

# FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de Ingeniería de Minas

## “UN ENFOQUE CIENTÍFICO Y DE INGENIERÍA PARA LA EXPLORACIÓN DE TUBOS DE LAVA PLANETARIOS-2024”

Tesis para optar el título profesional de:

**Ingeniero de Minas**

Forma: Artículo científico

**Autor:**

Homero Aguilar Diaz

**Asesor:**

Msc. Ing. Gustavo Alberto Steven Jamanca Lino  
<https://orcid.org/0000-0002-0557-8843>

Cajamarca - Perú

2024

## JURADO EVALUADOR

Jurado Presidente (a)	<b>ALFREDO MARTIN BERROSPI YTAHASHI</b>
	Nombre y Apellidos

Jurado 2	<b>JAIRO PINEDO TAQUIA</b>
	Nombre y Apellidos

Jurado 3	<b>GUSTAVO ALBERTO STEVEN JAMANCA LINO</b>
	Nombre y Apellidos

## INFORME DE SIMILITUD



Page 2 of 37 - Integrity Overview

Submission ID trn.oid::1:3186465414




### 7% Overall Similarity

The combined total of all matches, including overlapping sources, for each database.

#### Filtered from the Report


- Bibliography

#### Top Sources

- 7%  Internet sources
- 1%  Publications
- 2%  Submitted works (Student Papers)

#### Integrity Flags

##### 1 Integrity Flag for Review

-  **Hidden Text**  
1541 suspect characters on 1 page  
Text is altered to blend into the white background of the document.

Our system's algorithms look deeply at a document for any inconsistencies that would set it apart from a normal submission. If we notice something strange, we flag it for you to review.

A Flag is not necessarily an indicator of a problem. However, we'd recommend you focus your attention there for further review.

## DEDICATORIA

A mi familia y todos mis seres queridos, que han sido mi guía y aliento importante de este logro académico.

## AGRADECIMIENTO

Agradecimiento a la Dra. Gladys Ocharan por su aporte en esta investigación. Asimismo, a la tripulación Selene IV y a la base científica HI-SEAS operada por la International Moon Base Alliance, y a Bader Al Moudah por las fotografías. Esta investigación fue desarrollada con el apoyo del grupo de investigación peruano ARIES. Finalmente, gracias al Departamento de Investigación, Innovación y Responsabilidad Social de la Universidad Privada del Norte, Perú; por el apoyo recibido para la participación en SGEM 2024.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>DEDICATORIA .....</b>	<b>4</b>
<b>AGRADECIMIENTO .....</b>	<b>5</b>
<b>TABLA DE CONTENIDO .....</b>	<b>6</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>7</b>
<b>CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>9</b>
<b>CAPÍTULO II. METODOLOGÍA.....</b>	<b>14</b>
<b>CAPÍTULO III. RESULTADOS .....</b>	<b>15</b>
<b>CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN.....</b>	<b>22</b>
<b>CAPÍTULO V: CONCLUSIONES .....</b>	<b>29</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>30</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Tubos de lava planetarios .....	10
<b>Figura 2.</b> Proceso de formación de tubos de lava .....	17
<b>Figura 3.</b> Base HI-SEAS.....	18
<b>Figura 4.</b> Actividades en la antigua región de flujo de lava, cerca de HI-SEAS .....	19
<b>Figura 5.</b> Actividades de muestreo y prueba en tubos de lava .....	21
<b>Figura 6.</b> Pruebas de resistencia a la compresión de la misión SELENE IV y resultados en MPa.....	22
<b>Figura 7.</b> Métodos de geomecánica: in situ y en laboratorio.....	26

## RESUMEN

Los tubos de lava son estructuras subterráneas naturales formadas por volcanes durante erupciones magmáticas. Su exploración ha despertado un innegable interés en la comunidad científica por su potencial como futuros hábitats capaces de albergar misiones humanas en el Sistema Solar. De hecho, existen importantes características topográficas que indican la existencia de tubos de lava en la Luna y Marte, que ofrecen refugio natural y aislamiento ambiental para asentamientos planetarios permanentes. El artículo resume el proceso geológico de formación de tubos de lava a partir de una extensa revisión de la literatura e introduce la relevancia de la prospección geomecánica para interpretar la estabilidad de la superficie con fines de habitabilidad, presentando los resultados obtenidos durante la visita al Centro de Simulación y Analógica de Exploración Espacial de Hawaii. (HI-SEAS) y la región del volcán Mauna Loa en Hawaii en 2021. Los datos recopilados permitirían una estimación de las propiedades superficiales de estas formaciones geológicas fuera de la Tierra. Además, se discuten diferentes metodologías utilizadas actualmente en las industrias de minería y construcción civil que pueden ser transferidas como tecnologías spin-in para complementar la caracterización de estas formaciones en la Tierra. De hecho, estas estructuras subterráneas serían entornos analógicos donde sería posible probar diferentes procedimientos e instrumentos y desarrollar futuras cargas útiles espaciales para apoyar la exploración humana de la Luna y Marte.

