

Space Resources on the Moon and Space Mining

Gustavo Jamanca-Lino, Magister^{1,2}

¹Universidad Privada del Norte, Cajamarca, Perú gustavo.jamanca@upn.pe

²Space Resources Program, Colorado School of Mines, Golden USA, giamancalino@mines.edu

Abstract— Space mining is the biggest challenge of the 21st century. The existence of resources such as volatiles and oxides, metals, and water discovered in recent years on the Moon, Mars, and near-Earth asteroids indicates that their grade would reach sufficient levels to supply raw materials for future human settlements in the solar system. Although these issues have been widely addressed in the last 50 years, technical information in Spanish is scarce for the Hispanic community. This document is based on an extensive systematic review spanning from 1987 to 2022 and includes distribution maps of the major resources on the Moon. The article explains the main challenges in the prospecting stage as well as the limitations for excavation and transport, such as low temperatures (50°C) or topography (slopes > 25°). The summary includes details of the main routes for the recovery of water, oxygen, and metals, as well as the metallurgical conditions for obtaining water and oxygen (for example, temperature: 200K to 2000K). It is concluded that there is an important technological advance to enable the extraction of materials on the moon and that we are close to seeing the first operational units on its surface.

Keywords—Space Mining, Space Resources, Lunar Mining, Lunar minerals, ISRU

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).

ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).

DO NOT REMOVE

Recursos Espaciales en la Luna y Minería Espacial

Resumen— La minería espacial es el mayor desafío del siglo XXI. La existencia de recursos como volátiles y óxidos, metales y agua descubiertos en los últimos años en la Luna, Marte y asteroides cercanos a la Tierra indican que su grado alcanzaría niveles suficientes para suministrar materias primas para futuros asentamientos humanos en el sistema solar. Aunque estos temas han sido ampliamente abordados en los últimos 50 años, la información técnica en español es escasa para la comunidad hispana. Este documento se basa en una extensa revisión sistemática que abarca desde 1987 hasta 2022 e incluye mapas de distribución de los principales recursos en la Luna. El artículo explica los principales retos en la etapa de prospección, así como las limitaciones para la excavación y transporte, como las bajas temperaturas (<50°C), o la topografía (pendientes > 25°). El resumen incluye, el detalle de las principales rutas de recuperación de agua, oxígeno y metales, así como las condiciones metalúrgicas para la obtención de agua y oxígeno (por ejemplo: temperatura: 200K a 2000K). Se concluye que existe un avance tecnológico importante para viabilizar la extracción de materiales en la Luna, y que estaríamos próximos a ver las primeras unidades operativas en su superficie.

Palabras claves—Minería Espacial, Recursos Espaciales, Minería Lunar, Minerales lunares, ISRU

I. INTRODUCCION

Es importante definir que son los recursos espaciales. Un concepto sencillo lo explica como “todo aquello aprovechable que podamos usar en el espacio” [1], [2]; esto incluye a aquellos materiales (metales, minerales, gases) y/o condiciones (temperatura, energía, vacío) que son factibles de ser usados por el hombre con la tecnología actual y que tienen un potencial impacto económico al suplir la necesidad de un cliente específico. Esta definición limita la ubicación de recursos espaciales al espacio comprendido entre la Tierra y Marte, incluyendo a la Luna y los asteroides que transitan en esta área, siempre que estos recursos se encuentren directamente en la superficie, a una profundidad que sean factibles de alcanzar por nuestra tecnología, y que estén alineados a los planes de las agencias espaciales o empresas privadas.

La necesidad de estos recursos está enlazada con la demanda creciente de materiales para nuestra sociedad y la dependencia que tenemos de la tecnología, como el acceso a la televisión, internet, uso del GPS, entre otros; lo cual nos insta a enviar cada año más vehículos al espacio, y que necesitan grandes cantidades de combustible para operar. En adición, están los planes de las principales agencias espaciales para llevar al hombre de regreso a la Luna durante esta década (Ver Figura 1) e instalar un asentamiento humano en Marte durante

este siglo. Ambas demandas tienen costos muy altos que solo pueden ser viabilizados, a través del uso de recursos *in situ*, (también llamado “*in situ resources utilization*” o ISRU), es decir, extraer y procesar materiales en la Luna y Marte para satisfacer la necesidad de esta materia prima a los futuros astronautas [3], además de suplir combustible para los vehículos espaciales que orbitan en el espacio Cislunar (entre la Tierra y la Luna) [4], y abastecer a nuestra sociedad de nuevos y promisorios elementos que puedan usarse para mejorar nuestra calidad de vida en nuestro planeta disminuyendo el impacto ambiental causado por nuestra sociedad. El objetivo de esta investigación es revisar el contenido científico generado en los últimos años, para presentar los recursos lunares, el estado del arte de la minería lunar, y las potenciales tecnologías en desarrollo.



Figura 1. Representación artística de las futuras bases de Minería en la Luna. Créditos: Agencia Espacial Europea ESA [2]

II. METODOLOGIA

La metodología está basada en una revisión sistemática de los artículos publicados como “full papers” e indexados en bases de datos como Scopus, así como informes técnicos publicados por las agencias espaciales. La búsqueda ha usado Google Scholar para seleccionar artículos que lleven las palabras claves de “space mining”, “lunar minerals”, “lunar metals”, “ISRU”, “lunar excavation”; “lunar oxygen Production”, entre otros. En general, se usaron solo palabras en el idioma inglés para la búsqueda luego de confirmar la carencia de recursos en el idioma español. Para acceder a las fuentes bibliográficas se seleccionaron artículos publicados entre los años 1987 – 2022. En general, una búsqueda rápida muestra se encontraron más de 98 400 títulos que responden a este criterio. Los artículos fueron filtrados de acuerdo con su procedencia, relevancia, contenido relacionado con minería, descartando los que abordan el tema desde un punto de vista astronómico y se eligieron los que respondía directamente a una de las características seleccionadas en la Tabla 1, para

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

finalmente tomar una muestra de 26 artículos. Si bien los recursos espaciales pueden incluir condiciones topográficas o ambientales, para el propósito de este artículo, solo se incluyen recursos minerales y gases (también llamados volátiles) en la Luna, que podrían extraerse por medio operaciones mineras. Ante la amplia cantidad de artículos en la red, se ha realizado un muestreo no aleatorio, a fin de presentar los principales resultados para cada categoría asignada. Para complementar, se presentan la distribución global de los principales recursos espaciales en la Luna, de acuerdo con la información colectada por satélites y que figuran en la base de datos Lunar Quickmap.

