



Gestión del paisaje. Patrimonio, territorio y ciudad  
Paisaiarenkudeaketa. Ondarea, lurraldea eta hiria  
Landscape management. Heritage, territory and city

TRABAJO FIN DE MÁSTER  
MASTER-AMAIERAKO LANA  
FINAL MASTER'S DISSERTATION

PROCESOS GEOQUÍMICOS DE ALTERACIÓN EN EL  
PATRIMONIO NATURAL: las especificidades del  
Meteorito Lunar NWA 11273

JENNIFER HUIDOBRO MARTIN

**2018/2019**

eman ta zabal zazu



Universidad del País Vasco Euskal Herriko Unibertsitatea

**Gestión del paisaje. Patrimonio, territorio y ciudad**  
**Paisaiaren kudeaketa. Ondarea, lurraldea eta hiria**  
**Landscape management. Heritage, territory and city**



**Gestión del paisaje. Patrimonio, territorio y ciudad**  
**Paisaiaren kudeaketa. Ondarea, lurraldea eta hiria**  
**Landscape management. Heritage, territory and city**

## **Autorización del director/a para la presentación del Trabajo fin de máster**

El Dr. Juan Manuel Madariaga Mota,  
profesor/a del máster “Gestión del Paisaje. Patrimonio, territorio y ciudad”  
autoriza la presentación del Trabajo fin de máster titulado:

PROCESOS GEOQUÍMICOS DE ALTERACIÓN EN EL PATRIMONIO NATURAL: las  
especificidades del Meteorito Lunar NWA 11273

que ha sido realizado por Jennifer Huidobro Martin bajo su dirección.

En, Leioa, a.... de ..... de 2019

eman ta zabal zazu



Universidad  
del País Vasco

Euskal Herriko  
Unibertsitatea

**Gestión del paisaje. Patrimonio, territorio y ciudad**  
**Paisaiaren kudeaketa. Ondarea, lurraldea eta hiria**  
**Landscape management. Heritage, territory and city**



**Gestión del paisaje. Patrimonio, territorio y ciudad**  
**Paisaiaren kudeaketa. Ondarea, lurraldea eta hiria**  
**Landscape management. Heritage, territory and city**

## **Autorización del director/a para la presentación del Trabajo fin de máster**

La Dra. Julene Aramendia Gutierrez,  
profesor/a del máster “Gestión del Paisaje. Patrimonio, territorio y ciudad”  
autoriza la presentación del Trabajo fin de máster titulado

PROCESOS GEOQUÍMICOS DE ALTERACIÓN EN EL PATRIMONIO NATURAL: las  
especificidades del Meteorito Lunar NWA 11273

que ha sido realizado por Jennifer Huidobro Martin bajo su dirección.

En, Leioa, a.... de ..... de 2019

eman ta zabal zazu



Universidad  
del País Vasco

Euskal Herriko  
Unibertsitatea

**Gestión del paisaje. Patrimonio, territorio y ciudad**  
**Paisaiaren kudeaketa. Ondarea, lurraldea eta hiria**  
**Landscape management. Heritage, territory and city**

## ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1. ¿Por qué se debe explorar el espacio?.....	1
1.2. El espacio y el paisaje .....	5
1.3. Los meteoritos lunares .....	7
1.4. Meteorización Terrestre .....	10
1.5. El meteorito lunar NWA 11273 .....	12
1.5.1 Revisión de minerales identificados hasta el momento en la muestra .....	13
<b>2. OBJETIVO</b> .....	<b>16</b>
<b>3. PARTE EXPERIMENTAL</b> .....	<b>16</b>
3.1. Descripción de la muestra .....	16
3.2. Arena del desierto sahariano .....	18
3.3. Instrumentación .....	20
3.3.1. Determinación del pH y el potencial Redox de la arena del Sáhara.....	20
3.3.2. Modelado químico y termodinámico .....	21
3.3.3. QGIS.....	21
3.3.4. M4 Tornado (Bruker).....	21
3.3.5. Micro-espectrómetro Raman Renishaw InVia.....	22
<b>4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	<b>24</b>
4.1. Caracterización de la muestra .....	24
4.1.1. Identificación de nuevos minerales por espectroscopia Raman .....	24
4.2. Alteraciones por presión .....	29
4.2.1. Alteración de olivinos por presión.....	31
4.3. Alteraciones por oxidación.....	32
4.3.1. Oxidación del óxido ferroso.....	32
4.3.2. Oxidación de olivinos.....	33
4.3.3. Oxidación de ilmenita .....	34
4.4. Meteorización terrestre debido a iones disueltos .....	36
4.4.1. Precipitación de calcita.....	36
4.4.2. Precipitación de otros elementos.....	37
4.4.3. Meteorización por sulfato .....	38
<b>5. CONCLUSIONES</b> .....	<b>40</b>
<b>6. BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>43</b>

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. ¿Por qué se debe explorar el espacio?

En 1970, una monja zambiana, de nombre Hermana Mary Jucunda, le escribió al Dr. Ernst Stuhlinger, entonces director asociado de ciencia del Centro de Vuelos Espaciales Marshall de la NASA, en respuesta a sus investigaciones sobre una misión tripulada a Marte. Concretamente, le preguntó cómo podía sugerir que se gastaran billones de dólares en tal proyecto en tiempos en el que tantos niños morían de hambre.

Stuhlinger, en su respuesta<sup>1</sup>, le explicó los motivos para llevar a cabo de la exploración espacial y el alto interés por continuar con ello. Destacó que él, personalmente, conocía la existencia de niños hambrientos mucho antes de saber que un viaje al planeta Marte fuera técnicamente posible. Sin embargo, consideraba que viajar a otros satélites y planetas era una aventura necesaria, ya que ese proyecto a largo plazo generaría un alto impacto terrestre, pudiendo solucionar la mayoría de los problemas que se viven en nuestro planeta más rápido que aplicando métodos convencionales.

También le explicó el funcionamiento de los presupuestos anuales de los Estados Unidos. Dicho presupuesto iba destinado a la salud, la educación, el bienestar, la renovación urbana, las carreteras, el transporte, la ayuda al exterior, la defensa, la conservación, la ciencia, la agricultura, etc. Dentro de ese presupuesto, una pequeña parte iba destinada a la exploración espacial, incluyendo en él varios proyectos, como el Programa Apolo, programa para la exploración lunar.

Tanto Stuhlinger, como sus compañeros, le hicieron saber a la Hermana que no podían desistir los planes de viajar a Marte, ya que, al trabajar en tal programa, se podría hacer una contribución a solucionar problemas tan graves como lo son la pobreza y el hambre en la Tierra.

Asimismo, explicó que en la problemática del hambre existían dos funciones básicas: la producción de comida y su distribución. La producción de alimentos por medio de agricultura,

**Gestión del paisaje. Patrimonio, territorio y ciudad**  
**Paisaiaren kudeaketa. Ondarea, lurraldea eta hiria**  
**Landscape management. Heritage, territory and city**

ganadería, pesca y otras operaciones a gran escala era eficiente solo en algunas partes del mundo, pero era drásticamente deficiente en muchas otras. Sin embargo, las grandes extensiones de terreno podrían ser mejor aprovechadas si se aplicasen métodos eficientes de control de cuencas fluviales, uso de fertilizantes, pronósticos meteorológicos, evaluación de fertilidad, programación de plantaciones, selección de campo, hábitos de plantación, cadencia de cultivos, inspección de cosecha y planificación de recolecciones. El científico añadió que la mejor herramienta para mejorar todas esas funciones, sin duda, era el satélite artificial en órbita terrestre. Este dispositivo puede explorar grandes zonas de terreno en poco tiempo dando vueltas al mundo a gran altitud. Además, puede observar y medir una gran variedad de factores que indican el estado y las condiciones de cosechas, suelo, sequías, precipitaciones, nieve, etc., y puede enviar esta información por radio a las estaciones de tierra para su buen uso. Se ha estimado que incluso un sistema modesto de satélites terrestres equipados con sensores, trabajando en un programa de mejora agrícola a escala mundial, aumentaría el tamaño de las cosechas en el equivalente de muchos miles de millones de dólares<sup>1</sup>.

En cuanto a la distribución de alimentos, este se trataba de un problema completamente diferente. La cuestión no era tanto el de volumen de transporte, sino de cooperación internacional. El científico no creía que el vuelo espacial consiguiese el milagro de la noche a la mañana, en este sentido. Sin embargo, en el programa espacial se encontraban las principales potencias mundiales, como lo eran la NASA (Agencia Nacional de Aeronáutica y del Espacio), la ESA (Agencia Espacial Europea), la CNSA (Administración Espacial Nacional China), ROSCOSMOS (actual Agencia Espacial Rusa), ISRO (Agencia India de Investigación Espacial) y JAXA (Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial), entre otras agencias más pequeñas. La colaboración entre estos supondría una mejora en las relaciones internacionales de los países más potentes del mundo unidos por un fin común. De hecho, a día de hoy, dichas agencias trabajan por un fin común, el desarrollo del orbitador Lunar Orbital Platforms-Gateway (LOG-P). El LOG-P será un laboratorio científico, habitáculo humano y un área de espera para rovers y otras naves de explotación espacial<sup>2</sup>.

En resumen, más alimentos gracias a estudios y valoraciones desde la órbita, y mejor distribución de alimentos por medio de la mejora en las relaciones internacionales, son tan

**Gestión del paisaje. Patrimonio, territorio y ciudad**  
**Paisaiaren kudeaketa. Ondarea, lurraldea eta hiria**  
**Landscape management. Heritage, territory and city**

sólo dos ejemplos de la profundidad con que la exploración espacial hace mella en la vida sobre la Tierra. A fin de cuentas, todo el trabajo derivado de la exploración del espacio va ligado a la estimulación del desarrollo tecnológico y la generación de conocimiento científico. De hecho, todo el conocimiento técnico adquirido también está disponible para su aplicación a tecnologías terrestres. Cada año, alrededor de mil innovaciones técnicas generadas en los diferentes programas espaciales se abren camino a las tecnologías terrestres, donde producen mejores electrodomésticos y equipos agrícolas, mejores máquinas de coser y radios, mejores barcos y aviones, mejores pronósticos del tiempo y avisos de tormentas, mejores comunicaciones, mejores instrumentos, mejores utensilios y herramientas para la vida diaria<sup>1</sup>.

Actualmente, casi 50 años después de la carta de Stuhlinger, podemos comprobar que sus ambiciones y las de sus compañeros fueron totalmente exitosas. Los ejemplos más sencillos son la previsión meteorológica y la información geográfica. Por ejemplo, Meteosat lo componen una serie de satélites meteorológicos geoestacionarios construidos y lanzados por la ESA para proporcionar información meteorológica a África y Europa, puestos en funcionamiento en 2002<sup>3</sup>. Otro satélite meteorológico es el estacionario Operacional Ambiental (GOES), que provee información ambiental a América desde 1974 para soportar el pronóstico del tiempo, en el seguimiento de tormentas intensas y para la investigación meteorológica<sup>4</sup>.

Como otro ejemplo, la Agencia Boliviana para Actividades Espaciales (ABAE) empezó a poner medidas ante sus principales problemáticas, como era la producción de alimentos. Para ello crearon el satélite de observación terrestre Miranda VRSS-1 en 2012. Dicho satélite cuenta con cámaras de alta resolución que permiten elaborar mapas cartográficos para poder evaluar los suelos agrícolas, las cosechas y la producción. Así mismo, también puede controlar los recursos hídricos y las zonas en peligro de desertificación. Con él, el pueblo venezolano ha disminuido drásticamente el uso de fertilizantes, ya que los ha empleado con mayor control, ahorrando así más dinero; ha facilitado la planificación urbana y la selección de emplazamientos clave para los cultivos; ha aumentado las cosechas exponencialmente; etc<sup>5</sup>.

**Gestión del paisaje. Patrimonio, territorio y ciudad**  
**Paisaiaren kudeaketa. Ondarea, lurraldea eta hiria**  
**Landscape management. Heritage, territory and city**

Considerando lo expuesto, se podría decir que, aunque la exploración espacial parezca alejarse de la Tierra, centrándose en la Luna, el Sol, otros planetas u otras estrellas, ninguno de esos objetivos tiene más atención que nuestro planeta. Ya que, explorando otros campos de estudio, la Tierra se convertirá en un planeta mejor, no sólo por todo el nuevo conocimiento tecnológico y científico generado en los proyectos espaciales, sino también porque estaríamos desarrollando un aprecio más profundo hacia nuestra Tierra, hacia la vida y hacia el hombre.

Finalmente, cabe destacar que hoy en día las problemáticas terrestres más desafiantes son la desertización, la deforestación, el alto grado de contaminación, la reducción de la biodiversidad y la superpoblación<sup>6</sup>. Se tratan de problemáticas que hemos sido capaces de ver gracias a imágenes de la Tierra desde cualquier zona del espacio, es decir, imágenes tomadas en algunas de las misiones espaciales, como es muestra la Imagen 1 que fue la primera fotografía de la Tierra tomada desde la Luna.



*Imagen 1. Primera fotografía de la Tierra tomada desde el espacio, concretamente desde la Luna por el orbitador Apolo 8 en las Navidades de 1968<sup>7</sup>.*

**Gestión del paisaje. Patrimonio, territorio y ciudad**  
**Paisaiaren kudeaketa. Ondarea, lurraldea eta hiria**  
**Landscape management. Heritage, territory and city**

Con la exploración espacial y con la generación de nuevos conocimientos y tecnologías se podrán solventar o minimizar dichas problemáticas. Como bien dijo Albert Schweitzer “Miro al futuro no con preocupación, sino con esperanza”<sup>1</sup>.

## 1.2.El espacio y el paisaje

Desde la antigüedad, el ser humano ha tenido mucha curiosidad por acontecimientos que no tenían explicación, como las formas que adoptaban las constelaciones, el comportamiento de los astros o el ciclo lunar, entre otros. Por lo que siempre ha existido el interés por el espacio, incluso antes de saber lo que ello significaba.

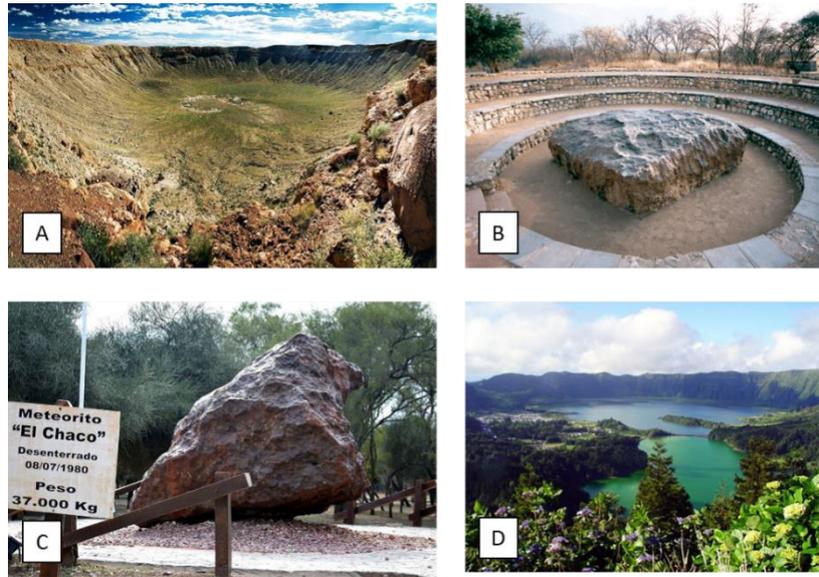
Así mismo, cuerpos extraterrestres que han colisionado contra la Tierra han dejado a su paso paisajes únicos con gran relevancia científica, pero, sobre todo, social.