**Palabras clave:** Tubos de lava, Exploración espacial, Habitabilidad, Geomecánica

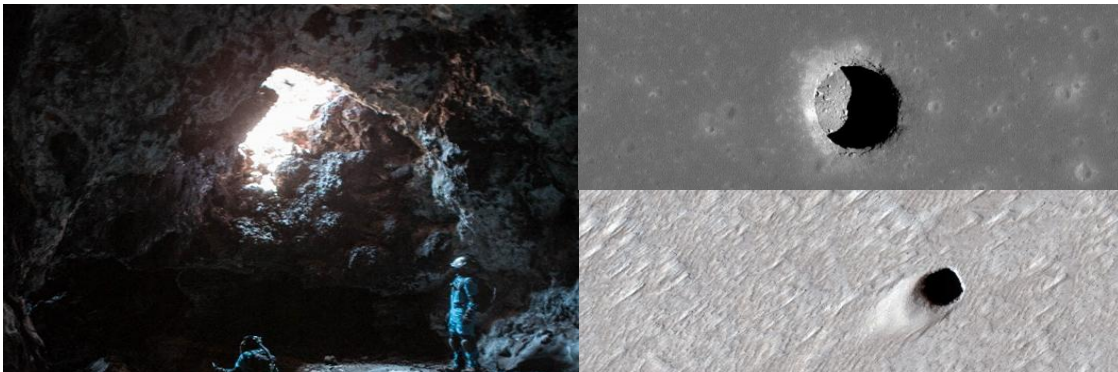
## CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

Desde el principio de los tiempos, la curiosidad de la humanidad siempre ha aspirado a descubrir y desentrañar los grandes enigmas del universo. La Luna y Marte representan posibles destinos en este siglo para la exploración humana, aportando datos esenciales para su expansión a lo largo del sistema solar. Este interés se basa en objetivos científicos relevantes, la perspectiva de la supervivencia a largo plazo de la humanidad y la explotación potencial de los recursos espaciales. Los futuros astronautas deben sobrevivir a los riesgos climáticos espaciales relacionados con la variación de temperatura, los altos niveles de radiación y las duras condiciones de la superficie. Los principales riesgos están asociados con la temperatura, la radiación, los micrometeoritos y las características del regolito (Guerra et al., 2022). La temperatura oscila entre  $-249^{\circ}\text{C}$  y  $96^{\circ}\text{C}$  (polos lunares),  $-153^{\circ}\text{C}$  a  $127^{\circ}\text{C}$  (ecuador lunar) y  $-140^{\circ}\text{C}$  a  $20^{\circ}\text{C}$  (ecuador marciano), lo que significa un entorno cruel para la adaptación humana y un aumento los requisitos de los hábitats y los trajes espaciales para mantener la temperatura corporal en los valores adecuados (NASA, 2024a) y (NASA, 2024c). Las altas dosis de radiación en el espacio representan otro riesgo latente. Por ejemplo, el valor registrado a bordo de la Estación Espacial Internacional (ISS) oscila entre 0,4 y 1,1 microsievverts por día y 70-500 Sv por año (Marín, 2011). En comparación, la dosis acumulada máxima en diez años sugerida por la NASA para un astronauta es de 2.900 mSv (Marín, 2011), y la dosis letal para los seres humanos es de unos 10.000 mSv. Por lo tanto, es necesario monitorear las misiones en la superficie lunar y marciana para tomar contramedidas efectivas. Un peligro adicional está asociado con los micrometeoritos y el regolito.