TABLA I
DISTRIBUCION DE ARTICULOS REVISADOS

Categoría	Nº fuentes	Referencias
Recursos minerales y volátiles en la Luna	10	[1, 3,4,6-12]
Operaciones Mineras aplicables en la Luna	8	[13 - 20]
Extracción y procesamiento	8	[22, 24 - 30]

III. RESULTADOS

A. Recursos minerales y volátiles en la Luna

Nuestro satélite está a una distancia de 384 400 Km (en promedio) y tiene una masa que es el 1.2% de la Tierra [5]. En general a pesar de no tener una atmósfera como la terrestre, la luna contiene oxígeno en la superficie. El oxígeno está en forma de minerales como la ilmenita o familias de minerales como las plagioclasas, piroxenos, anortitas, vidrios, aglutinantes, entre otros. De acuerdo con las muestras del Apolo 11, las zonas oscuras o “mares” lunares tienen un contenido del 45 % de oxígeno [6] (Ver Figura 2).

La zona del Polo Sur lunar ha sido caracterizada por una serie de satélites, una de ellas, la misión LCROSS, confirmó la existencia de agua en la Luna, en cantidades de hasta un 5.6% [7]. El agua se encontraría en forma de hielo en zonas oscuras llamadas PSR o “Permanent shadowed regions” (Ver Figura 3), que se traduce como “Zonas permanentemente oscuras”, donde debido a la topografía y al movimiento lunar, el sol no llega a la superficie, permitiendo la existencia de zonas oscuras y ultra frías [8]. El agua sería generada por la colisión con asteroides y cometas, y por la interacción del viento solar (partículas de hidrogeno) con los minerales en la superficie.

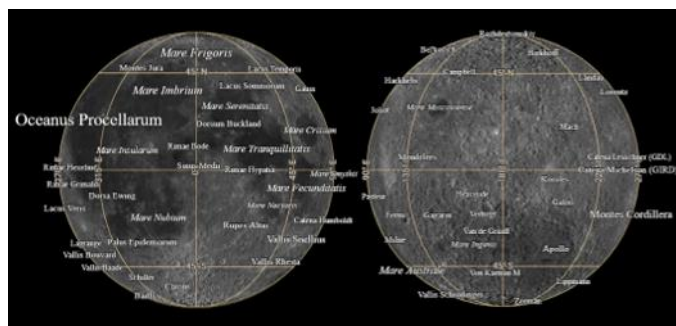


Figura 2. Vistas del lado cercano (izquierda) y lejano (derecha) de la Luna. Mapas obtenidos por el autor usando Lunar QuickMap.

Además del agua, otros volátiles, estarían a una profundidad accesible, esto es, dentro de los 3 primeros metros. Son estos materiales, y su potencial en ser convertido en combustibles de oxígeno e hidrogeno lunar (LLOX y LLH2 respectivamente), los que están acelerando la carrera espacial para volver a la Luna, ya que estos depósitos brindarían materiales a los astronautas, y combustible a las naves espaciales y a los satélites de la órbita terrestre [4].

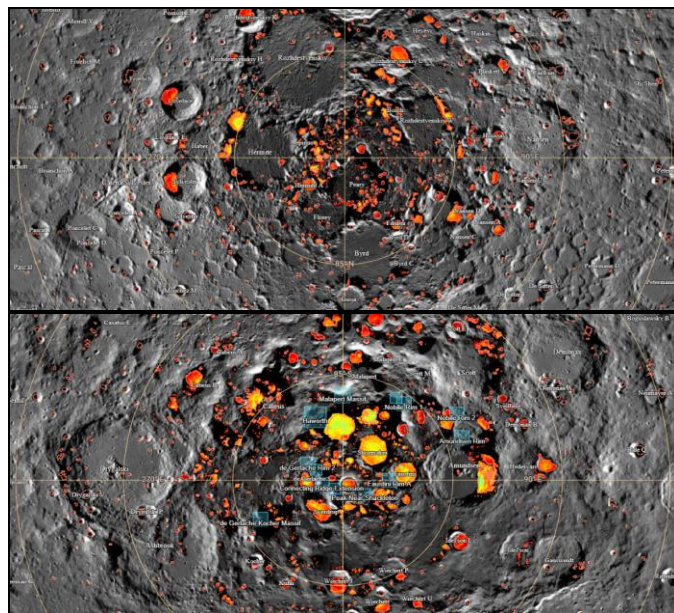


Figura 3. Vistas de las regiones del Polo Norte (arriba) y Polo Sur (abajo) lunar. Las regiones sombreadas tienen una temperatura menor a -123°C. Los cuadros azules son las zonas candidatas para el retorno a la Luna. Mapas obtenidos por el autor usando Lunar QuickMap.

Los siguientes materiales de interés son el oxígeno y los metales; en efecto el hierro, titanio, aluminio, silicio, calcio y magnesio, están en cantidades apreciables en la Luna (Ver Figura 4). Estos metales mezclados con el oxígeno están dentro de una capa llamada “regolito” [9]. El regolito, es una capa de partículas finas partículas (menores a 1 mm) que esta mezclada con las rocas lunares y que se empieza a comportar como material consolidado a partir de los primeros 30 centímetros de profundidad [10]. Su profundidad total esta estimada entre 3 a 5 metros en las zonas llamadas “Mares” o zonas oscuras; y entre 10 a 15 metros en las “Tierras Altas” o zonas claras [6]. En adición, la luna también presenta materiales radiactivos como el Torio y el Helio-3, que ha sido nombrado como uno de los combustibles promisorios del futuro (Ver Figura 3) [11]. Sin embargo, estos materiales están en partes por millón e incluso partes por billón, por lo cual es difícil considerarlos para su exploración a corto plazo. Finalmente, el regolito también contiene Tierras raras (lantánidos, escandio e itrio, entre otros), en una concentración mayor a la corteza terrestre pero menor concentración comparado con un depósito minero [13], por lo cual es también difícil pensar en una extracción a corto plazo.

