avançats (ICREA).