Los micrometeoritos son partículas de tamaño micrométrico (5-100 micrones) que golpean continuamente la superficie lunar a gran velocidad (hasta 70 km/s). Además, el regolito de la superficie lunar es abrasivo, ultrafino ( $<1000$  micras) y tóxico, por lo que este es uno de los principales desafíos a mitigar (Guerra et al., 2022; Jamanca et al. 2011). Aunque no hay micrometeoritos en Marte, la presencia de tormentas de polvo es una condición indeseable

debido al transporte de regolitos tóxicos contaminados por sales de perclorato (Jamanca et al., 2011; Guerra et al., 2022). Con base en los desafíos presentados, se sugiere que los astronautas se establezcan en regiones con protección natural para reducir los requerimientos logísticos (Viúdez-Moreiras, 2021), aplicando la filosofía de utilización de recursos in situ (ISRU). En este contexto, los tubos de lava ofrecen canales subterráneos naturales que se destacan como ubicaciones geológicas favorables para las expediciones humanas, ofreciendo ambientes de temperatura estable, búnkeres de radiación natural y protección contra micrometeoritos y polvo. Este artículo analiza el proceso de formación de los tubos de lava, sus valores geomecánicos superficiales y su importancia como refugios planetarios, además de proponer nuevas metodologías para futuras expediciones científicas.

**Figura 1.** Tubos de lava planetarios



Nota. (Izquierda) Pozo y entrada al tubo de lava terrestre en Hawaii. (Arriba a la derecha) Cráter y posible entrada al tubo de lava lunar. (Abajo a la derecha) Cráter y posible entrada al tubo de lava marciano (Steigerwald, 2022; NASA, 2024).

Ante estos desafíos, surge la necesidad de buscar hábitats potenciales que puedan proporcionar protección natural contra estos peligros ambientales, entonces:

¿Cuáles son las características de los tubos de lava que servirían como potenciales habitas para albergar misiones humanas en el sistema solar 2024?, con la intención de alcanzar nuestro objetivo: Evaluar las características de los tubos de lava que podrían servir

como potenciales hábitats para albergar misiones humanas en el sistema solar, hemos

planteado 3 objetivos específicos:

a) Caracterizar la geomecánica de tubos de lava in situ. b) Analizar los datos y comparar con los niveles de resistencia existentes para estructuras. c) Discutir los resultados para aplicaciones en el espacio y la tierra. Esta investigación si incluye hipótesis porque tiene más de 35 datos que permiten la aplicación de pruebas estadísticas y tiene un diseño experimental. La hipótesis será: Las características geomecánicas de los tubos de lava influirán significativamente en la seguridad y estabilidad que proporcionan estos tubos para albergar misiones humanas en el sistema solar. Como base de fundamento se ha tomado estudios que servirán como antecedentes para esta investigación; Entre ellos se encontró los siguientes trabajos:

Lévele, R. J., & Data, S. (2010). Presentan “Lava tubes and basaltic caves as astrobiological targets on Earth and Mars: A review”; su objetivo fue estudiar cuevas terrestres y comprender la vida microbiana en dichos ambientes, y como estas condiciones pueden servir como análogos en entornos Marcianos. Su metodología consintió en “analizar la diversidad microbiana y los procesos de mineralización de cuevas basálticas en diversas regiones como (India, Alaska y Hawái)”; la investigación revelo que, en la Tierra, los minerales de las cuevas estudiadas conservan “biofirmas microbianas” abundantes y diversas, lo que supone que las cuevas en Marte pueden representar lugares apropiados para buscar firmas biológicas. Para hacerlo, los autores sugieren el desarrollo de tecnología novedosa para explorar y estudiar Marte.

Sauro, et. al (2020), en su investigación “Lava tubes on Earth, Moon and Mars: A review on their size and morphology revealed by comparative planetology”, se compararon los tubos de lava en la Tierra, la Luna y Marte en relación a su tamaño y forma, el objetivo fue inferir sus características respecto a análogos terrestres. Los autores presentan sus resultados comparando imágenes satelitales de estos tres cuerpos planetarios y modelando sus dimensiones y formas que podrías tener.

Esta investigación determino que los tubos de lava en la Luna y Marte son más grandes

comparados con los de la Tierra en un orden que va de 1 a 3 respecto a su tamaño y volumen; también indican que se han determinado más de 300 entradas en la Luna y más de 1000 en Marte y sugieren que estas cavidades podrían ser usadas para la exploración del subsuelo y asentamientos humanos en futuras misiones espaciales.