[4] y el oxígeno [14] serán los primeros en ser extraídos, luego los metales, y finalmente los materiales nucleares y KREEP.

TABLA II
PRINCIPALES RECURSOS EN LA SUPERFICIE LUNAR [6]

Tipo de recurso	Elemento de interés	Concentración estimada	Principal aplicación
Volátiles	Agua (H ₂ O)	En los polos hasta 5%	Suministro de soporte vital y combustible
	Oxígeno (O ₂)	En el regolito hasta 45%	
	Metano (CH ₄)	En los polos hasta 0.04%	Combustible
Metales	Hierro (Fe)	Hasta 12% en los Mares	Estructuras
	Titanio (Ti)	Hasta 5% en los mares	Estructuras, Biomedicina
	Aluminio (Al)	Hasta 14% en las Tierras altas	Estructuras
	Silicio (Si)	Hasta 21%	Paneles solares
Materiales nucleares	Torio (Th)	En partes por millón	Energía
	Helio 3 (He-3)	En partes por billón	Energía
Tierras Raras + Potasio y Fosforo	KREEP	En los terrenos KREEP en orden de partes por millón	Instrumentación

B. Operaciones Mineras aplicables en la Luna

Las actividades mineras requieren una extensa data para seleccionar las áreas con la mayor concentración de recursos. Como podemos visualizar en la Figura 4, la distribución no es homogénea, y pequeñas diferencias entre una región u otra pueden incrementar el valor de retorno de las operaciones. Esta variación espacial es más crítica para la búsqueda de volátiles en los polos, donde hay un alto grado de incertidumbre con respecto a su extensión real [8]. La etapa de prospección es crucial en estos casos, ya que se necesita datos directos de la superficie para realizar una estimación más adecuada de la mineralogía y los retos metalúrgicos que conllevan [15]. En muchos casos los minerales están intrínsecamente unidos en tamaños imposibles de separar por la tecnología actual, por lo cual la selección del lugar debe considerar variables mineralógicas, usando el enfoque geometalúrgico. Este problema puede ser evaluado desde dos enfoques, una prospección a nivel geoquímico [16], como las agencias lo han venido abordado, es decir, tomar muestras in situ y medir directamente la composición química y las características mineralógicas. El segundo enfoque considera la geofísica, es decir métodos basados en electromagnetismo, sísmicos o de ultrasonido para encontrar áreas extensas de recursos y materiales. Ambos métodos no son excluyentes entre sí y pueden complementarse plenamente. La ruta actual es principalmente la prospección geoquímica, como se llevará a cabo mediante la misión VIPER, programada por NASA para 2023 o 2024. Otro detalle importante es la accesibilidad del terreno, ya que, en muchos casos, deben superarse altas pendientes y los vehículos robóticos (rovers) tienen problemas enfrentando inclinaciones mayores a 30° [17], prefiriéndose pendientes de menor valor, lo cual reduce la extensión de los

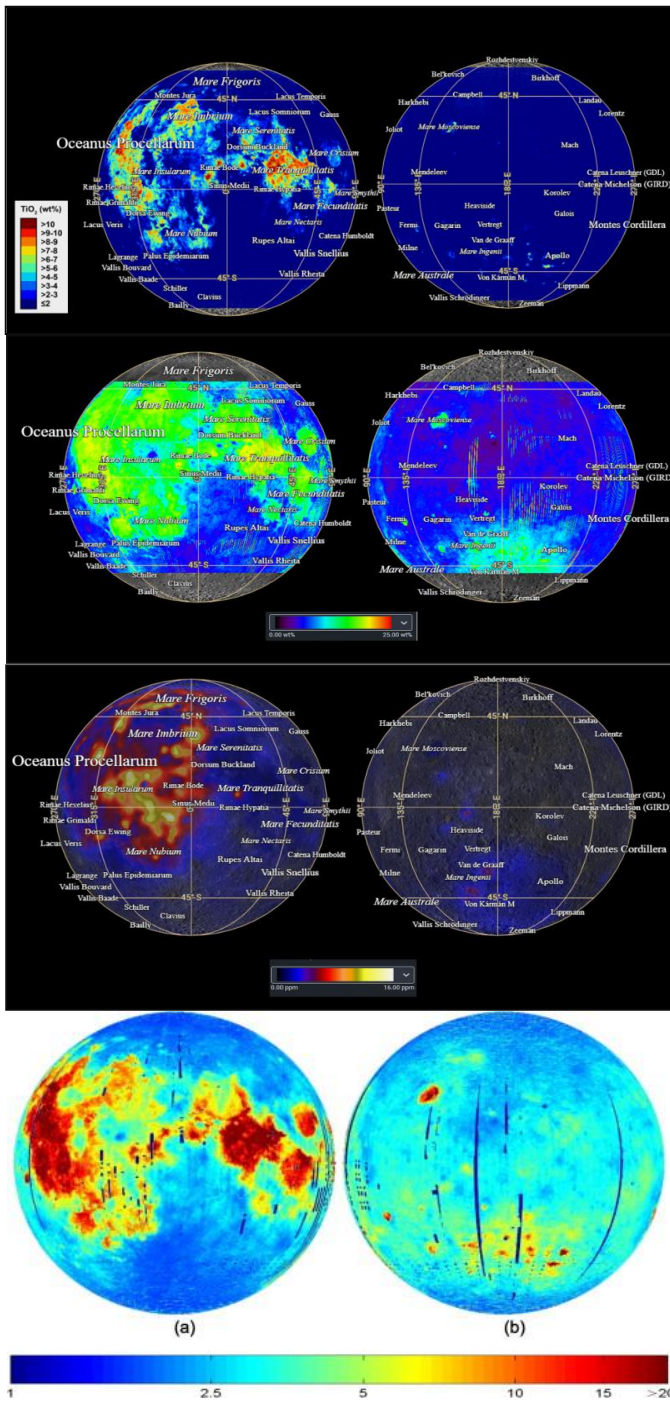


Figura 4. Mapas globales de la distribución de dióxido de titanio (TiO₂), óxido de hierro (FeO) y Torio (Th), y Helio-3 en ppb. Mapas obtenidos por el autor usando Lunar QuickMap. El mapa de Helio-3 proviene de [12]