Algunos de los acontecimientos más significativos fue el causado por el meteorito Chicxulub, que hace 65 millones de años colisionó contra la Península del Yucatán (México), provocando el hito más devastador jamás conocido, la extinción de los dinosaurios<sup>8</sup>. A partir de este momento la Tierra fue evolucionando hasta la actualidad y continúa transformándose en un proceso que implica reacciones fisicoquímicas y biológicas.

La Imagen 2 muestra un conjunto de fotografías de paisajes terrestres con influencia extraterrestre, algunos de ellos considerados como patrimonio natural por la UNESCO.

Desgraciadamente, otros, todavía se encuentran sin someterse a ningún tipo de gestión para su preservación y sin ningún tipo de reconocimiento internacional, ni de asistencia técnica o económica para combatir amenazas como por ejemplo actos vandálicos.

**Gestión del paisaje. Patrimonio, territorio y ciudad**  
**Paisaiaren kudeaketa. Ondarea, lurraldea eta hiria**  
**Landscape management. Heritage, territory and city**



*Imagen 2. (A) Cráter Vredefort, Free State (Sudáfrica), declarado Patrimonio por la UNESCO. (B) Meteorito Hoba West, Grootfontein (Namibia). (C) Meteorito el Chaco en el Campo del Cielo (Argentina), segundo meteorito más grande conocido y se encuentra desprotegido. (D) Cráter y Lago Bosumtwi (Ghana), cráter que fue rellenado naturalmente por agua, siendo el único lago del país y considerado como sagrado por el pueblo de Ashanti.*

Sin embargo, desde la creación del Convenio Europeo del Paisaje (CEP), firmado en Florencia el 20 de octubre del año 2000, la percepción, el concepto y la gestión del paisaje han cambiado drásticamente. Antes de su creación, el término paisaje era muy simple, pudiéndose definir como una extensión de terreno, pintura o fotografía vista desde un lugar determinado y considerada como espectáculo. Sin embargo, tras la publicación del CEP, el paisaje engloba un sinfín de significados, cuya correcta definición es *“cualquier parte del territorio tal como la percibe la población, cuyo carácter sea el resultado de la acción y la interacción de factores naturales y/o humanos”*<sup>9</sup>. Es decir, este concepto no solo incluye lo que antes se consideraba como paisaje, sino que engloba cualquier lugar con valor significativo para las personas.

Considerando esta definición, en cuanto a los que a este trabajo se refiere, todos los lugares con influencia extraterrestre en la Tierra deberían ser considerados como paisajes a preservar, ya que tienen un alto valor científico, además de cultural, como se ha explicado en pie de la imagen 2D. De la misma forma y por los mismos motivos, los elementos tangibles que generan dichos paisajes, es decir, los meteoritos, son considerados patrimonio natural, y, en consecuencia, deben conservarse, preservarse y estudiarse.

### 1.3. Los meteoritos lunares

Una rama muy importante en la exploración espacial es la mineralogía, considerada como la ciencia que estudia las propiedades físicas de los minerales, sus componentes químicos y sus características simétricas. Dicho estudio se puede llevar a cabo por métodos muy costosos, como son el envío de robots todoterrenos (rovers), robots estáticos (landers) o mediante misiones tripuladas de recogida de muestras. Sin embargo, su alto coste genera la necesidad de estudiar la mineralogía por otros medios, como es el estudio de meteoritos, de análogos terrestres o polvo interestelar, entre otros varios<sup>10</sup>.

El estudio de muestras extraterrestres ha permitido abrir una ventana en el conocimiento de la composición fisicoquímica y la dinámica de los procesos de formación del Sistema Solar, cuya memoria tan solo puede ser preservada a través de los fragmentos de asteroides y/o cometas que viajan por el espacio y llegan a la Tierra.

Dichos fragmentos que viajan por el espacio son conocidos como meteoroides. Cuando entran en la atmósfera terrestre, conocidos como meteoros, chocan con la atmósfera y las partículas del aire, generándose altas temperaturas y provocando la transformación mineralógica de su corteza. Finalmente, los fragmentos que consiguen llegar a la superficie terrestre sin haberse desintegrado en la atmósfera son los meteoritos<sup>11</sup>.

De todos los meteoritos encontrados, la mayoría provienen del cinturón de asteroides, de planetas cercanos como lo es Marte o de nuestro satélite, la Luna situado a 384.400 kilómetros de la Tierra<sup>12</sup>.

La Luna es el cuerpo más cercano a nuestro planeta y es el único que ha sido pisado por el hombre. Gracias, en parte, a las diferentes misiones enviadas a lo largo de la historia se puede afirmar que, al igual que nuestro planeta, la Luna está formada por un núcleo, un manto y una corteza. El núcleo interior es de hierro sólido, mientras que el exterior está compuesto por hierro fundido. Por el contrario, en el manto predominan olivinos y piroxenos, y elementalmente está integrado principalmente por magnesio, hierro, silicio y átomos de

**Gestión del paisaje. Patrimonio, territorio y ciudad**  
**Paisaiaren kudeaketa. Ondarea, lurraldea eta hiria**  
**Landscape management. Heritage, territory and city**

oxígeno. La fina corteza posee los mismos elementos que el manto, además de calcio, aluminio, titanio, uranio, torio, potasio e hidrógeno<sup>12</sup>.

Los impactos han dejado una Luna recubierta de escombros grises, polvo y restos de roca conocida como regolito, así como zonas oscuras conocidas como mares, que se formaron al rellenarse los cráteres que dejaron los impactos de asteroides con lava procedente del interior lunar. De tal forma que dichos mares tienen una composición diferente a las zonas claras del satélite, conocidas como tierras altas<sup>13</sup>.

La imagen 3 muestra un esquema de los diferentes tipos de meteoritos que hay. Distinguiéndose en función de si han sufrido transformaciones a lo largo de su vida o no. Es decir, los meteoritos no diferenciados son aquellos que no han sufrido ningún tipo de transformación, por lo que se considera que tienen un origen que se remonta a la formación del Sistema Solar. Por el contrario, los diferenciados son aquellos que han sufrido un proceso de transformación y se clasifican en función del porcentaje de aleación hierro-níquel que posean (Fe-Ni). En este sentido, se puede hablar de meteoritos metálicos (90 % de aleación Fe-Ni), los metalorocosos (50 % de fracción rocosa y 50 % de aleación metálica) y las acondritas (menos del 1 % de aleación)<sup>14</sup>.

**Gestión del paisaje. Patrimonio, territorio y ciudad**  
**Paisaiaren kudeaketa. Ondarea, lurraldea eta hiria**  
**Landscape management. Heritage, territory and city**

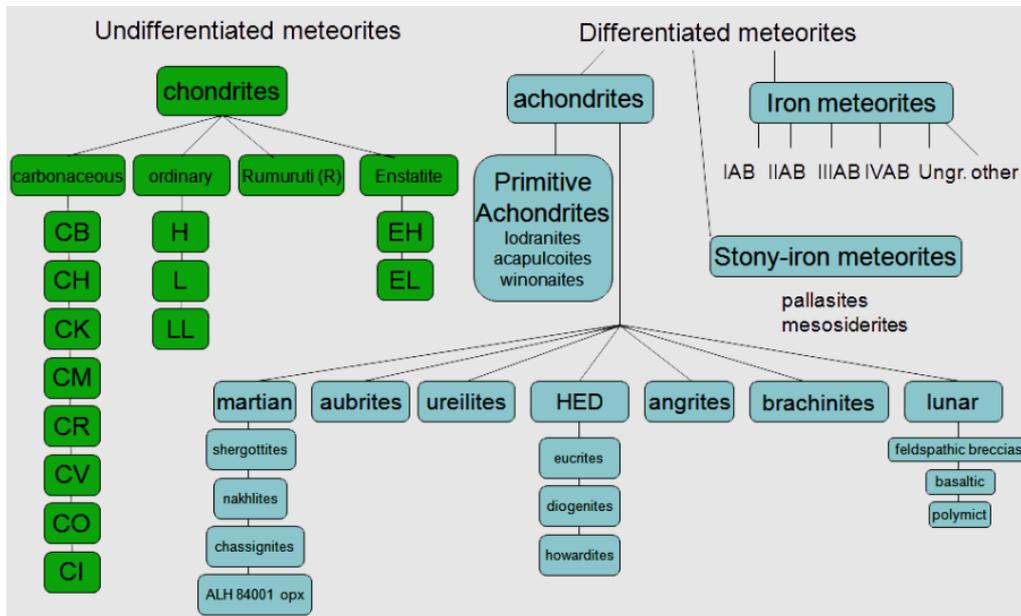


Imagen 3. Gráfico de la clasificación meteorítica por composición y procedencia del programa de petrografía de fragmentos finos de la NASA<sup>15</sup>.

En concreto, los meteoritos lunares se clasifican desde el punto de vista litológico y composicional, pudiéndose diferenciar tres tipos: las brechas anortosíticas, los basaltos y las brechas de impacto-fusión. Las primeras son comúnmente conocidas como brechas feldespáticas, teniendo un alto contenido de  $Al_2O_3$  (26-31 %) y menor de  $FeO$  (3-6 %), es decir, ricas en plagioclasas y piroxenos. Los basaltos, en cambio, proceden de los *mares* lunares y son rocas ígneas extrusivas ricas en olivinos, silicatos, magnesio, hierro y sílice, que poseen fenocristales de olivino  $[(Mg,Fe)_2SiO_4]$  y augita  $[(Ca,Mg,Fe)_2(Si,Al)_2O_6]$  y, en menor cantidad, cromita  $[FeCr_2O_4]$ , ilmenita  $[FeTiO_3]$ , apatito  $[Ca_5(PO_4)_3(F,Cl,OH)]$ , troilita  $[FeS]$  y metales de hierro y níquel. En cuanto al contenido de Fe y Al, estos son cuantitativamente ricos en  $FeO$  (18-22 %), mientras que tienen algo menos de  $Al_2O_3$  (8-10 %). Al grupo de los basaltos también pertenecen los gabros, caracterizados por enfriarse lentamente, siendo rocas ígneas intrusivas o plutónicas que también proceden de los *mares*, aunque son ricos en plagioclasas  $[(Na,Ca)(Si,Al)_3O_8]$  y piroxenos  $[(Ca,Mg,Fe,Mn,Na,Li)(Al,Mg,Fe,Mn,Cr,Sc,Ti)(Si,Al)_2O_6]$  y, en menor proporción, óxidos de hierro y titanio. Finalmente, las brechas de impacto-fusión tienen una composición norítica (16 %  $Al_2O_3$ , 11 %  $FeO$ ). Además, existen otros meteoritos lunares clasificados como brechas polimícticas con una composición sin identificar, ya que tienen una mezcla de brechas anortosíticas y de basaltos<sup>16,17</sup>.

#### 1.4. Meteorización Terrestre

Desde el primer contacto con la Tierra, los meteoritos sufren numerosos procesos de meteorización desde su generación en el espacio hasta su descubrimiento o recolección. De hecho, en función de la forma en la que se recolectan o avistan podemos encontrarnos los denominados *Falls* y los *Finds*.

Los *Falls* son aquellos meteoritos que se observan desde su entrada en la atmósfera, lo que se conoce comúnmente como estrella fugaz, y son recogidos inmediatamente en la superficie terrestre<sup>18</sup>.

Los *Finds* son aquellos fragmentos meteoríticos que han sido encontrados en la Tierra, ya sea en la superficie terrestre (desiertos y hielos como lugar de hallazgos principales) o enterrados<sup>18</sup>. Este tipo de meteoritos permite estudiar los diferentes procesos de alteración terrestre, ya que al no haberse recogido inmediatamente tras su caída, han estado un periodo de tiempo indeterminado sujeto a diferentes condiciones terrestres. La mayoría de los meteoritos pertenecen a este grupo ya que son fáciles de divisar en superficies monocromáticas, como lo es el hielo de la Antártida o la arena del desierto y difíciles de avistar en el cielo.

En ambos tipos de meteoritos se pueden estudiar las alteraciones propias de la generación del mismo, como es la gran presión a la que es sometido el cuerpo originario debido al impacto de otro cuerpo extraterrestre. También se puede estudiar la corteza de fusión generada al entrar en la atmósfera y ser sometido a altas temperaturas.

Ambas alteraciones se pueden estudiar analizando las diferentes fases minerales que componen el meteorito, para ello es necesario cortarlo transversalmente. De esta forma se puede analizar más fácilmente la corteza de fusión y el interior del meteorito, así como la transición entre unas fases minerales y otras.

Aparte de las alteraciones debidas a las presiones y temperaturas, también se deben estudiar las de meteorización terrestre, consideradas como las transformaciones de fases minerales a

**Gestión del paisaje. Patrimonio, territorio y ciudad**  
**Paisaiaren kudeaketa. Ondarea, lurraldea eta hiria**  
**Landscape management. Heritage, territory and city**

otras que son más estables en la superficie terrestre por medio de un conjunto de reacciones bio-geo-físico-químicas<sup>19</sup>.

Dentro de la meteorización terrestre, las alteraciones químicas cobran un papel muy importante, ya que generan fases minerales derivadas o secundarias. En este grupo existen varios agentes causantes, aunque los principales son el agua, el aire y las sales del suelo.

Para este trabajo nos vamos a centrar en el ambiente desértico que es uno de los emplazamientos más comunes donde encontrar meteoritos. En estos, el clima es caluroso y seco, aunque la variación de temperaturas diarias es de diez grados y el agua está más presente de lo esperado, ya que los vientos que llegan al desierto arrastran humedad de los océanos más cercanos. Sin embargo, actualmente, las precipitaciones en el desierto sahariano son raras, pero ocurren al menos una vez por año<sup>20</sup>.

Dicha agua puede disolver algunas fases minerales del suelo desértico, además de las fases que ya lleva disuelta la lluvia o el agua del suelo, y puede entrar en las venas y grietas del meteorito. Una vez dentro, las altas temperaturas generan la evaporación del agua y, en consecuencia, la precipitación de sales en el interior y exterior del espécimen. A este factor se le suma el hecho de que el CO<sub>2</sub> atmosférico se disuelve en el agua de lluvia, llegando a la superficie terrestre como ácido carbónico, pudiendo reaccionar como ácido con aquellos compuestos alcalinos con los que se encuentre<sup>20</sup>.

Como se ha dicho anteriormente, los fuertes vientos van asociados a partículas que impactan sobre la muestra y la erosionan. Dicha erosión está ligada a una mayor meteorización química como consecuencia del debilitamiento del material<sup>20</sup>.