Estos elementos a su vez están acompañados por materiales de fosfato y potasio, dando el nombre a esta región como “KREEP terrain”, haciendo referencia a los símbolos químicos de estos materiales y las siglas convencionales de las tierras raras (K = Potasio, REE = Rare Earth Materials o Tierras raras, P = Fósforo). De acuerdo con los planes de las agencias espaciales, parece ser que elementos como el agua

recursos extraíbles a corto plazo. Las Figuras 5 y 6 explican mejor estos detalles.

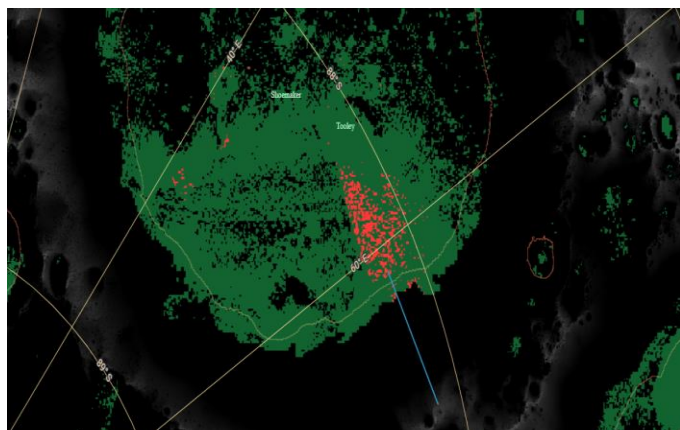


Figura 5. Cráter Shoemaker (Polo Sur). Las zonas en negro son regiones de “perpetua oscuridad” y las blancas, son áreas con iluminación >15% del tiempo. En verde las zonas con probabilidad de hielo (<160°C y CPR >0.5), y en rojo las más favorables (alta probabilidad + pendiente < 15° e hidrogeno detectado). La línea representa la distancia de la zona de recursos a la zona con luz solar. Mapa obtenido por el autor usando Lunar QuickMap.

La siguiente etapa es la de adquisición del recurso o excavación. A diferencia de la minería terrestre que necesita una etapa de voladura para la fragmentación; esta operación no ha sido considerada en la Luna, principalmente por la característica granular del regolito, es decir el material de muy fino, y aunque este consolidado a mayor profundidad sería fácil de separar sin requerir un evento de alta energía. La otra diferencia es que la tracción en la Luna esta ilimitada, ya que el tamaño de los equipos mineros debe ser pequeño para economizar costos, por ello, la relación de la energía invertida por tonelada de material o metro cubico debe ser muy eficiente [18]. Actualmente se tienen diseños basados en excavadores rotatorios y también diseños neumáticos que funcionarían bien para adquirir material en los primeros 3 metros de profundidad [19].

Todas las operaciones debes considerar, además de la accesibilidad, el acceso a un suministro de energía y las temperaturas ambiental. Por ejemplo, los volátiles están en zonas oscuras, alejadas de las zonas de luz solar, lo que requerirá un tránsito continuo entre el frente de minado y la zona de recarga de energía. Además, los vehículos estarán sometidos a fuertes cambios de temperatura (mayor a 100°C en la zona iluminada y debajo de los -150°C en las zonas oscuras), lo cual impactaría en la estructura, causando fatiga térmica y expansión en los materiales. Es así como el tema de accesibilidad y suministro de energía restringe a corto plazo el inventario de recursos a ser extraído [20]. Para un suministro de energía eficiente, se ha propuesto explorar las regiones polares parcialmente iluminadas, en búsqueda de hielo almacenado a varios centímetros de profundidad. En adición, se han propuesto el uso de baterías nucleares para permitir una operación continua [20], la capturar la luz solar desde el borde de los cráteres, a través sistemas ópticos que puedan captar la

luz solar, y suministren energía a la operación continuamente (Ver Figura 7).

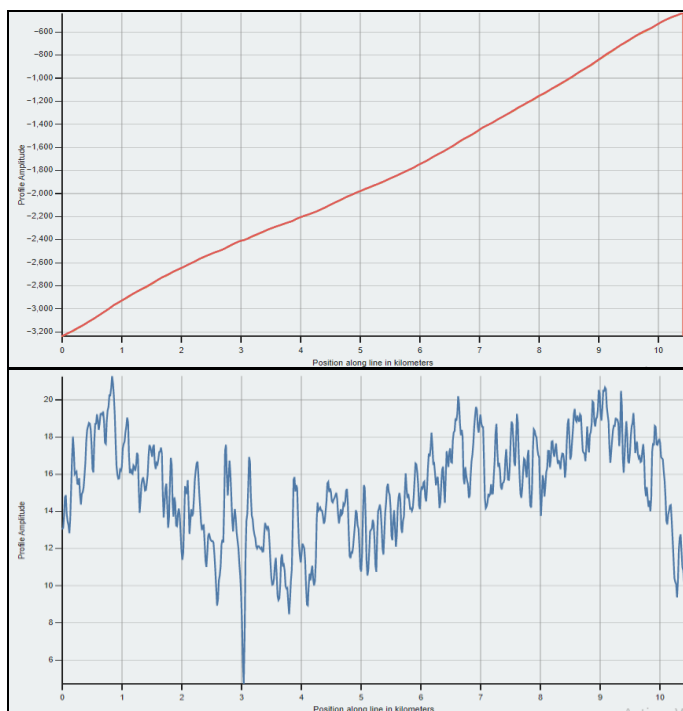


Figura 6. Perfil del terreno de conexión entre el posible frente de minado y las zonas de recarga de energía. Esto es representado en la Figura 4 con una línea. Se presenta el perfil de elevación (Arriba) y la variación de la pendiente del terreno (Abajo) Gráficos obtenidos por el autor usando Lunar QuickMap.