En este sentido es clave comprender la naturaleza de todas las interacciones para entender los diferentes sucesos y condiciones a las que se ha visto sometida la muestra. De este modo, se podrá reconstruir el viaje que llevó a cabo y distinguir los procesos sufridos una vez llegados a la Tierra de los procesos de formación y meteorización en origen. Este proceso de aprendizaje es básico si se quieren utilizar estas preciadas piezas como trazadores de la historia del Universo. Además, considerando los meteoritos parte del Patrimonio Natural de

la Tierra y por lo tanto elementos a ser conservados y preservados, la distinción entre material original y material alterado se torna imprescindible. De esta forma, se podrán utilizar estos valiosos elementos como trazadores de la historia del Universo, así como del planeta Tierra.

Finalmente, cabe destacar que la meteorización terrestre en meteoritos se puede ver como un obstáculo para la interpretación de la historia previa a su estancia en la Tierra, pero es de especial interés para otros numerosos estudios, como aquellos que estudian las condiciones microambientales que se deben dar para que una fase mineral se transforme a otra, influenciado principalmente por factores como el pH, la atmósfera oxidante, presencia de agua y la temperatura, entre otros<sup>21</sup>.

Con dicho propósito, varios científicos han estudiado alteraciones en meteoritos de diferentes formas. Por ejemplo, Al-Kathiriet *al.*<sup>22</sup> analizaron 54 muestras de condritas encontradas en varias zonas de Omán para comparar los diferentes grados de meteorización física, química y meteorización mineralógica terrestre con la técnica de <sup>14</sup>C. Bland *et al.*<sup>23</sup> seleccionaron varios meteoritos encontrados en zonas desérticas para que, tras determinar su edad terrestre por medio del <sup>14</sup>C, ser examinados por espectroscopia Mössbauer, con el fin de evaluar el grado de oxidación de las muestras, ya que el ion Fe<sup>2+</sup> está directamente relacionado con la meteorización terrestre y el hierro en estado de valencia 0 el más común en los meteoritos.

### 1.5.El meteorito lunar NWA 11273

Ante la necesidad de conocer los procesos de alteración más comunes que afectan al Patrimonio Natural, en este trabajo se planteó llevar a cabo el estudio sobre un tipo patrimonio menos conocido y accesible, como lo son los meteoritos.

El meteorito seleccionado para el estudio fue el meteorito lunar North West Africa (NWA) 11273, ya que era uno de los que disponía el grupo de investigación IBeA y del que no existía ninguna publicación científica que esclareciera su composición química en el inicio de su estudio.

Por ello, y con el fin de discernir entre la composición original y la de meteorización, se debería llevar a cabo la caracterización más minuciosa posible. Considerando esta falta de información, se dedicó el Trabajo Fin de Grado “Caracterización del Meteorito Lunar NWA 11273 mediante técnicas analíticas no destructivas empleadas en misiones espaciales”<sup>24</sup> a la caracterización del mismo empleando dos de los instrumentos de análisis más efectivos, la espectroscopia Raman para descubrir las fases minerales que componían la muestra, y la micro-fluorescencia de rayos X por energía dispersiva para determinar la parte elemental del mismo.

#### 1.5.1 Revisión de minerales identificados hasta el momento en la muestra

Como ya se ha comentado anteriormente, se inició la caracterización del meteorito lunar NWA 11273 en el Trabajo Fin de Grado “*Caracterización del meteorito lunar NWA 11273 mediante técnicas analíticas no destructivas empleadas en misiones espaciales*”<sup>24</sup>. En dicho trabajo, gracias a la combinación de las técnicas analíticas de micro-fluorescencia de rayos X y la espectrometría Raman se pudieron identificar las fases minerales que se muestran a continuación:

- Anortita

La anortita [ $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ] es el mineral mayoritario y más común de los meteoritos lunares conocidos como brechas anortosíticas, familia a la que pertenece el NWA 11273, de ahí que exista tal presencia del mineral en la muestra.

- Piroxenos

Los piroxenos [(Ca,Mg,Fe,Mn,Na,Li) (Al,Mg,Fe,Mn,Cr,Sc,Ti) (Si,Al) $_2$ O $_6$ ] pertenecen a un grupo de silicatos formados como consecuencia del enfriamiento y solidificación del magma. Se encontraron tanto clinopiroxenos como ortopiroxenos. Estos se diferencian entre sí en que los clinopiroxenos cristalizan monocínicamente y los ortopiroxenos ortorrómbicamente.

**Gestión del paisaje. Patrimonio, territorio y ciudad**  
**Paisaiaren kudeaketa. Ondarea, lurraldea eta hiria**  
**Landscape management. Heritage, territory and city**

- Olivino

El olivino es un ortosilicato conformado por tetraedros de  $[\text{SiO}_4]^{4-}$  unidos entre sí por enlaces covalentes que cristalizan ortorrómbicamente. Su fórmula química es  $\text{X}_2\text{SiO}_4$ , pudiendo ser X, cationes hierro o magnesio. Sin embargo, los más comunes suelen estar formados por una mezcla entre magnesio (forsterita, Fo,  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ ) y hierro (fayalita, Fa,  $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ ) en proporciones variables.

En función de las posiciones de las bandas Raman y gracias al calibrado de Torre-Fdez *et al.*<sup>25</sup>, se pudo saber que los olivinos de la muestra tenían una composición que variaba desde  $\text{Fo}_{56}\text{Fa}_{44}$  hasta  $\text{Fo}_{83}\text{Fa}_{17}$ .

- Calcita

El carbonato de calcio  $[\text{CaCO}_3]$  no es un mineral lunar, por lo que su presencia en el meteorito se debe a otras causas que se explicarán más adelante.

- Sulfato

La banda principal de los sulfatos  $[\text{SO}_4^{2-}]$  aparece dentro del rango  $980\text{-}1070\text{ cm}^{-1}$ . Generalmente, las bandas principales de diferentes tipos de sulfatos pueden solaparse. Lo que permite diferenciar entre unos y otros son las bandas secundarias. Desafortunadamente, en el trabajo mencionado estas bandas no fueron detectadas, a pesar de haber realizado exhaustivas optimizaciones del espectro.

Dicho problema se debió a la baja concentración del mineral en la muestra. Aun así, los sulfatos no son minerales comunes de la Luna, por lo que en los siguientes apartados se explicará su procedencia.

- Hematita

La hematita  $[\text{Fe}_2\text{O}_3]$  es un óxido de hierro que no se había encontrado anteriormente en ninguno de los retornos de muestra lunar a la Tierra en las misiones *Apollo*, ni en los análisis

**Gestión del paisaje. Patrimonio, territorio y ciudad**  
**Paisaiaren kudeaketa. Ondarea, lurraldea eta hiria**  
**Landscape management. Heritage, territory and city**

llevados a cabo sobre la superficie lunar por medio de rovers u orbitadores. Por lo que, como en los casos anteriores, posteriormente se explicará el posible motivo de su presencia en el meteorito.

- Zircón

El zircón [ $ZrSiO_4$ ] también es un ortosilicato, se le considera como uno de los minerales más antiguos de la Tierra y uno de los más abundantes en la corteza terrestre, ya que se forma al cristalizar las rocas magmáticas.

Este mineral es poco habitual en la Luna, aunque ya se ha encontrado en varias muestras traídas por las misiones *Apolo*. Según Bellucci *et al.*<sup>26</sup> existen varias hipótesis acerca de su origen. La que parece más coherente está relacionada con la temperatura de cristalización de dicho mineral, la cual sólo se consigue en el manto lunar. Su aparición en la superficie se debe a los procesos de relleno de material tras los impactos de meteoritos, generando así los mares lunares.

- Camacita

También se encontró camacita en algunas regiones del meteorito. Este mineral está compuesto por una aleación hierro:níquel en proporciones iguales o superiores en hierro a 90:10<sup>27</sup>.

Al tratarse de una región 100 % metálica, no era activa en Raman, por lo que sólo se pudo identificar gracias al análisis semi-cuantitativo de micro-fluorescencia de Rayos X.

Su origen en el meteorito no está claro ya que puede proceder tanto del núcleo lunar rico en hierro, como del cuerpo celeste que impactó contra la Luna provocando la inclusión de algunos minerales.

## 2. OBJETIVO

El objetivo global de este trabajo, como se ha adelantado durante la introducción, es estudiar las principales alteraciones o procesos de meteorización a los que estuvo sometido el meteorito lunar NWA 11273.

Este estudio permite trasladar los conocimientos generados acerca de las alteraciones de este meteorito a otros elementos del Patrimonio Natural, expuestos a condiciones iguales o similares. Con ello, se aportarán datos científicos sobre los que se podrán tomar medidas para su conservación y preservación de cara a un futuro.

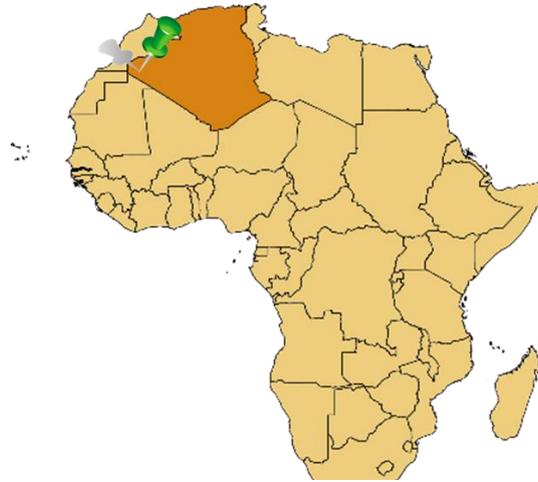
Para alcanzar este objetivo, se planteó la aplicación exclusiva de metodologías no destructivas, que trabajen de un modo colaborativo, ya que es de vital importancia conservar la muestra, porque es única. Las técnicas seleccionadas fueron la Fluorescencia de Rayos X, para determinar la composición elemental del meteorito, y la espectroscopía Raman con el fin de definir la composición molecular del mismo. De esta forma, la información derivada del uso de las dos técnicas iba a ser utilizada de forma complementaria al Trabajo Fin de Grado<sup>24</sup> anteriormente mencionado, con el propósito de obtener la mayor información posible tanto de los procesos originales como de los de alteración. Analizando dichas alteraciones y estableciendo relaciones entre las distintas fases minerales encontradas, se pretenden asignar las alteraciones a los sucesos a los que se ha visto sometido el meteorito, para que, tras intentar estudiar otros ejemplares, la identificación sea más inmediata.

## 3. PARTE EXPERIMENTAL

### 3.1. Descripción de la muestra

La muestra analizada en este trabajo ha sido una de la colección de meteoritos de la que dispone el grupo de investigación IBeA. Se trata del fragmento 625 del meteorito lunar NWA 11273, encontrado en abril de 2017 en el desierto del noroeste de África (North West Africa, NWA), concretamente en Tindouf, Argelia (Imagen 4), suministrado por Erick Twelker (<http://meteoritemarket.com/>) de la International Meteorite Collectors Association (IMCA).

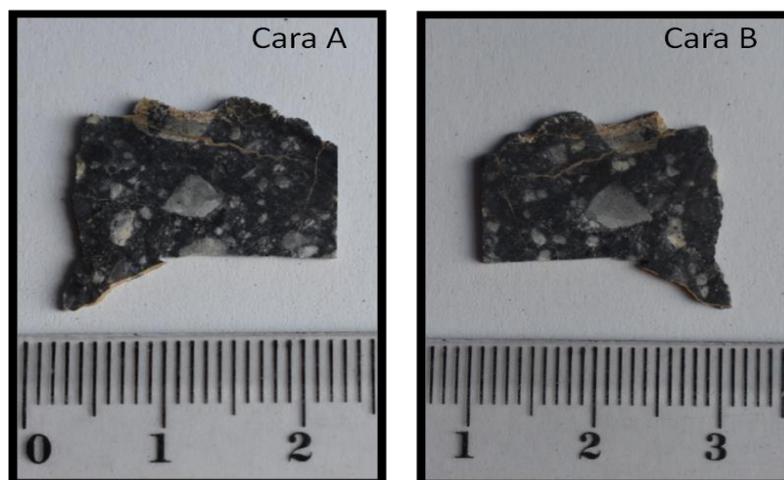
**Gestión del paisaje. Patrimonio, territorio y ciudad**  
**Paisaiaren kudeaketa. Ondarea, lurraldea eta hiria**  
**Landscape management. Heritage, territory and city**



*Imagen 4. Localización de Tindouf en el continente africano. Imagen creada con QGIS.*

La masa total del meteorito fue de 2.81 Kg y se clasificó como brecha feldespática por The Meteoritical Society<sup>28</sup>. En este trabajo se ha analizado el fragmento 625, caracterizado por ser una lámina fina de dimensiones 2.1x1.9 cm y por pesar 0.61 g, suponiendo un 0.02 % de la masa total del meteorito.

Observando la Imagen 5, se puede apreciar que la muestra posee fragmentos heterogéneos de color gris claro embebidos en una sección más oscura. Esta característica corrobora que se trata de una brecha, ya que esta se define como un conjunto de fragmentos de roca, con una morfología angular, cementados por una fina matriz que normalmente es vítrea o de diferente composición que los granos<sup>29</sup>.



*Imagen 5. Muestra 625 del meteorito lunar NWA 11273 perteneciente al grupo de investigación IBeA.*

Sabiendo que se trata de una brecha feldespática, se puede deducir que el material proviene del conjunto de materiales de la superficie lunar, conocido como regolito.

Sin embargo, la geomorfología de la Luna consiste en el movimiento de material desde sus profundidades hasta la superficie y viceversa, como consecuencia de los numerosos impactos que recibe. Es por ello que, en el regolito, en donde predominan los feldespatos, puedan coexistir minerales propios del manto lunar, como son los piroxenos y los olivinos.

### 3.2. Arena del desierto sahariano

Para la identificación de las diferentes alteraciones es de gran importancia conocer el material en el que se ha encontrado el meteorito. En este caso, el espécimen se encontró en el desierto del Sáhara, concretamente en Tindouf (Argelia).



*Imagen 6. Arena de Marruecos recogida en un viaje de ocio.*

Con el fin de conocer diferentes parámetros fisicoquímicos para este trabajo, se utilizó una muestra de arena/suelo (Imagen 6) perteneciente al desierto del Sahara al sur de Marruecos, próximo a Tindouf. En este caso, la arena juega un papel muy importante en la meteorización de la muestra objeto de estudio, ya que es donde se ha encontrado durante años, con lo que conocer parámetros como el pH, los iones solubles o el potencial redox, ayudará a establecer los procesos que se mencionan en los objetivos.

Además de arena, el suelo del desierto contiene diferentes compuestos provenientes de deposición seca o húmeda que jugarán roles importantes en las reacciones con el meteorito. Ante la necesidad de caracterizar los aerosoles saharianos, Rocha-Lima y colaboradores<sup>30</sup> llevaron a cabo los experimentos que se muestran en la Imagen 7 en Sahel y en el suroeste africano (AMMA, DABEX, DOBO y BoDEx) entre 2005 y 2007, en Marruecos y Cabo Verde (SAMUM) entre 2006 y 2008 y, finalmente, en Argelia y Mauritania (Fennec) entre 2011 y 2012.

**Gestión del paisaje. Patrimonio, territorio y ciudad**  
**Paisaiaren kudeaketa. Ondarea, lurraldea eta hiria**  
**Landscape management. Heritage, territory and city**

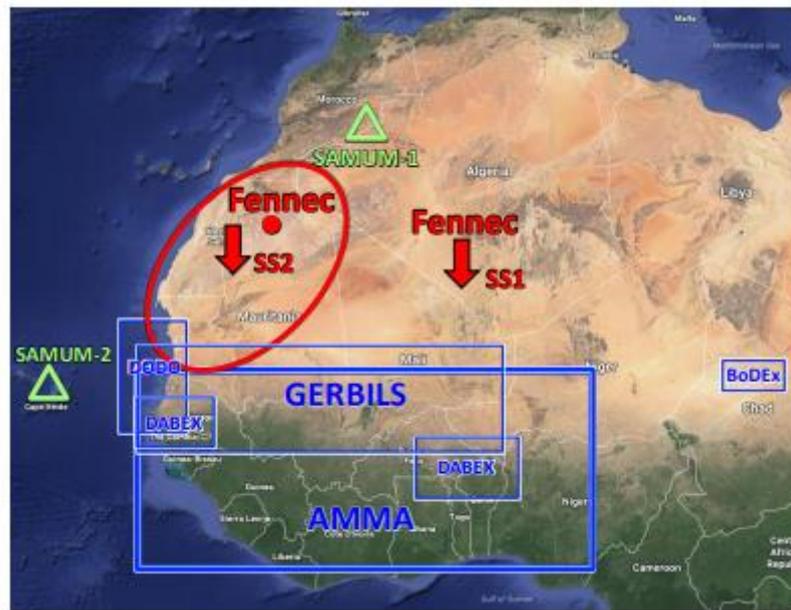


Imagen 7. Áreas del noroeste africano en donde se han llevado a cabo análisis del polvo sahariano. Los primeros proyectos están marcados en azul; los SAMUM en verde y, los Fennec en rojo. Los Fennec analizaron el polvo sahariano de Argelia (SS1) y de Mauritania (SS2)<sup>30</sup>.

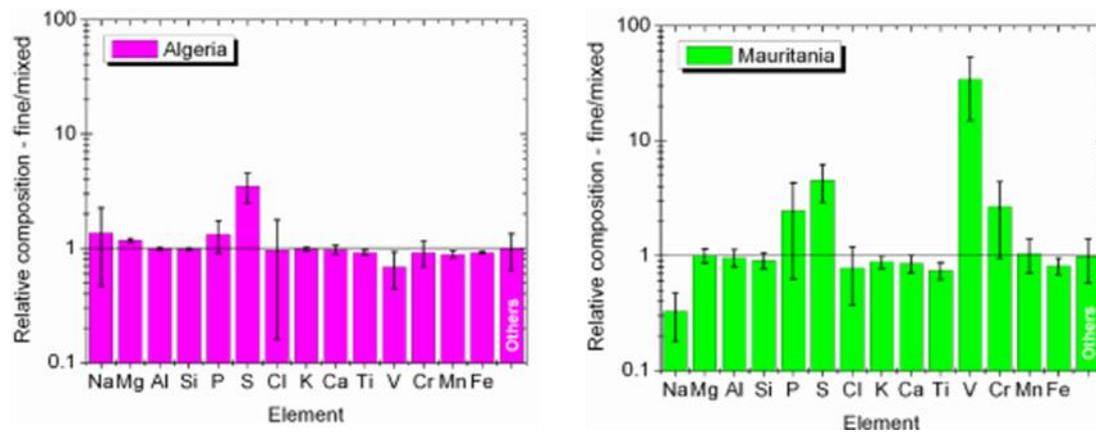


Imagen 8. Composición relativa elemental en escala logarítmica de cada elemento en las muestras obtenidas de Argelia y analizadas mediante la fluorescencia de rayos X por energía dispersa (EDXRF)<sup>30</sup>.

En los experimentos Fennec se analizaron 150 muestras aleatorias con el espectrómetro EDXRF Epsilon 5 Pan Analytical en la Universidad de Sao Paulo en Brasil. La Imagen 8 muestra la composición relativa elemental tanto de las muestras SS1 como SS2 obtenida mediante el análisis de muestras por fluorescencia de rayos X por energía dispersiva (EDXRF)<sup>30</sup> que servirá de apoyo para interpretar los resultados obtenidos en este trabajo.

**Gestión del paisaje. Patrimonio, territorio y ciudad**  
**Paisaiaren kudeaketa. Ondarea, lurraldea eta hiria**  
**Landscape management. Heritage, territory and city**

3.3. Instrumentación

3.3.1. Determinación del pH y el potencial Redox de la arena del Sáhara.

Para llevar a cabo la interpretación de resultados obtenidos fue necesario conocer el pH y el potencial redox de la muestra de arena disponible. Para ello se empleó el pH-metro micropH 2000 de CRISON, ver Imagen 9; provisto del electrodo Crison 52-02 para realizar las medidas de pH con el electrodo de referencia AgCl. También está provisto del electrodo Crison 52-61 de platino para las medidas de potencial redox, el cual usa también el electrodo de referencia de AgCl.

El electrodo 52-02 debe ser calibrado antes de las mediciones, para ello se emplearon las soluciones tampón pH 7.02 y 4.00 (a 20 °C). Por el contrario, el 52-61 no requiere calibración. Ambos electrodos tienen un campo de trabajo que va desde los 0 hasta los 80°C.



*Imagen 9. MicropH-metro 2000 de la marca Crison, con el electrodo 52-02 de medida del pH acoplado en el brazo móvil del instrumento.*

Mediante el uso de dichos electrodos, se midió el pH y el potencial redox de la arena del Sáhara para poder usar dichos valores en la elaboración de los diagramas termodinámicos. Para ello, se siguió la norma UNE-ISO 10390 <sup>31</sup>, usando una suspensión 1:5 de suelo en agua como disolvente, lo que viene siendo 5 g de arena en 25 mL de agua. Las medidas se hicieron

**Gestión del paisaje. Patrimonio, territorio y ciudad**  
**Paisaiaren kudeaketa. Ondarea, lurraldea eta hiria**  
**Landscape management. Heritage, territory and city**

a 25 °C y sobre una placa agitadora. Finalmente se obtuvo un pH de 9.45 y un potencial redox de 490 mV.

### 3.3.2. Modelado químico y termodinámico

Con el fin de predecir las reacciones que dieron lugar a los compuestos identificados, se llevaron a cabo modelos termodinámicos usando diagramas de equilibrios químicos e información acerca de las constantes de equilibrio incluidos en el programa académico gratuito HYDRA (Hydrochemical Equilibrium-Constant) y con la Versión del software Medusa 32 (Make Equilibrium Diagrams Using Sophisticated Algorithms)<sup>32</sup> del Royal Institute of Technology de Estocolmo, Suecia. Medusa está basado en algoritmos Solgaswater<sup>33</sup> y HALTAFALL<sup>34</sup>.

### 3.3.3. QGIS

Para geolocalizar la zona donde se encontró el meteorito se hizo uso del programa QGIS 2.18.27. Se trata de un Sistema de Información Geográfica (GIS), es decir, definido como un sistema de hardware, software y procedimientos diseñados para realizar la captura, almacenamiento, manipulación, análisis, modelización y presentación de datos referenciados espacialmente para la resolución de problemas complejos de planificación y gestión<sup>35</sup>.

Para cartografiar la zona se añadió la capa vectorial del continente africano a partir del American Association of Petroleum Geologists<sup>36</sup>.

### 3.3.4. M4 Tornado (Bruker)

Como se ha mencionado anteriormente, la composición elemental del meteorito se llevó a cabo mediante espectrometría de micro-fluorescencia de rayos X por energía dispersiva (m-ED-XRF). El equipo utilizado fue el M4 TORNADO (Bruker) que permite detectar elementos químicos con un número atómico (Z) superior a 10 (empezando por el sodio), ver Imagen 10. Este equipo dispone de dos tubos de rodio (Rh) refrigerados con aire como fuente de obtención de rayos-X.

Uno de los tubos permite trabajar en el rango de voltaje de 10 a 50 keV y de corriente de 100

**Gestión del paisaje. Patrimonio, territorio y ciudad**  
**Paisaiaren kudeaketa. Ondarea, lurraldea eta hiria**  
**Landscape management. Heritage, territory and city**

a 700 mA. Está montado sobre un colimador mecánico, permitiendo medir bajo una resolución lateral/espacial (punto) de 1 mm.

El segundo tubo de rodio trabaja entre los 10 y 50 keV y entre 100 y 600 mA. La lente policapilar consigue una resolución lateral de 25  $\mu\text{m}$  para la línea  $K\alpha$  del Mo.

La radiación fluorescente emitida por los elementos se recoge en un detector SSD que tiene un área de 30  $\text{mm}^2$  y una energía de 142 eV para la línea  $K\alpha$  del Mn.

El sistema permite trabajar en condiciones de vacío para mejorar la detección de elementos ligeros ( $Z < 16$ ). Con el objetivo de estabilizar el vacío en la cámara del espectrómetro donde se localiza la muestra a 20 mbar, se usa una bomba de diafragma MV 10 N VARIO-B.



*Imagen10. Espectrómetro de micro-fluorescencia de rayos X por energía dispersa (mED-XRF), M4 TORNADO.*

### 3.3.5. Micro-espectrómetro Raman Renishaw InVia

El micro-espectrómetro Raman Renishaw inVia (Renishaw, UK), ver Imagen 11, está equipado con dos láseres de excitación de diodos de 785 y 532 nm, así como con un detector CCD refrigerado por efecto Peltier. La potencia nominal de la fuente se puede modular para evitar la termo-descomposición de la muestra, usando entre un 0.0001 % y un 100 % de la potencia total. Este espectrómetro permite la realización de imagen Raman, lo que nos ayudó a conocer la distribución de los compuestos en la masa meteorítica.

**Gestión del paisaje. Patrimonio, territorio y ciudad**  
**Paisaiaren kudeaketa. Ondarea, lurraldea eta hiria**  
**Landscape management. Heritage, territory and city**

Este equipo se debe calibrar antes de las medidas, ajustando la banda de  $520\text{ cm}^{-1}$  correspondiente al silicio. Para ello se debe hacer un correcto enfoque con el microscopio y sus objetivos de 5x, 20x y 50x.

El rango espectral en este caso va desde los  $60\text{ cm}^{-1}$  y puede alcanzar los  $7000\text{ cm}^{-1}$ , dependiendo del objetivo del análisis, y con una resolución de  $1\text{ cm}^{-1}$ .

Los datos se obtuvieron gracias al software Wire™ 4.2 (Renishaw, UK)<sup>37</sup> y se pudieron interpretar haciendo uso de bases de datos de minerales puros, así como de la plataforma online, como RRUFF<sup>38</sup>.

Los espectros Raman son herramientas potencialmente útiles para determinar la estructura, composición y estabilidad de los compuestos presentes en la muestra a analizar.



*Imagen 11. Micro-espectrómetro Raman, Renishaw inVia (Renishaw, UK).*

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Caracterización de la muestra

#### 4.1.1. Identificación de nuevos minerales por espectroscopia Raman

Antes de comenzar a establecer posibles orígenes de los minerales detectados hasta el momento con el fin de conocer las diferentes alteraciones que habían sufrido, se procedió a completar la caracterización de la muestra con la misma metodología empleada en el anterior trabajo<sup>24</sup>, pero de forma más exhaustiva.

En la presente caracterización se identificaron los minerales que se muestran a continuación, además de los identificados previamente.

- Anatasa

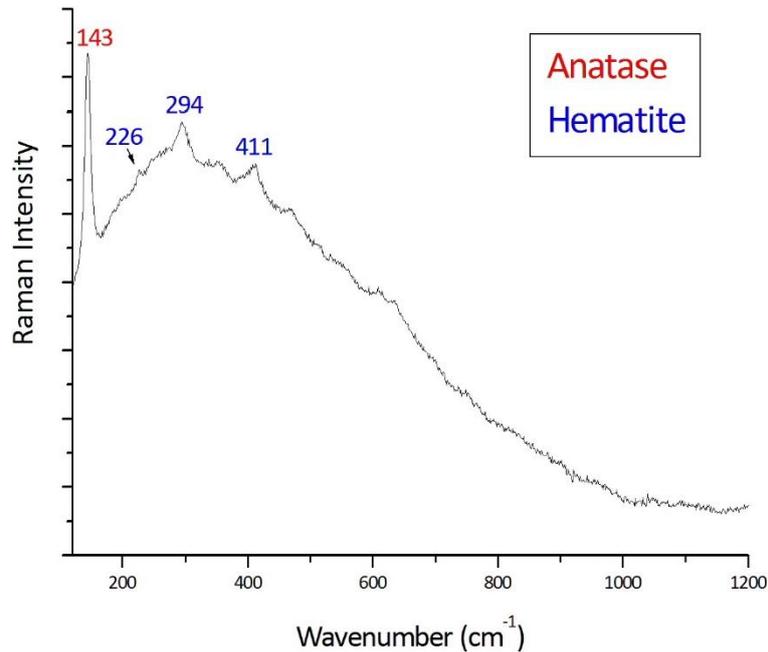
La anatasa [TiO<sub>2</sub>] es un óxido de titanio muy abundante en la naturaleza.

Por lo general, la anatasa es un mineral secundario proveniente de la alteración de otros minerales de titanio. Existen diferentes polimorfos del óxido de titanio además de la anatasa, como son el rutilo y la brookita.

A día de hoy no se ha identificado anatasa en la Luna, por lo que podría no tratarse de un mineral original en el meteorito.

Según la base de datos RRUFF<sup>38</sup>, la banda Raman principal de la anatasa aparece a 143 cm<sup>-1</sup>, mientras que las secundarias son débiles, apareciendo a 390, 510 y 634 cm<sup>-1</sup>. En el espectro de la Imagen 12 tan solo se ve la banda principal la cual se utilizó para la identificación de este mineral.

**Gestión del paisaje. Patrimonio, territorio y ciudad**  
**Paisaiaren kudeaketa. Ondarea, lurraldea eta hiria**  
**Landscape management. Heritage, territory and city**



*Imagen 12. Espectro Raman de la anatasa, junto a la hematita.*

- Cuarzo

El cuarzo [SiO<sub>2</sub>] es el mineral más común de la corteza terrestre, siendo uno de los componentes mayoritarios de las rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas. Comúnmente, se le conoce como sílice y supone más de un 95 % de los componentes de la arena<sup>39</sup>.

Aunque sea uno de los minerales más abundantes en la Tierra, junto con el feldespato de potasio (KAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>), se trata de un mineral poco común en la Luna<sup>39</sup>. La presencia de cuarzo de hecho es una de las principales diferencias mineralógicas existentes entre la Luna y la Tierra. La deficiencia de sílice en el satélite es el resultado de varios factores. Por un lado, en la Luna no ha habido evolución geoquímica (reacciones redox, ácido-base, etc.) como sí ha ocurrido en el planeta, a excepción de la formación de una corteza anortosítica. Por otro lado, carece de sistemas hidratados que puedan cristalizar la sílice como ocurre en la Tierra<sup>39</sup>.