Figura 7. Representación artística de las Operaciones mineras en la Luna en las zonas polares de permanente oscuridad. Créditos: James Vaughan [21]

C. Extracción y procesamiento de recursos en la Luna

Existen varios métodos adaptados para el procesamiento y obtención de los recursos mencionados. En general para la extracción de los volátiles en las zonas polares, se estima reducir las actividades de excavación para optar por procesos in situ. La Figura 8 es una representación artística más detallada del uso de minería óptica para la sublimación de los volátiles congelados, reduciendo las operaciones de excavación. En resumen, este diseño usa una carpa hermética que en el centro tiene un sistema de espejos encargados de coleccionar la luz solar y redireccionar la energía hacia la

superficie [22]. Se estima que calentar la superficie a una temperatura de 220 K (o -53°C) durante 44 horas, sería suficiente para obtener un contenido importante de vapor de agua, y otros volátiles (Ver Tabla III). El material sublimado sería re-congelado dentro de cargadores de hielo y llevado a una planta de refinación, para recuperar los volátiles mediante destilación fraccionada y obtener hidrogeno y oxigeno del agua mediante la electrolisis. Estos dos materiales serían licuados para ser almacenados como combustible o transportados a las bases humanas como soporte vital de los astronautas. En este proceso también espera obtener materiales como el metano, que es usado como combustible en las naves de SpaceX, una de las empresas privadas comprometidas con esta nueva carrera espacial. Estos volátiles se extraerían para servir como combustible para los viajes de la Tierra a la Luna, para la operación de los satélites en el espacio Cislunar y para futuras misiones a Marte [4].

TABLA III
CONCENTRACION DE VOLATILES IDENTIFICADOS POR LCROSS [7]

Volátil	Formula	Concentración estimada
Agua	H ₂ O	5.60%
Sulfuro de hidrógeno	H ₂ S	0.94%
Amoniaco	NH ₃	0.34%
Dióxido de azufre	SO ₂	0.18%
Etileno	C ₂ H ₄	0.17%
Dióxido de carbono	CO ₂	0.12%
Metanol	CH ₃ OH	0.09%
Metano	CH ₄	0.04%

Por otro lado, la obtención de oxígeno y metales en la luna dependerá de la zona de explotación. Para su extracción, si serán necesarias las actividades de excavación, carguío y acarreo. A diferencia de las operaciones de concentración terrestres, por la condición del regolito, no se ha considerado usar chancado o operaciones de conminución, lo que disminuye enormemente la demanda energética. Sin embargo, las operaciones de clasificación de tamaño si son necesarias, ya que, a pesar de ser el regolito un material muy fino (< 1 mm) [9], está mezclado con rocas y partículas mayores a 1 centímetro. Además, dada la baja fluidez del regolito lunar, es necesario añadir dispositivos vibratorios en las zarandas y en los equipos de transferencia como binses y tolvas.

A escala global, las zonas oscuras de la luna, también llamadas “mares”, tienen un alto contenido de titanio, en comparación de las zonas claras o “tierras altas”, en las cuales el contenido de titanio es menor a 1% (Ver Figura 2 y 4). En los mares basálticos, la producción de oxígeno dependerá de la implementación de operaciones de concentración magnética y electrostática para obtener la ilmenita, el principal portador de oxígeno extraíble. Una gran ventaja de operar en las zonas basálticas es la baja pendiente que posee el terreno. La Figura 9, presenta 2 zonas, la del Polo sur, donde están los volátiles y la del Mar de la Tranquilidad, ambas comparadas de acuerdo con la pendiente de la superficie, puede notarse que la primera tiene una topografía accidentada, mientras que la segunda es uniforme con una pendiente promedio menor a 10° .

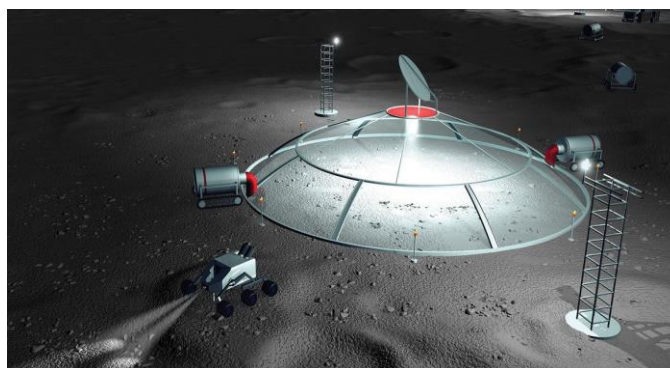


Figura 8. Representación artística de las Operaciones mineras en la Luna usando sublimación in situ. Créditos: John Macneill [23]

Volviendo al proceso, luego de concentrar la ilmenita esa va a un reactor para para hacerla reaccionar con el hidrógeno a temperaturas mayores a 850°C [14]. El hidrogeno reacciona con el oxígeno del enlace de óxido de hierro ($\text{FeO} \cdot \text{TiO}_2$), formando agua, y dejando hierro metálico más rutilo como subproductos del proceso, de acuerdo con la Ecuación 1. De hecho, este proceso ya ha sido industrializado con éxito para el procesamiento de minerales de Ilmenita en Canadá en la obtención de titanio, por ello, esta técnica tendría la madurez suficiente para ser evaluada para una futura aplicación en la Luna.