De acuerdo a lo publicado en la base de datos Raman RRUFF<sup>38</sup>, la banda Raman principal del cuarzo aparece a 465 cm<sup>-1</sup>, mientras que las secundarias más intensas aparecen en torno a 128, 205, 264 y 355 cm<sup>-1</sup>. Dicho mineral no se ha encontrado (al tamaño del enfoque del

microscopio Raman) de forma pura en el meteorito, sino que siempre va acompañado de otros compuestos, como lo son la hematita o el olivino (Imagen 13).

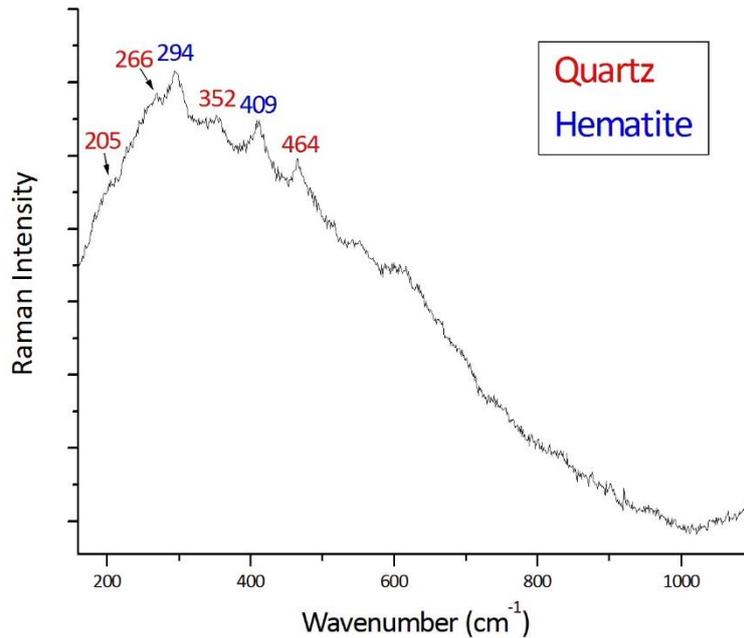


Imagen 13. Espectro Raman del cuarzo, junto con la hematita.

- Troilita

Dos minerales que también se suelen encontrar en la Luna y que reflejan el ambiente altamente reductor y levemente anóxico bajo el cual se formaron los minerales lunares, son el hierro metálico [Fe<sup>0</sup>] y la troilita [FeS]<sup>39</sup>.

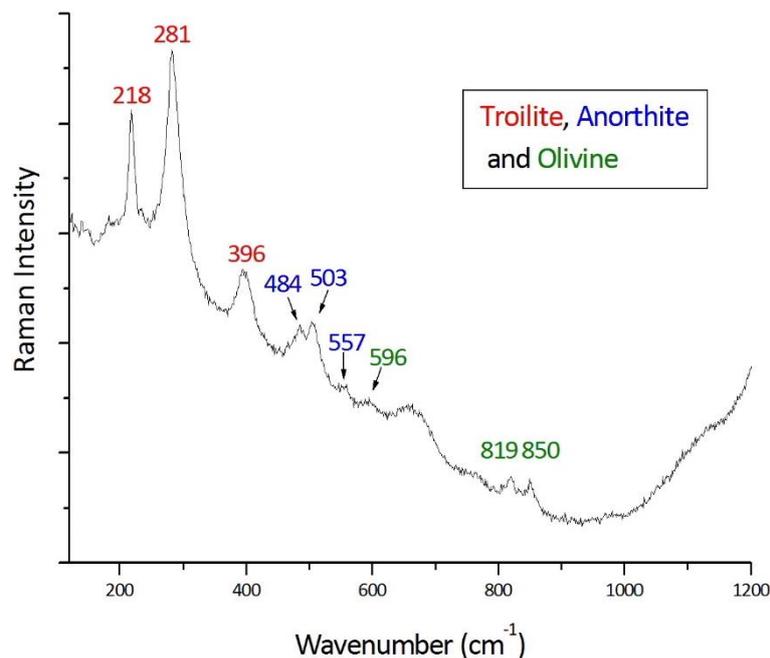
El hierro metálico suele ir acompañado de pequeñas cantidades de níquel y de cobalto. Mientras que la troilita es el sulfuro más habitual en las rocas lunares. Esta suele estar asociada con otros minerales, como lo son la ilmenita [FeTiO<sub>3</sub>] y la espinela [MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>]<sup>39</sup>.

Donde más se encuentra este mineral es en los basaltos lunares. En función de su proceso de formación, se puede diferenciar la troilita primaria de la secundaria. La primaria se forma inmediatamente al solidificarse materiales fundidos con las cantidades adecuadas de azufre. Mientras que la troilita secundaria, también conocida como troilita de impacto, se forma más

**Gestión del paisaje. Patrimonio, territorio y ciudad**  
**Paisaiaren kudeaketa. Ondarea, lurraldea eta hiria**  
**Landscape management. Heritage, territory and city**

tarde, en la roca sólida, cuando los impactos de meteoritos generan una alta presión y temperatura, oxidando el hierro elemental y haciéndolo reaccionar con el azufre<sup>39</sup>.

Xie *et al.*<sup>40</sup> publicaron las bandas Raman principales de la troilita, afirmando que aparecían a 218, 283 y 398  $\text{cm}^{-1}$ . Estas bandas coinciden con las obtenidas experimentalmente en la Imagen 14 lo que sirvió para la identificación de dicha fase mineral en la presente muestra.



*Imagen 14. Espectro Raman de la troilita, junto a otras bandas Raman como las de la anortita y el olivino.*

- Ilmenita

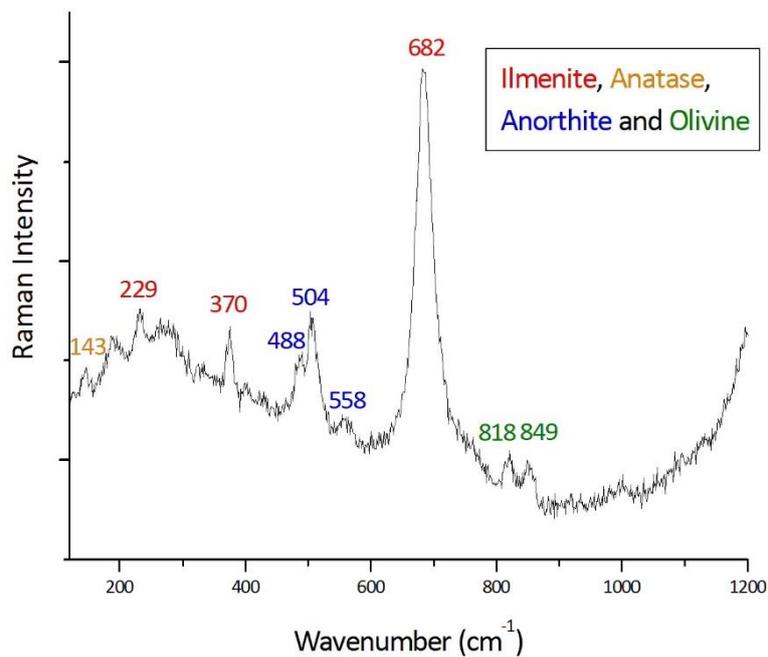
Los siguientes minerales más abundantes en la Luna, tras los silicatos, son los óxidos de varios metales. Entre ellos, el más abundante es la ilmenita [(Fe,Mg)TiO<sub>3</sub>], que es un mineral negro y opaco que refleja el mayor contenido de TiO<sub>2</sub> de los mares basálticos de la Luna<sup>39</sup>. Además, supuso entre el 15 y el 20 % en volumen de la mayoría de las muestras recogidas en las misiones Apolo 11 y 17<sup>39</sup>.

Su elevada presencia en la Luna se debe a que se forma fácilmente a partir de espinelas ricas en titanio en un ambiente bajo de oxígeno. Asimismo, es uno de los minerales sobre los que más se está estudiando, ya que a partir de él se puede producir el oxígeno necesario como

**Gestión del paisaje. Patrimonio, territorio y ciudad**  
**Paisaiaren kudeaketa. Ondarea, lurraldea eta hiria**  
**Landscape management. Heritage, territory and city**

para que los humanos puedan vivir en una base lunar<sup>39</sup>. Es por ello por lo que la NASA continúa buscando zonas ricas en ilmenita en la superficie lunar, mediante el uso del telescopio Hubble Space<sup>39</sup>.

Tan *et al.*<sup>41</sup> publicaron que las bandas Raman principales de la ilmenita son 683, 368 y 225  $\text{cm}^{-1}$ , coincidentes con las que muestra el espectro experimental de la Imagen 15.



*Imagen 15. Espectro Raman de la ilmenita, junto a la anatasa y otros compuestos muy abundantes en la Luna, la anortita y el olivino.*

- Enstatita

La enstatita [ $\text{MgSiO}_3$ ] es un mineral de la clase de los silicatos que pertenece concretamente a la familia de los ortopiroxenos. Existe una familia de meteoritos conocidos como las enstatita-condritas, que se caracterizan por estar constituidos principalmente por olivino y piroxeno. Son muy escasos y están relacionados directamente con el origen del Sistema Solar<sup>42</sup>.

El componente mayoritario del meteorito lunar NWA 11273 es la anortita, como ya se vio anteriormente<sup>24</sup>, por lo que, aunque posea enstatita no se puede incluir en dicha familia de meteoritos.

El hecho de que se detectase baja presencia de enstatita hace pensar que dicho mineral se haya formado posteriormente, ya que se suele formar en rocas metamórficas con alto contenido en hierro.

De acuerdo con lo publicado por Jung *et al.*<sup>43</sup> las bandas del espectro Raman de la enstatita son 129, 234, 338, 396, 436, 535, 659, 680, 746, 860, 938 y 1007  $\text{cm}^{-1}$ , coincidentes con las experimentales de la Imagen 16.

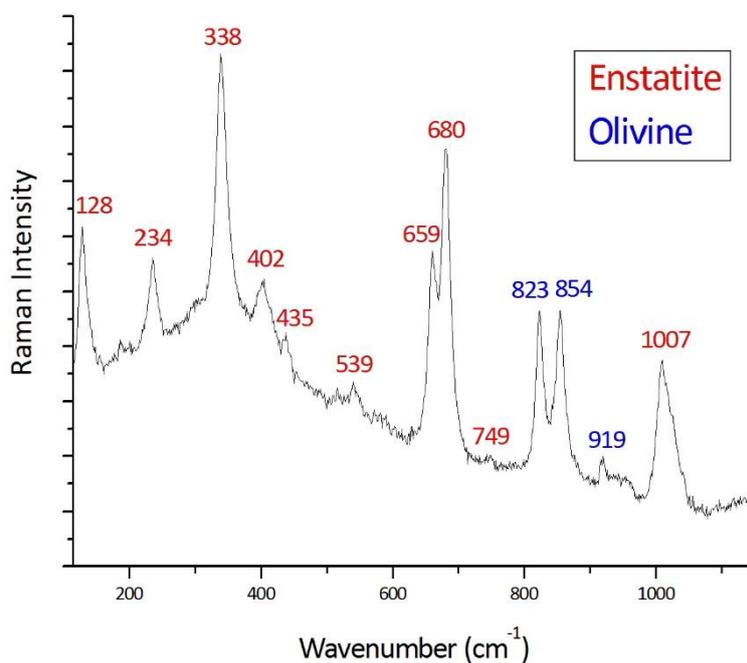


Imagen 16. Espectro Raman de la enstatita, junto a bandas propias del olivino.

A continuación, y basándonos en los compuestos identificados por espectroscopia Raman, se estudian las diferentes alteraciones que pueden estar teniendo lugar en la muestra meteórica estudiada.

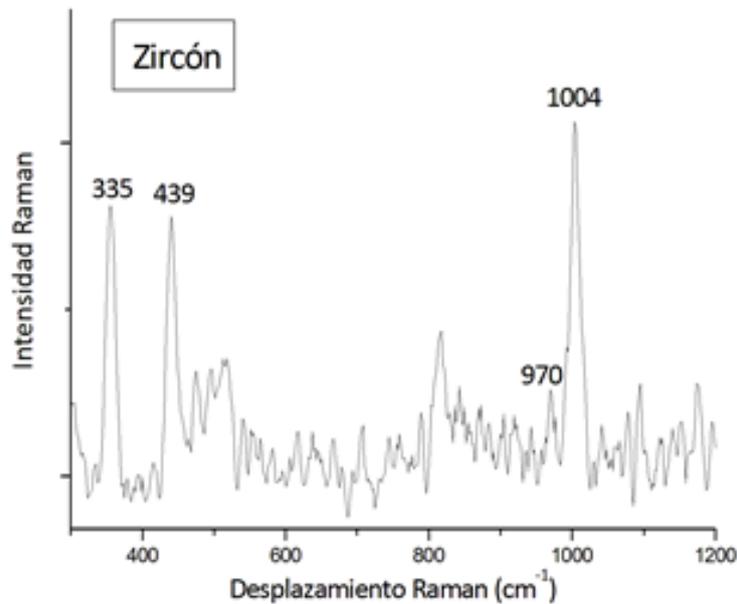
#### 4.2. Alteraciones por presión

El zircón encontrado en los trabajos anteriores no es un zircón común, ya que de acuerdo con el trabajo realizado por Zhang *et al.*<sup>44</sup>, la banda Raman principal debería aparecer a 1008  $\text{cm}^{-1}$  y las secundarias a 335, 439 y 975  $\text{cm}^{-1}$ . Sin embargo, como bien se puede observar en la Imagen 17, la banda principal del zircón encontrado en el meteorito se encuentra desplazada.

**Gestión del paisaje. Patrimonio, territorio y ciudad**  
**Paisaiaren kudeaketa. Ondarea, lurraldea eta hiria**  
**Landscape management. Heritage, territory and city**

Dicha variación indica que se trata de un zircón de impacto<sup>44</sup>, es decir, un zircón cuya estructura cristalina se ha visto modificada respecto a la original por acción de las altas presiones. La espectroscopia Raman permite calcular la presión a la que un zircón ha sido sometido en función del desplazamiento de su banda principal.

De esta forma, el zircón es una de las pocas fases minerales que permiten revelar la presión con la que los meteoritos salen de su planeta, asteroide o satélite originario, como consecuencia de la colisión con otro cuerpo celeste ya que su estructura varía con la presión. Por ello, el zircón se puede utilizar como marcador de presión en los meteoritos.



*Imagen 17. Espectro Raman del zircón de impacto, junto a las bandas de la anortita y olivino.*

Una presión superior a los 30 GPa provocaría el inicio de la transformación del zircón a reidita [polimorfo de alta presión del  $ZrSiO_4$ ], mientras que el cambio completo tendría lugar a los 53 GPa<sup>45</sup>. Dicha alteración se manifiesta en el espectro Raman con la desaparición de la banda a  $1008\text{ cm}^{-1}$ <sup>44</sup>.

Como experimentalmente tan sólo se observa que la banda principal del zircón se desplaza a  $1004\text{ cm}^{-1}$ , se puede decir que no se ha iniciado la transformación a reidita, sino que sigue siendo zircón de impacto.

Según Gucsik *et al.*<sup>46</sup>, por cada 10 GPa de presión, la banda principal baja su número de onda en el espectro Raman dos unidades (en  $\text{cm}^{-1}$ ). Dicha relación se cumple hasta los 40 GPa, presión a la que la banda característica del zircón desaparece por la formación de reidita.

Como la diferencia entre la banda principal del zircón natural ( $1008 \text{ cm}^{-1}$ ) y del zircón de impacto identificado en el meteorito NWA 11273 ( $1004 \text{ cm}^{-1}$ ) es de  $4 \text{ cm}^{-1}$ , se puede concluir que el meteorito fue sometido a una presión de aproximadamente 20 GPa, propia de un impacto suficiente para que materiales lunares sean proyectados al espacio exterior.

Como consecuencia de la alta presión a la que se vio sometido el meteorito, algunas de las fases minerales originarias de la Luna se han visto alteradas, generando así fases minerales secundarias, como se va a exponer a continuación.

#### 4.2.1. Alteración de olivinos por presión

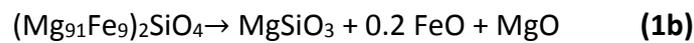
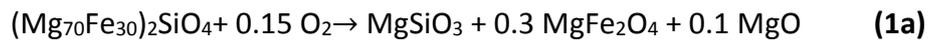
Uno de los minerales que se ha visto alterado debido a la presión es el olivino, que es considerado uno de los principales componentes del manto terrestre y uno de los minerales más estables a temperatura y presión ambiental. Sin embargo, existen experimentos que demuestran que los olivinos terrestres sometidos a altas presiones como 12 GPa, equivalentes a 360 km de profundidad, y altas temperaturas, reducen drásticamente su resistencia, transformándose a otras fases minerales como sorosilicatos [ $\text{Si}_2\text{O}_7^{6-}$ ], wadsleyites [ $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ ], ringwoodite [ $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ ], etc<sup>47</sup>.

La temperatura a la que se producen dichas transformaciones puede variar desde los 600 hasta los 3700 °C, temperaturas propias del manto terrestre y que aumentan al aumentar la profundidad. Por el contrario, la temperatura lunar puede alcanzar los 127 °C cuando recibe directamente radiación solar y los -173 °C cuando más alejada del Sol se encuentra<sup>48,49</sup>. Como consecuencia de la baja temperatura que alcanza la Luna en comparación con la alcanzada en las profundidades de nuestro planeta, las transformaciones vistas anteriormente no son posibles.

Sin embargo, en el meteorito lunar NWA 11273 se ha podido observar que cuando los olivinos más susceptibles, es decir, los que se encuentran más próximos a la corteza de fusión, son

**Gestión del paisaje. Patrimonio, territorio y ciudad**  
**Paisaiaren kudeaketa. Ondarea, lurraldea eta hiria**  
**Landscape management. Heritage, territory and city**

sometidos a presiones próximas a los 20 GPa, su estructura interna varía hasta transformarse a enstatita [MgSiO<sub>3</sub>]. Por lo que los olivinos ricos en magnesio detectados en los trabajos anteriores (principalmente (Mg<sub>70</sub>Fe<sub>30</sub>)<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>)<sup>24</sup>, al ser sometidos a una presión de 20 GPa, se podrían transformar a enstatita, magnesioferrita [MgFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>] y óxido de magnesio [MgO] o a enstatita, óxido de hierro [FeO] y óxido de magnesio. **(Reacción 1)**



La hipótesis establecida como reacción 1 tiene como base el espectro Raman de la Imagen 15, donde se puede apreciar la presencia simultánea de enstatita y olivino, obtenido en el margen de un grano de olivino cercano a la corteza de fusión. Desafortunadamente, la alta concentración de olivinos en proceso de alteración, así como la alta concentración de enstatita, imposibilita ver las bandas Raman de los otros compuestos, ya que enmascara sus señales.

La diferencia entre la reacción 1a y 1b se reduce al momento en el que ocurre dicha reacción. La reacción de degradación del olivino podría ocurrir en la superficie Lunar por el impacto del asteroide (momento de formación de meteorito), con lo cual se daría en condiciones anóxicas (Reacción 1b). En cambio, podría ocurrir de igual manera en la atmósfera terrestre dándose, por lo tanto, en presencia de oxígeno (Reacción 1a).

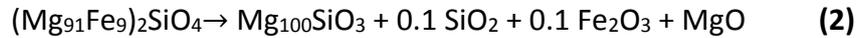
### 4.3. Alteraciones por oxidación

La entrada del meteorito en un ambiente oxidante, como lo es la atmósfera terrestre, provoca que algunos minerales se oxiden a fases minerales más estables.

#### 4.3.1. Oxidación del óxido ferroso

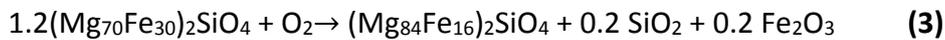
Una vez el meteorito entre en la atmósfera terrestre, la Reacción 1b no se quedaría tal cual, sino que el óxido ferroso se oxidaría a hematita [Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>], un mineral muy estable en

condiciones terrestres. Por ello, la posible reacción final de la alteración de los olivinos más susceptibles en el meteorito a enstatita se puede ver en la **Reacción 2**.



#### 4.3.2. Oxidación de olivinos

Los olivinos, además de la alteración que pueden sufrir por la presión, pueden verse altamente oxidados. La reacción de oxidación que se propone en este trabajo es la mostrada en la **Reacción 3**.



Como también ocurriría con el óxido ferroso generado en la alteración por presión, el FeO tiende a oxidarse, generando un producto más estable en condiciones terrestres, la hematita.

Dicha alteración se puede observar en la Imagen 18, en donde las bandas del olivino restante aparecen en naranja, las de la hematita en verde y la del cuarzo en morado. El hecho de que las bandas del cuarzo no se vean tan intensas como las de la hematita, teniendo en cuenta que se han generado en la misma concentración, hace pensar que se trata de un cuarzo menos cristalino o más amorfo. De ahí, que las bandas Raman no se puedan observar del mismo modo que se observan con la hematita.

El poco producto generado de cuarzo y de hematita en la Reacción 3 hace que las bandas Raman de estos compuestos sean bastante menos intensas que las de los olivinos que, además, se encuentran distribuidos por toda la muestra.

La diferencia de intensidades entre el cuarzo y la hematita se podría deber a que la hematita presente en la zona donde se realizó el análisis no perteneciese únicamente a la oxidación de los olivinos, sino que también pudiera proceder de la oxidación del hierro metálico que se encontraba distribuido por toda la muestra. Este efecto sumatorio de aportaciones de hematita se ve reflejado en una mayor intensidad de las bandas Raman de esta respecto del cuarzo.

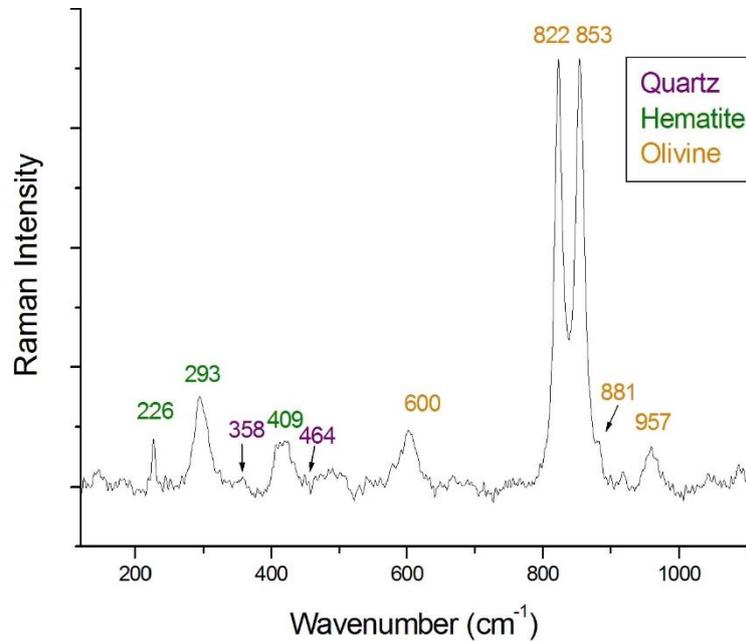
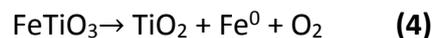


Imagen 18. Espectro Raman de alteración de los olivinos por un ambiente oxidante. En naranja están marcadas las bandas Raman del olivino, en morado las del cuarzo y en verde las de la hematita.

#### 4.3.3. Oxidación de ilmenita

Como bien se ha comentado anteriormente, se están realizando varios estudios optimizando las condiciones y las necesidades para obtener oxígeno a partir de la ilmenita, ya que con ello se pretenden crear bases lunares donde la gente pueda vivir y trabajar en suelos ricos en dicho mineral. Por ello, McKay et al.<sup>50</sup> afirmaban que la ilmenita se podía reducir a anatasa y a hierro metálico, junto con la liberación de oxígeno. Todo ello en condiciones de altas temperaturas, superiores a 1150 °C, siguiendo la **Reacción 4**.



Teniendo en cuenta que la temperatura que alcanzan los meteoros en la atmósfera es superior a los 2000 ° y que nuestra atmósfera es característica por tener un 21 % de oxígeno en el aire<sup>49</sup>, la reacción propuesta por los científicos sería posible. Sin embargo, la alta presencia de oxígeno obliga a oxidar el hierro metálico hasta hematita, generando la **Reacción 5**.



**Gestión del paisaje. Patrimonio, territorio y ciudad**  
**Paisaiaren kudeaketa. Ondarea, lurraldea eta hiria**  
**Landscape management. Heritage, territory and city**

Para comprobar cuál era la fase mineral más estable en la degradación de la ilmenita, se calculó el diagrama termodinámico de fracciones del hierro a un potencial de 490 mV (potencial obtenido del análisis de la muestra de arena del Sáhara). En la Imagen 19, se puede observar como a un pH de 9.45 la fase mineral más estable (sin considerar las fases cristalinas para no distorsionar el cálculo) corresponde a la del oxihidróxido de  $\text{Fe}^{3+}$ . Este compuesto de hierro en estado de valencia 3 se transformará a hematita con la temperatura.

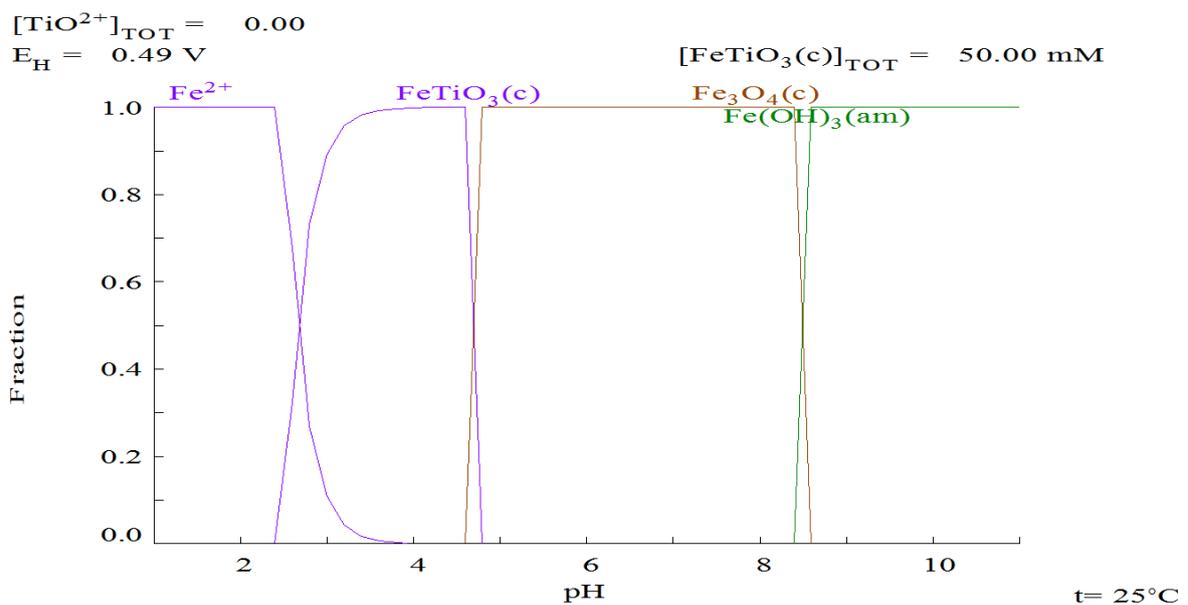


Imagen 19. Diagrama de fracciones del hierro.

Además, esta hipótesis se ve de nuevo afirmada por la identificación de los tres compuestos mencionados en la Reacción 5 en el mismo espectro Raman. La Imagen 20 muestra cómo casi toda la ilmenita (azul) se ha transformado en anatasa (rojo) y en hematita (verde), de ahí que la banda principal de la ilmenita sea tan débil, ya que el área bajo las bandas Raman están directamente relacionada con la concentración del compuesto.

En la Imagen 20 se puede apreciar cómo la ilmenita prácticamente se oxidó al completo a anatasa y a hematita, ya que la intensidad de sus bandas es mínima en comparación con la ilmenita pura que se identificó en la Imagen 15.

El hecho de que una ilmenita se oxide y otra en menor medida se debe, principalmente, a la posición en donde se encontraba. Es decir, la oxidada se encontraba más cercana a la corteza

de fusión, siendo sometida a mayores temperaturas en la fase meteoro, que la ilmenita que se encontraba en el interior del meteorito.

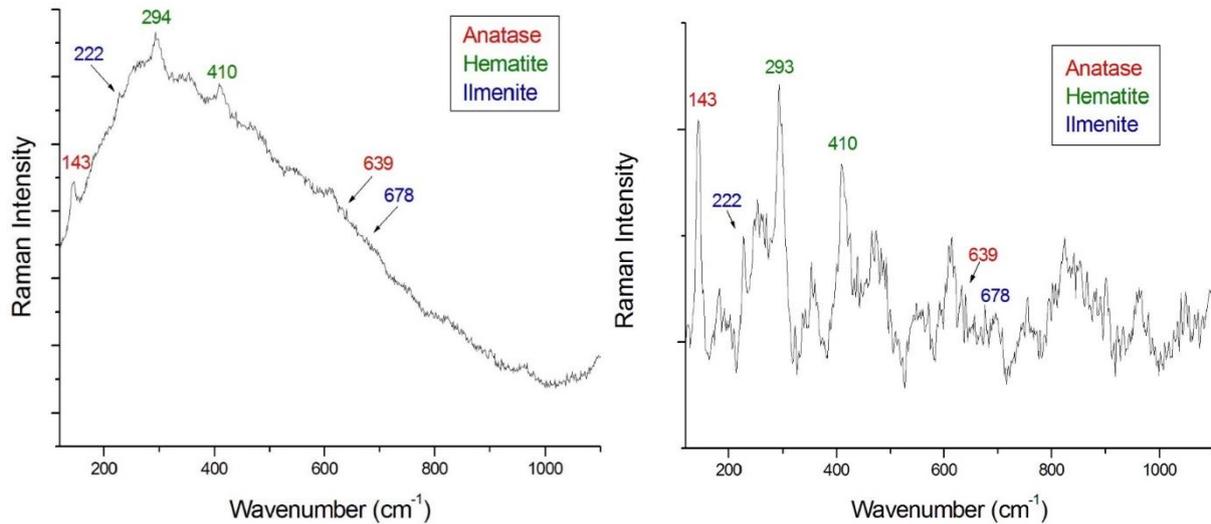


Imagen 20. Espectros Raman de alteración de la ilmenita por un ambiente oxidante obtenido en la muestra analizada. Las bandas Raman de la ilmenita aparecen en azul, las de la anatasa en rojo y las de la hematita en verde. (A) Espectro Raman sin línea base. (B) Espectro Raman con línea base.