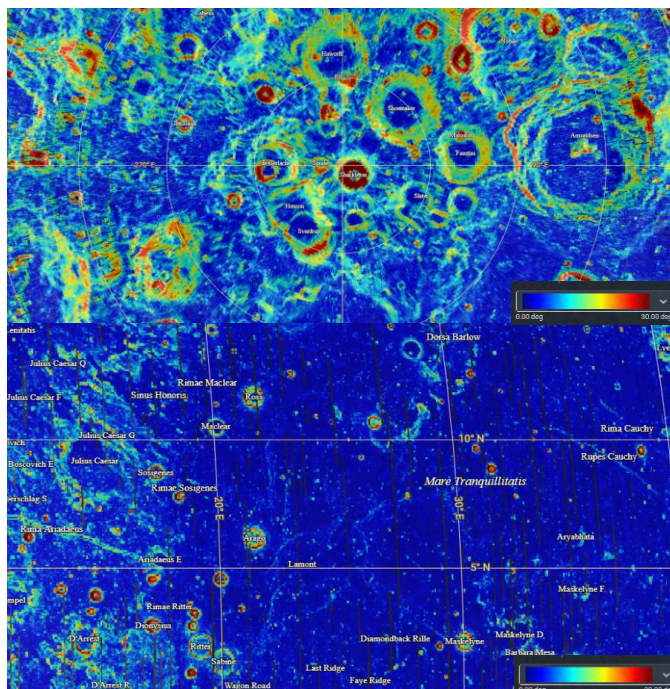
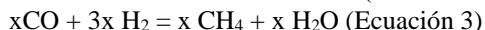


Figura 9. Descripción de las pendientes en la superficie lunar a escala de cada 100 metros por pixel. La región de tierras altas del Polo sur aparece en la imagen superior y la del Mar de la Tranquilidad en la imagen inferior. Mapa obtenido por el autor usando Lunar QuickMap.

Si bien las operaciones de concentración magnética y electrostática se han probado con muestras lunares de manera

eficiente, los resultados de recuperación y grado no han sido los mejores, ya que su eficiencia dependerá mucho de la zona elegida, buscando un regolito menos “maduro” para obtener una alta recuperación y grado. La madurez del regolito esta relacionada con cuanto ha sido impactado por el viento solar y los meteoritos. Un regolito menos maduro, posee una mineralogía uniforme, y un regolito muy maduro posee minerales mixtos, difíciles de ser separados entre sí. El autor explica con mayor detalle estos aspectos y recomienda un enfoque geometalúrgico desde las actividades de prospección [24].

Otro proceso de reducción con gas involucra al metano (Ver Ecuaciones 2 y 3 [25]). El metano necesita una temperatura superior de 1600°C, para reaccionar con el regolito y obtener hidrógeno y monóxido de carbono como productos. Ambos gases son enviados a una cámara de Metanización, donde se regenera el metano y se forma agua [14]. Si bien este proceso tiene una recuperación metalúrgica 2 veces mayor a la reducción de la ilmenita, la reacción química requiere una mayor demanda de energía; además se incrementa el riesgo del proceso, debido a que el regolito fundido (por la alta temperatura), se vuelve químicamente agresivo e influye en el desgaste de los materiales refractarios del reactor.



La ventaja de la reducción de gases es que los principales insumos pueden ser colectados en la zona polar de la Luna y usados para una completa cadena de suministros hacia las zonas ecuatoriales. Una de las principales restricciones, es que la producción se centra solo en la obtención de oxígeno, refinando parcialmente los metales, y produciendo un regolito “sinterizado”, con aleaciones metálicas. A pesar de que estos materiales podrían servir para construcciones civiles en la luna (como hábitats, plataformas de aterrizaje, entre otros), si el proceso está enfocado en la extracción de metales, se necesita una mayor demanda de energía para una completa disociación de los óxidos metálicos. En términos operativos, se requiere de altas temperaturas y de energía eléctrica.

Un proceso autosostenible es la electrolisis de regolito fundido o “Molten Regolith Electrolysis” [26], que involucra elevar el mineral a temperaturas donde el regolito es completamente líquido (1800°C – 2100°C) para aplicar una corriente eléctrica a distintos voltajes (2.5 - 3.5 V) y así separar los metales de manera secuencial. En estas condiciones, en las Tierras Altas, se podría obtener secuencialmente el Silicio, Magnesio, Titanio y Aluminio. La gran ventaja del proceso es que no necesita la adición de elementos externos como gases o fundentes, sin embargo, el consumo de energía es muy alto, y hay un mayor requerimiento en los materiales de construcción del sistema para soportar la agresividad del regolito fundido.

Una alternativa a este proceso es la electrolisis de sales fundidas, llamado “FFC Cambridge process” [27], propuesto

para la obtención de titanio en la Tierra, y recientemente para extraer oxígeno en la Luna. El proceso usa sales de calcio al estado líquido que son agregadas al reactor; para luego añadir el regolito previamente sinterizado durante 24 a 52 horas, a una temperatura de 660 - 950°C [28], [29], significativamente mejor a los procesos antes visto y con mayor recuperación metalúrgica. Durante el proceso se aplica una corriente eléctrica de 3.2 Voltios [29], que permite la migración del oxígeno del regolito en forma de gas, dejando aleaciones de Silicio, Hierro y Aluminio. La gran ventaja es que la extracción de oxígeno es casi total, mientras que el principal reto de este proceso es el requerimiento de las sales de calcio, las cuales deben ser trasladadas desde la tierra continuamente, complicando la viabilidad del proceso. Además, las características físicas y mecánicas del sinterizado del regolito podrían ser muy difíciles de obtener en la luna, y requieren equipos especiales, lo cual vuelve al sistema más complejo y con mayor requerimiento energético. En adición a esto, si bien se han postulado otros conceptos de extracción, este artículo resume los mas conocidos y con mayor grado de madurez tecnológica para su aplicación a corto plazo.