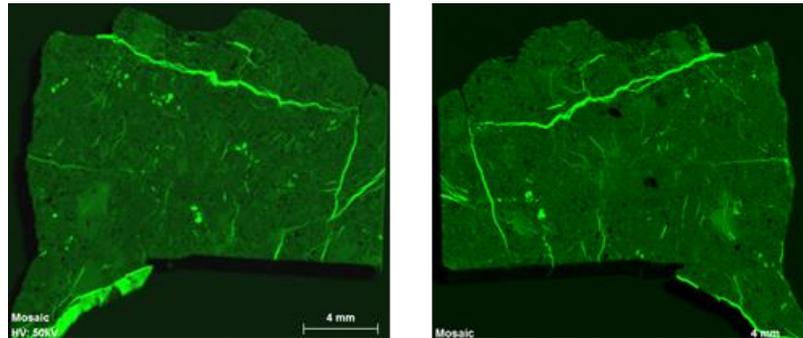
#### 4.4. Meteorización terrestre debido a iones disueltos

Una gran parte de los procesos de meteorización de los meteoritos es el producido por la incorporación de carbonatos y sulfatos terrestres a través del agua que penetra en los poros y grietas del meteorito.

##### 4.4.1. Precipitación de calcita

En la muestra objeto de este trabajo se encontró en el trabajo previo<sup>24</sup> una alta presencia del carbonato de calcio, concretamente de calcita. Sin embargo, la distribución de calcio en la superficie de la muestra no es homogénea ya que su presencia se encuentra reducida a las grietas o venas del meteorito (Imagen 21).

**Gestión del paisaje. Patrimonio, territorio y ciudad**  
**Paisaiaren kudeaketa. Ondarea, lurraldea eta hiria**  
**Landscape management. Heritage, territory and city**



*Imagen 21. Imágenes XRF del calcio distribuido por ambas caras del meteorito lunar NWA 11273. La presencia de calcio viene determinada por el color verde. Una mayor intensidad de color indica una alta concentración, mientras que las zonas más oscuras son las más deficientes de calcio.*

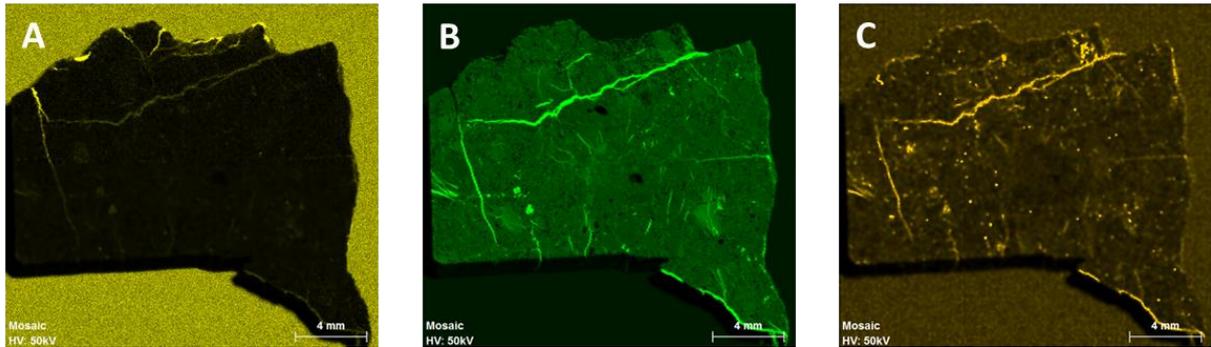
La presencia de calcita en esas grietas se puede explicar por la existencia de iones calcio y bicarbonato en el agua de meteorización. El CO<sub>2</sub> atmosférico (no deja de ser un ácido) neutraliza las fases alcalinas de la arena del desierto disolviendo distintos elementos. Como se ha visto anteriormente en la arena de Argelia los elementos más abundantes son: sodio, magnesio, fósforo, azufre, cloro, calcio y potasio. Al penetrar esa agua con iones disueltos en el meteorito y evaporarse (por las altas temperaturas del desierto), empezará la precipitación de aquellas fases minerales más insolubles y que alcance antes su condición de saturación. La presencia de calcita indica que esas aguas deben ser “ricas” en calcio y bicarbonato disueltos.

#### 4.4.2. Precipitación de otros elementos

A parte de la entrada de calcio a través de las grietas del meteorito, también se observó la entrada de otros dos elementos, el potasio y el azufre.

Observando las imágenes XRF 22 B,C se puede observar que el calcio y el azufre coexisten en varias zonas, por lo que se analizaron esas regiones mediante espectroscopia Raman con el fin de encontrar uno de los minerales terrestres más comunes, el yeso [CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O]. Sin embargo, la presencia de yeso no pudo ser confirmada por espectroscopia Raman. Desafortunadamente, tampoco fue posible detectar ningún otro sulfato por lo que la presencia de los mismos en la zona de las grietas se debe considerar a nivel de trazas, quedando sus señales Raman enmascaradas por la alta cantidad de calcita.

**Gestión del paisaje. Patrimonio, territorio y ciudad**  
**Paisaiaren kudeaketa. Ondarea, lurraldea eta hiria**  
**Landscape management. Heritage, territory and city**



*Imagen 22. Imágenes XRF de la distribución de potasio (A), calcio (B) y azufre (C) en la cara B del meteorito.*

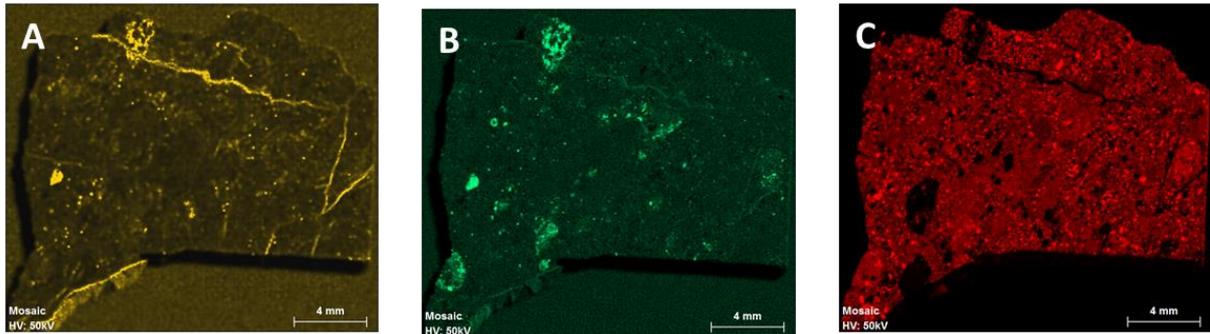
Por otro lado, también se puede observar cómo en las grietas donde existe potasio, no hay calcio, y viceversa (Imágenes 22 A,B). Este hecho podría estar relacionado con el tamaño de los respectivos iones y, en consecuencia, con la movilidad de los mismos. Es decir, el catión de potasio que es más grande que el de calcio, no conseguiría entrar al interior del meteorito, quedándose en las grietas más externas. Sin embargo, el catión de calcio, al ser más pequeño y móvil conseguiría entrar a zonas más profundas.

#### 4.4.3. Meteorización por sulfato

En el TFG anterior<sup>24</sup>, la presencia de cierto sulfato había sido identificado mediante espectroscopia Raman, pero no se pudo asignar con certeza debido a la falta de bandas secundarias. Sin embargo, los modelos termodinámicos calculados sugirieron que, bajo las condiciones del medio donde se hallaba la muestra, los compuestos más probables eran la retgersite [ $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ] y la rozenite [ $\text{FeSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ]. Además, la banda principal de ambos compuestos (987 y 991  $\text{cm}^{-1}$  respectivamente) podían encajar con el espectro obtenido en el meteorito (Imagen X).

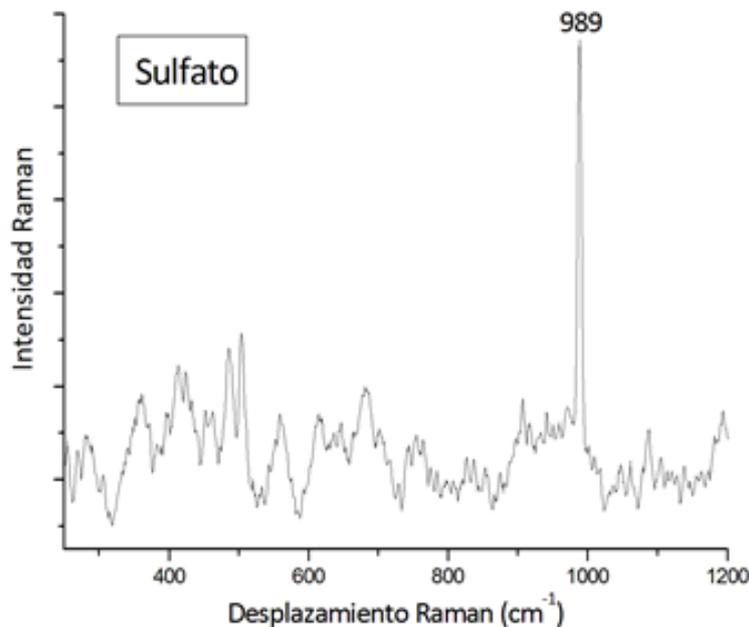
La existencia de retgersite es coherente, ya que mediante XRF se detectó la presencia de varias zonas donde coexisten claramente el azufre con el níquel (Imagen 23 A,B). Posiblemente las zonas donde coexisten fueron áreas con mayor espacio donde el sulfato pudo precipitar tras entrar por las grietas.

**Gestión del paisaje. Patrimonio, territorio y ciudad**  
**Paisaiaren kudeaketa. Ondarea, lurraldea eta hiria**  
**Landscape management. Heritage, territory and city**



*Imagen 23. Imágenes XRF de la distribución de azufre (A), níquel (B) y hierro (C) en la cara A del meteorito.*

Lo mismo ocurrió entre el azufre y el hierro, aunque fue menos notorio que en el caso anterior. Es decir, como se ha explicado anteriormente, la muestra destacaba por ser una mezcla de varios minerales, pero los mayoritarios fueron la anortita, los piroxenos y los olivinos. Tanto los piroxenos como los olivinos poseían hierro, de ahí que se distribuyera por casi toda la muestra. Sin embargo, en zonas puntuales, muy pequeñas, se observaron coexistencias entre el azufre, el hierro y el níquel, de ahí que en los espectros Raman (Imagen 24) se pudieran ver pequeños hombros en la banda principal del sulfato, debido a la mezcla de compuestos.



*Imagen 24. Espectro Raman del sulfato encontrado en los trabajos anteriores<sup>24</sup>.*

## 5. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha completado la caracterización geoquímica del meteorito lunar NWA 11273 mediante dos técnicas analíticas no destructivas complementarias. La primera fue la fluorescencia de rayos X, siendo una de las técnicas pioneras en el estudio de los elementos extraterrestres. Mientras que la segunda técnica fue la Espectroscopia Raman, que se trata de la técnica más innovadora nunca antes empleada en ninguna misión espacial y que irá acoplada por primera vez a los futuros rovers que aterrizarán en Marte en el año 2020, en las misiones *MARS 2020* y *EXOMARS 2020*.

Sin embargo, el objetivo principal del trabajo no consistía meramente en identificar los minerales integrantes del meteorito, sino establecer ciertas relaciones entre ellos para poder explicar los diferentes procesos de alteración que puede sufrir el patrimonio natural.

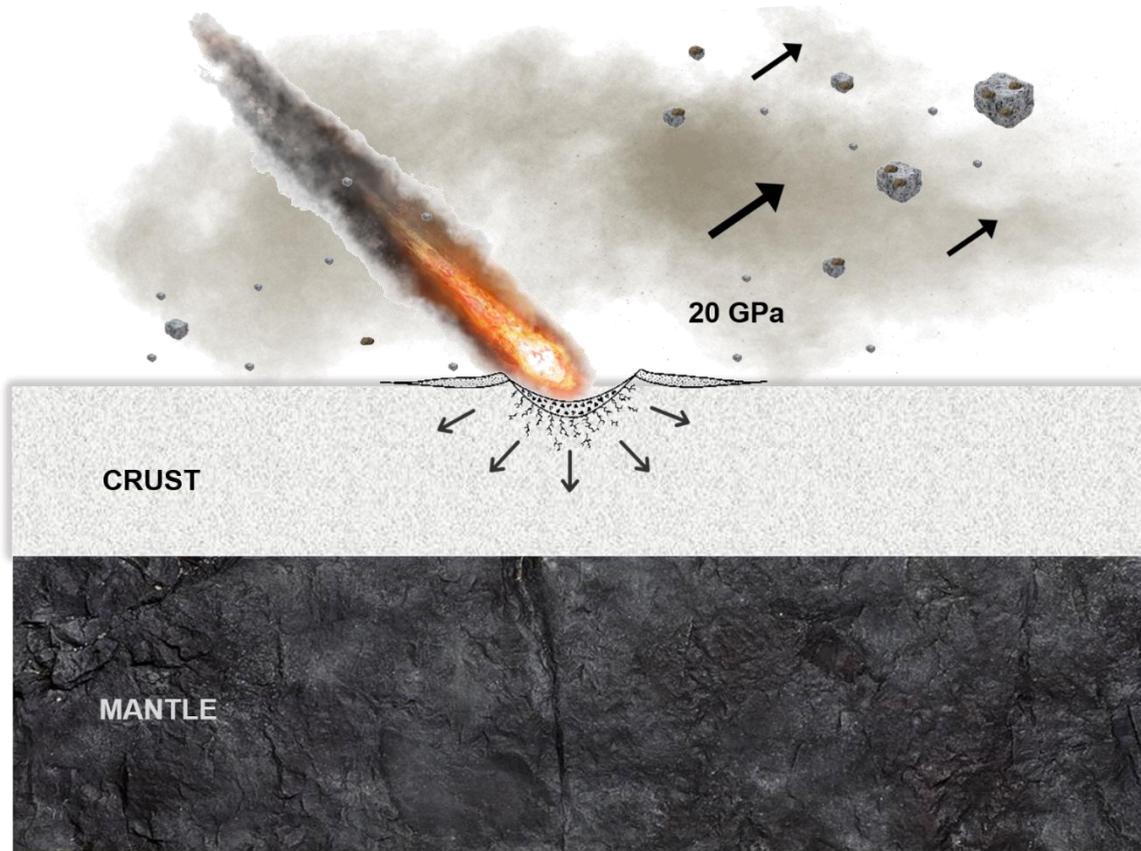
Del mismo modo, era objetivo del trabajo, dejar patente que las condiciones ambientales terrestres pueden dejar su impronta en cualquier tipo de patrimonio, ya que la carbonatación es un proceso bastante común en la Tierra.