Con respecto a otros materiales como las Tierras raras y los elementos nucleares, estos no tienen un proceso definido a ser aplicado en la Luna, dada su baja concentración. La excepción es el Helio-3, que, si podría ser fácil de extraer, simplemente haciendo vibrar el regolito para permitir la liberación del volátil, y complementando el proceso mediante calentamiento del regolito [30]. Sin embargo, el reto de la Minería del Helio-3, es la baja concentración en la superficie (Ver Figura 4), el cual es uno de los retos que deberá resolver la prospección si se quiere avanzar a una estimación de reservas.



Figura 10. Resumen de los principales conceptos postulados para la Minería Lunar.

En resumen (Ver Figura 10), para viabilizar el camino de la minería espacial es necesario obtener un mapa detallado de los recursos lunares, lo que ayudaría a identificar su concentración a una profundidad de por lo menos 3 metros. La información química de por si sola no es suficiente, y hay aspectos como la geomecánica y mineralogía que deben ser considerados. En adición es imprescindible probar los diseños

de excavación para incrementar el grado de madurez en entornos parecidos al lunar. No solo debe confirmarse que los excavadores pueden acceder a las zonas profundas eficientemente y enfrentar a las zonas de regolito consolidado, sino también, estos equipos deben estar contruidos con materiales que puedan sobrevivir entornos extremos de temperatura, que requieran el menor tipo de mantenimiento, que usen un método de lubricación que no involucre líquidos (ya que en el vacío lunar se evaporaría rápidamente). Además, es preciso proveer de un suministro de energía sostenible, construir refugios e instalaciones y operar el sistema a través de la Inteligencia Artificial que permita que una total automatización.



Figura 11. Expedición análoga en la zona basáltica del volcán Mauna Kea, Hawaii, como parte de la tripulación análoga Selene V, en la base HI-SEA. En la foto Gustavo Jamanca-Lino y Michaela Musilova tomando datos geomecánicos de la superficie y colectando muestras. Creditos: Bader Al Moulah

Por otro lado, los reactores metalúrgicos, debe confirmarse el comportamiento de los materiales cerámicos en las condiciones lunares, así como los mecanismos de transferencia en un ambiente de baja gravedad como la Luna. En general, los sistemas que quieran cumplir con estos requerimientos deben probarse en entornos que asemejen alguna de las características de la superficie lunar. Es la labor de geólogos y científicos identificar estos lugares “análogos” en nuestro Planeta, para ofrecer una vía rápida de obtención de datos a estos sistemas. Algunos de estos lugares son los ambientes ultrafríos de la Antártida; las áreas de permafrost en Canadá, o los suelos volcánicos con mineralogía basáltica,

como las regiones de Hawái en el Pacífico. La recolección de muestras y estudios geomecánicos en estos entornos, ayudaran a comprender más los retos de las operaciones mineras tanto en la Luna, como en Marte (Ver Figura 11).

IV. CONCLUSIONES

La minería espacial tiene un potencial enorme en ser desarrollado. Como hemos revisado, hay una serie de elementos que existen en la superficie lunar y podrían ser extraídos en el corto plazo. Los procesos tecnológicos para la extracción son principalmente adaptaciones de la tecnología terrestre ya usadas exitosamente en la pirometalurgia y concentración por vía seca, por lo cual la inminencia de su aplicación es cuestión de tiempo, y por supuesto de inversión económica. La revisión de los principales mapas de recursos lunares, muestran su real existencia, en cantidades y con un grado de veracidad que pueden ser considerados como “recursos mineros inferidos”. Es precisa una mayor observación in situ para avanzar hacia una cuantificación de reservas. Los principales retos estarían asociadas a las condiciones ambientales del lugar, tales como temperatura, presión, radiación, la microgravedad y su efecto en la dinámica de fluidos, así como las condiciones geotécnicas del regolito. A pesar de que muchas de las tecnologías han sido probadas como “pruebas de concepto”, es preciso, que los métodos propuestos por la literatura sean probados en entornos muy similares, para validar la real factibilidad de los sistemas.

Aunque la nueva carrera por el establecimiento de establecimientos humanos en la Luna, es principalmente dirigido por las agencias espaciales de las principales naciones del mundo (NASA, ESA, JAXA, CSA, CNSA), hay un enorme potencial a nivel de desarrollo tecnológico que podemos desarrollar en nuestro región. Latinoamérica y especialmente Perú tienen una historia minera significativa, y es tiempo de iniciar un proceso de investigación, paso a paso que nos lleve a contribuir significativamente en la próxima generación de unidades mineras en el espacio. Esta práctica no solo beneficiaría a la minería espacial en sí, sino a la vez nos ayudaría a encontrar soluciones que podamos aplicar en la Tierra. Esta filosofía es llamada “Dual-Capacity” o “Spin-off”, y consiste en usar la tecnología espacial para responder a las necesidades de nuestra sociedad, y es una de las principales razones porque muchos países invierten significativamente en esta área. El potencial de la automatización minera, así como las medidas de cuidado ambiental para la Minería Lunar, tendrán un gran impacto en nuestra sociedad, al adaptarlas a nuestra realidad. Es momento de usar la tecnología que nos llevó a las descubrir las entrañas de la Tierra, como vehículo hacia las estrellas, mientras a la vez, encontramos soluciones para el día a día. El cielo ya no es el límite, es el inicio.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece los conocimientos adquiridos dentro del Programa de Recursos Espaciales de Colorado School of

Mines, USA, que le han permitido involucrarse en el campo de investigación de la Minería Espacial. Además, Reconocemos el uso de imágenes de Lunar QuickMap (<https://quickmap.lroc.asu.edu>), una colaboración entre la NASA, la Universidad Estatal de Arizona y Applied Coherent Technology Corp. Finalmente, se extiende el agradecimiento a la Universidad Privada del Norte y a su Dirección de Investigación, Innovación & Responsabilidad Social, por la gestión y apoyo recibido para la participación de LACCEI 2023.