De haber empleado técnicas de análisis destructivo se podrían haber identificado otros minerales de alteración a lo largo de las grietas del meteorito. No obstante, el hecho de que se trate de un ejemplar único imposibilita destruir la muestra y, además, en este trabajo se demuestra que las técnicas espectroscópicas no destructivas junto con estudios de simulación son suficientes para obtener conclusiones en materiales extraterrestres.

Uno de los datos más importantes obtenidos en este trabajo fue el conocimiento de la presión con la que el meteorito lunar NWA 11273 salió de la Luna, tras ser impactada por otro cuerpo celeste. El proceso de eyección se puede observar en la Imagen 25.

Como consecuencia de los 20 GPa de presión a los que se vio sometida la muestra, algunos minerales se vieron alterados, como lo son algunos olivinos, meteorizándose a enstatita, magnesioferrita, óxido de magnesio y/o óxido ferroso.

**Gestión del paisaje. Patrimonio, territorio y ciudad**  
**Paisaiaren kudeaketa. Ondarea, lurraldea eta hiria**  
**Landscape management. Heritage, territory and city**



*Imagen 25. Imagen de elaboración propia donde se puede observar cómo un cuerpo celeste impactó contra la Luna generando el meteorito ante el cual hoy nos encontramos. La presión de salida fue de 20 GPa.*

Otra de las alteraciones identificadas fue la oxidación de los minerales más susceptibles, debido al cambio de ambiente del meteorito, pasando de reductor a uno oxidante. Dicho cambio fue ligado a altas temperaturas, lo que catalizó el proceso de oxidación de la ilmenita a anatasa y a hematita. Además de oxidar otros olivinos, produciendo un olivino menos rico en hierro, hematita y cuarzo.

La tercera familia de alteraciones observada fue la meteorización terrestre debida a la entrada de iones disueltos a través de las aguas de infiltración. En este grupo entran aquellas alteraciones que afectan a cualquier tipo de Patrimonio Natural, especialmente si se encuentra a la intemperie y, en condiciones de pH y temperatura, iguales o similares a las que se encontró el meteorito estudiado. La principal de ellas fue la carbonatación, en donde el agua bicarbonatada entró en las profundidades de la muestra y, tras evaporarse el agua, dejó como precipitado a la calcita que, debido posiblemente a su alta concentración impidió

**Gestión del paisaje. Patrimonio, territorio y ciudad**  
**Paisaiaren kudeaketa. Ondarea, lurraldea eta hiria**  
**Landscape management. Heritage, territory and city**

identificar mediante espectroscopia Raman otros minerales de calcio y azufre, elementos que coexistían en las imágenes XRF. Otro elemento que entró por las mismas grietas que el calcio, fue el potasio, pero al tratarse de ser un catión más voluminoso, su menor movilidad hizo que precipitase principalmente en las grietas más externas, a diferente del calcio que lo hacía también en las internas.

Los últimos minerales que se identificaron fueron la rozenita y la retgersita, los sulfatos hidratados de hierro y níquel, respectivamente. Aunque se observó una mezcla de ambos, la retgersita predominaba frente a la rozenita.

Con la realización de este trabajo se espera que la información generada se pueda trasladar a otro tipo de Patrimonio que esté sujeto a condiciones iguales o similares que la muestra estudiada. De esta forma, y conociendo las alteraciones más comunes, se podrían tomar medidas y decisiones en lo que respecta a la conservación y preservación del Patrimonio de cara a un futuro.

Sería interesante que con este trabajo se generara la curiosidad y la necesidad de crear planes de protección del Patrimonio Meteorítico presente en Museos y Centros de Investigación.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- [1]: Letters of Note: Why explore Space? <http://bit.ly/2QPPnQj> (visitado 05/06/2019).
- [2]: Burns, J. O.; Mellinkoff, B.; Spydell, M.; Fong, T.; Kring, D. A.; Pratt, W. D.; Cichan, T. and Edwards, C. M. *Acta Astronaut.* **2019**, 154, 195-203.
- [3]: Schmetz, J.; Pili, P.; Tjemkes, S.; Just, D.; Kerkmann, J.; Rota, S. and Raiter, A. *B Am. Meteor. Soc.* **2002**, 83, 977-992.
- [4]: Thomas, R. J.; Starr, R. and Crannell, C. J. *Sol. Phys.* **1985**, 95, 323-329.
- [5]: Pacheco, H. A.; Cevallos, R. X. and Vines, C. J. *Espacios.* **2019**, 40, 6.
- [6]: Running, S. W.; Nemani, R. R.; Heinsch, F. A.; Zhao, M.; Reeves, M. and Hashimoto, H. *Bioscience.* **2004**, 54, 547-560.
- [7]: 50 Years Ago: Apollo 8 in Lunar Orbit. NASA. <https://go.nasa.gov/2FjU3JS> (visitado 20/06/2019).
- [8]: NationalGeographic. <https://bit.ly/2Hr7Kdz> (visitado 06/06/2019).
- [9]: BOE núm. 31. Convenio Europeo del Paisaje, 2008. <http://bit.ly/31QghGk> (visitado 17/06/2019).
- [10]: Rull, F.; Martínez-Frías, J. *Macla: Revista de la Sociedad Española de Mineralogía.* **2006**, 4/5, 25-30.
- [11]: Martínez-Frías, J.; Lunar, R.; Rull, F. *Macla: Revista de la Sociedad Española de Mineralogía.* **2006**, 4/5, 19-24.
- [12]: NASA Science. Earth's Moon. About the Moon. <https://go.nasa.gov/2K69pWc> (visitado 11/06/2019).
- [13]: The American Heritage Science Dictionary; Houghton Mifflin Harcourt, 2005.

**Gestión del paisaje. Patrimonio, territorio y ciudad**  
**Paisaiaren kudeaketa. Ondarea, lurraldea eta hiria**  
**Landscape management. Heritage, territory and city**

- [14]: Bischoff, A. *Planet. Space Sci.* **2001**, 49, 769-776.
- [15]: Classification Chart of meteorites. Petrographic thin section program. NASA. <https://go.nasa.gov/2ZfetLu> (visitado 11/06/2019).
- [16]: Department of Earth and Planetary Sciences. Washington University in St. Louis. <http://bit.ly/2luj1Ha> (visitado 20/06/2019).
- [17]: Korotev, R. L. *Chem. Erde-Geochem.* **2005**, 65, 297-346.
- [18]: Hughes, D. W. *Meteoritics.* **1981**, 16, 269-281.
- [19]: Brault, M.; Matthews, H. D. and Mysak, L. A. *Earth Syst. Dynam.* **2017**, 8, 455-475.
- [20]: Zurfluh, F. J. Quantification of terrestrial weathering and contamination in meteorites recovered in the Sultanate of Oman. Ph. D. Thesis, University of Bern, Bern, Switzerland, 2012.
- [21]: Bland, P. A.; Zolensky, M. E.; Benedix, G. K. and Sephton, M. A. Weathering of chondritic meteorites. *Meteorites and the Early Solar System*; Ed. Lauretta, D. S. and McSween, H. Y.: University of Arizona Press, 2006; Vol. 2, pp 853-867.
- [22]: Al-Kathiri, A.; Hofmann, B. A.; Jull, A. J. T. and Gnos, E. *Meteorit. Planet. Sci.* **2005**, 40, 1215-1239.
- [23]: Bland, P. A.; Sexton, A. S.; Jull, A. J. T.; Bevan, A. W. R.; Berry, F. J.; Thornley, D. M.; Astin, T. R.; Britt, D. and Pillinger, C. T. *Geochim. Cosmochim. Ac.* **1998**, 62, 3169-3184.
- [24]: Huidobro, J. Caracterización del meteorito lunar NWA 11273 por medio de técnicas analíticas no destructivas empleadas en misiones espaciales. TFG, Universidad del País Vasco, Leioa, 2018.
- [25]: Torre-Fdez, I.; Aramendia, J.; Gómez-Nubla, L.; Castro, K. and Madariaga, J. M. *J Raman Spectrosc.* 2017, 48, 1536-1543.

**Gestión del paisaje. Patrimonio, territorio y ciudad**  
**Paisaiaren kudeaketa. Ondarea, lurraldea eta hiria**  
**Landscape management. Heritage, territory and city**

[26]: Bellucci, J. J.; Nemvhin, A. A.; Grange, M.; Robinson, K. L.; Collins, G.; Whitehouse, M. J.; Snape, J. F.; Norman, M. D. and Kring, D. A. *Earth Planet. Sc. Lett.* **2019**, 510, 173-185.

[27]: Nagata, T. N.; Sugiura, N.; Fisher, R. M.; Schwerer, F. C.; Fuller, M. and Dunn, J. R. *Geochim. Cosmochim. Ac.* **1974**, 3, 3019-3043.

[28]: The Meteoritical Society. Lunar and Planetary Institute. <http://bit.ly/2Kcenkc> (visitada 11/06/2019).

[29]: Shukla, M. K.; Sharma, A. *Solid Earth.* **2018**, 3, 50-59.

[30]: Rocha-Lima, A.; Martins, J. V.; Remer, L. A.; Todd, M.; Marsham, J. H.; Engelstaedter, S.; Ryder, C. L.; Cavazos.Guerra, C.; Artaxo, P.; Colarco, P. and Washington, R. *Atmos. Chem. Phys.* **2018**, 18, 1023-1043.

[31]: ISO 10390. <http://bit.ly/2Neb1zA> (visitado 27/06/2019).

[32]: Puigdomenec, I. MEDUSA (Make Diagrams Using Sophisticated Algorithms), version 15; Department of Inorganic Chemistry, The Royal Institute of Technology; Stockholm, Sweden. <http://www.kth.se/che/medusa> (visitado 20/06/2019).

[33]: Eriksson G, An algorithm for the computation of aqueous multicomponent, multiphase equilibria. *Anal. Chim. Acta*, **1979**, 112, 375-383.

[34]: Ingri N, Kakolowicz W, Sillén L G, Warnqvist B, High-speed computers as a supplement to graphical methods - V. HALTAFALL, a general program for calculating the composition of equilibrium mixtures. *Talanta*, **1967**, 14, 1261-1286. Errata: 15(3) (1968) xi-xii.

[35]: SIG Geocities. <http://bit.ly/2XAsNkF> (visitado 27/06/2019).

[36]: Africa Shapefile. The American Association of Petroleum Geologists. <http://bit.ly/2XEHz9O> (visitado 27/06/2019).

[37]: Raman Software Wire™ 4.2 (Renishaw, UK) <http://bit.ly/2IsX38I> (visitado 20/06/2019).

**Gestión del paisaje. Patrimonio, territorio y ciudad**  
**Paisaiaren kudeaketa. Ondarea, lurraldea eta hiria**  
**Landscape management. Heritage, territory and city**

- [38]: Search RRUFF Sample Data. <http://rruff.info/> (visitado 20/06/2019).
- [39]: Heiken, G. H.; Vaniman, D. T. and French, B. M. Lunar Sourcebook; Cambridge University Press: Cambridge, 1991.
- [40]: Xie, X. and Chen, M. Suizhou Meteorite: Mineralogy and Shock Metamorphism; Springer: China, 2016.
- [41]: Tan, W.; Liu, P.; He, H.; Wang, C. Y. and Liang, X. *Can. Mineral.* **2016**, 54, 539-553.
- [42]: Jacquet, E.; Alard, O. and Gounelle, M. *Meteorit. Planet. Sci.* **2015**, 50, 1624-1642.
- [43]: Jung, H.; Lee, J.; Ko, B.; Jung, S.; Park, M.; Cao, Y. and Song, S. *Tectonophysics*, **2013**, 594, 91-102.
- [44]: Zhang, M.; Salje, E. K. H.; Farnan, I.; Graeme-Barber, A.; Daniel, P.; Ewings, R. C.; Clark, A. M.; Leroux, H. J. *Phys. Condens. Matter.* 2000, 12, 1915-1925.
- [45]: Gucsik, A.; Koeberl, C.; Brandstätter, F.; Reimold, W. U. and Libowitzky, E. *Earth Planet. Sc. Lett.* **2002**, 202, 495-509.
- [46]: Gucsik, A.; Zhang, M.; Koeberl, C.; Salje, E. K. H.; Redfern, S. A. T. and Pruneda, J. M. *Mineral. Mag.* **2004**, 68, 801-811.
- [47]: Smyth, J. R.; Frost, D. J.; Nestola, F.; Holl, C. M. and Bromiley, G. *Geophys. Res. Lett.* **2006**, 33: L15301.
- [48]: Christensen, U. *Annu. Rev. Earth Pl. Sc.* **2003**, 23, 65-88.
- [49]: Lunar and Earth temperature. Space.com. <http://bit.ly/2NcBi1p>(visitado 26/06/2019).
- [50]: McKay, D. S. and Williams, R. J. NASA. *Ames Res. Center Space Resources and Space Settlements.* **1979**, 19790024068, 243-255.

**Gestión del paisaje. Patrimonio, territorio y ciudad**  
**Paisaiaren kudeaketa. Ondarea, lurraldea eta hiria**  
**Landscape management. Heritage, territory and city**



## Resumen/Laburpena/Summary

En el Trabajo Fin de Máster “PROCESOS GEOQUÍMICOS DE ALTERACIÓN EN EL PATRIMONIO NATURAL: las especificidades del Meteorito Lunar NWA 11273” se han resuelto los principales objetivos planteados.

El primero era completar la caracterización geoquímica del meteorito mediante dos técnicas analíticas no destructivas complementarias, la micro-fluorescencia de rayos X y la espectroscopia Raman. Con ellas se identificaron los minerales: anortita, olivino, piroxeno, zircón, hematita, calcita, camacita, anatasa, cuarzo, ilmenita, troilita, ilmenita, enstatita, rozenita y retgersita.

El segundo consistía en estudiar las principales alteraciones o procesos de meteorización a los que se había visto sujeto el Patrimonio Natural, concretamente, el meteorito lunar NWA 11273. Para ello se establecieron relaciones entre las distintas fases minerales encontradas a lo largo de la caracterización. Pudiéndose distinguir tres tipos de alteraciones: las de por presión, por oxidación y por meteorización terrestre. La posición de la banda principal de zircón reveló que se trataba de un zircón de impacto y que el meteorito salió eyectado de la Luna con una presión de 20 GPa. Esta presión provocó la meteorización de algunos olivinos a, principalmente, enstatita, entre otros minerales secundarios.

Debido a la entrada del meteorito en una atmósfera oxidante, algunos minerales se oxidaron, como lo hizo la ilmenita, generando anatasa y hematita. Así mismo, algunos de los olivinos que quedaron sin alterarse debido a la presión, se oxidaron generando como subproductos cuarzo y hematita.

Finalmente, se detectaron algunas de los procesos de meteorización terrestre más comunes, como lo son la precipitación de carbonato cálcico en forma de calcita y la generación de sulfatos.

Se pretende trasladar la información generada acerca de las alteraciones del meteorito lunar NWA 11273 a cualquier tipo de patrimonio sometido a condiciones iguales o similares que la muestra estudiada.