REFERENCES

- [1] J. S. Lewis and R. A. Lewis, *Space resources: Breaking the bonds of earth*. New York, NY: Columbia University Press, 1987.
- [2] "The space resources debate pivots from asteroids to the Moon," *Thespace.com*. [Online]. Available: <https://www.space.com/moon-asteroid-space-mining-with-concentrated-sunlight.html>.
- [3] M. Anand et al., "A brief review of chemical and mineralogical resources on the Moon and likely initial in situ resource utilization (ISRU) applications," *Planet. Space Sci.*, vol. 74, no. 1, pp. 42–48, 2012.
- [4] D. Komuta et al., "Commercial lunar propellant architecture: A collaborative study of lunar propellant production," *REACH*, vol. 13, no. 100026, p. 100026, 2019.
- [5] "Moon fact sheet," *Nasa.gov*. [Online]. Available: <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/moonfact.html>.
- [6] I. A. Crawford, "Lunar Resources: A Review," arXiv [astro-ph.EP], 2014.
- [7] A. Colaprete et al., "Detection of water in the LCROSS ejecta plume," *Science*, vol. 330, no. 6003, pp. 463–468, 2010.
- [8] K. M. Cannon and D. T. Britt, "A geologic model for lunar ice deposits at mining scales," *Icarus*, vol. 347, no. 113778, p. 113778, 2020.
- [9] G. Heiken, Ed., *Lunar sourcebook: A user's guide to the moon*. Cambridge, England: Cambridge University Press, 1991.
- [10] W. David Carrier, "The four things you need to know about the GEOTECHNICAL PROPERTIES OF LUNAR SOIL," *Usra.edu*. [Online]. Available: https://www.lpi.usra.edu/lunar/surface/carrier_lunar_soils.pdf.
- [11] J. A. Dallas, S. Raval, J. P. A. Gaitan, S. Saydam, and A. G. Dempster, "Mining beyond earth for sustainable development: Will humanity benefit from resource extraction in outer space?," *Acta Astronaut.*, vol. 167, pp. 181–188, 2020.
- [12] W. Fa and Y.-Q. Jin, "Quantitative estimation of helium-3 spatial distribution in the lunar regolith layer," *Icarus*, vol. 190, no. 1, pp. 15–23, 2007.
- [13] C. McLeod and M. Krekeler, "Sources of extraterrestrial rare earth elements: To the moon and beyond," *Resources*, vol. 6, no. 3, p. 40, 2017.
- [14] L. Schlüter and A. Cowley, "Review of techniques for In-Situ oxygen extraction on the moon," *Planet. Space Sci.*, vol. 181, no. 104753, p. 104753, 2020.
- [15] J. E. Kleinhenz and G. Sanders, "Evaluation of the NASA Artemis regions of interest for ISRU water mine potential," in *ASCEND 2022*, 2022.
- [16] K. Zacny et al., "TRIDENT drill for VIPER and PRIME-1 missions to the moon," in *Earth and Space 2022*, 2023.
- [17] H. Inotsume, "Analysis of angle of attack for efficient slope ascent by rovers," *Carnegie Mellon University*, 2015.
- [18] B. A. C. S. Jayathilake, I. M. S. K. Ilankoon, and M. N. P. Dushyantha, "Assessment of significant geotechnical parameters for lunar regolith excavations," *Acta Astronaut.*, vol. 196, pp. 107–122, 2022.
- [19] G. H. Just, K. Smith, K. H. Joy, and M. J. Roy, "Parametric review of existing regolith excavation techniques for lunar In Situ Resource Utilisation (ISRU) and recommendations for future excavation experiments," *Planet. Space Sci.*, vol. 180, no. 104746, p. 104746, 2020.
- [20] K. M. Cannon and D. T. Britt, "Accessibility data set for large permanent cold traps at the lunar poles," *Earth Space Sci.*, vol. 7, no. 10, 2020.
- [21] M. Wall, "No digging required: Space mining on the moon and beyond may be solar powered," *Space*, 04-Sep-2019. [Online]. Available: <https://www.space.com/moon-asteroid-space-mining-with-concentrated-sunlight.html>.
- [22] G. F. Sowers and C. B. Dreyer, "Ice mining in lunar permanently shadowed regions," *New Space*, vol. 7, no. 4, pp. 235–244, 2019.
- [23] D. Schneider, "Squeezing rocket fuel from moon rocks," *IEEE Spectr.*, vol. 56, no. 7, pp. 46–47, 2019.
- [24] G. Jamanca-Lino, "Enfoque geometalúrgico propuesto para la exploración minera espacial de la ilmenita lunar en el Mar de la Tranquilidad," *Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Peru*, 2021.
- [25] R. Gustafson, B. White, M. Fidler, and A. Muscatello, "Demonstrating the solar carbothermal reduction of lunar regolith to produce oxygen," in *48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, 2010.
- [26] S. S. Schreiner, "Molten Regolith Electrolysis reactor modeling and optimization of in-situ resource utilization systems," *Massachusetts Institute of Technology*, 2015.
- [27] G. Z. Chen, "Interactions of molten salts with cathode products in the FFC Cambridge Process," *Int. J. Miner. Metall. Mater.*, vol. 27, no. 12, pp. 1572–1587, 2020.
- [28] B. A. Lomax, M. Conti, N. Khan, N. S. Bennett, A. Y. Ganin, and M. D. Symes, "Proving the viability of an electrochemical process for the simultaneous extraction of oxygen and production of metal alloys from lunar regolith," *Planet. Space Sci.*, vol. 180, no. 104748, p. 104748, 2020.
- [29] A. Meurisse et al., "Lower temperature electrochemical reduction of lunar regolith simulants in molten salts," *Planet. Space Sci.*, vol. 211, no. 105408, p. 105408, 2022.
- [30] H. H. Schmitt, "Lunar helium-3 energy resources," in *Energy Resources for Human Settlement in the Solar System and Earth's Future in Space*, Tulsa, OK U.S.A.: American Association of Petroleum Geologists, 2015, pp. 33–51.