Viúdez-Moreiras, (2021). Presentan “The ultraviolet radiation environment and shielding in pit craters and cave skylights on Mars”. Su objetivo fue describir el entorno de radiación (UV), y determinar cuantitativamente el blindaje que ofrecen los tubos de lava en Marte. Haciendo uso de simulación de modelos de transferencia radiactiva (RT), concluyeron que los cráteres y tragaluces de cuevas Marcianas están protegidos de la radiación dañina que se encuentra en Marte, mostrando una atenuación considerable de 2%, cuyos niveles pueden ser similares a los que se encuentra aquí en la tierra. ¡Este estudio es muy fascinante sobre como Marte podría ofrecer lugares protegidos; siendo clave para futuras misiones al planeta rojo!, Sin embargo, los autores consideran que es necesario de más información de las misiones no tripuladas y simular mejor los espacios y avanzar en la evaluación de la habitabilidad de estos tubos marcianos.

En la investigación hecha por Bastidas et al. (2022), respecto al “análisis de estabilidad de tubos de lava en Isla Galápagos”. Evaluaron el grado de seguridad de estas estructuras utilizando tres métodos empíricos de clasificación geomecánica. Esta investigación siguió 5 pasos: a) recopilaron información; posteriormente b) clasificaron el macizo rocoso a través de RMR y Q de Barton, luego aplicaron c) CGI (índice geotécnico de cavidades), seguidamente d) realizaron una modelación con los resultados obtenidos y e) a través de la comparación discutieron la metodología utilizada. El estudio concluye que la mejor opción para determinar la estabilidad de tubos de lava es el índice de Q de Barton, ¡pues los autores afirman que es el que más se aproxima a la observación realizada en campo!

Por ello, la justificación teórica de esta investigación es que permitirá un enfoque novedoso respecto a la exploración de tubos de lava planetarios como posibles habitas en la Luna y Marte, se pretende como tal, estimar las propiedades geomecánicas basando los análisis en los datos recolectados durante la visita al Centro de Simulación Análoga de Exploración Espacial de Hawaii (HI-SEAS) y la región del volcán Mauna Loa en el año 2021. A diferencia de estudios que se han centrado en la caracterización (morfológica y longitudinal) en otros cuerpos planetarios; esta investigación amplía el conocimiento porque analizaremos, de manera más profunda, una prospección y caracterización in situ en un lugar análogo con características muy similares a las de Marte. “En Perú hasta el momento no hay investigaciones relacionadas a este estudio por lo que el aporte de esta tesis será un primer paso para incluir otros profesionales a contribuir en esta área de impacto global”.

El interés práctico de esta investigación se enfoca en enfrentar los desafíos para la exploración de tubos de lava planetarios. En la actualidad, las agencias espaciales y empresa privadas destinan grandes recursos para la investigación de estos refugios que sirvan como hábitats seguros y sostenibles en otros cuerpos celeste como la Luna y Marte. Este estudio es clave, ya que permitirá a los investigadores tener una mejor visión al momento de tomar decisiones respecto al aprovechamiento de los tubos de lava y los recursos espaciales, lo cuales protegerían contra radiación y la temperatura extrema; reduciendo el requerimiento de estructuras que se vayan a construir en la superficie. “Pues será un gran salto para la humanidad y verdadero logro de la ingeniería”.

## CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

Este artículo presenta un estudio general de los tubos de lava planetarios en la Tierra, la Luna y Marte. De hecho, los tubos de lava han ganado mucha importancia en los últimos tiempos, y así lo pueden corroborar los más de 34 000 estudios relacionados con este tema publicados en bases de datos como Scopus, Scielo y Google Scholar. Luego de un proceso de selección, se seleccionaron 26 artículos para desarrollar los conceptos fundamentales presentados a modo de resumen. En la primera sección de los resultados, los autores resumieron el proceso de formación de estos lugares subterráneos utilizando AutoCAD 2023.

En segundo lugar, la sección de resultados presenta los datos geomecánicos recopilados durante mayo de 2021 en las antiguas regiones de flujos de lava y tubos de lava cerca del volcán Mauna Loa en la Isla Grande, Hawái, durante una expedición científica al campamento base HI-SEAS. La población estudiada incluyó las formaciones geológicas específicas de esas regiones volcánicas. HI-SEAS es un hábitat científico ubicado en la Isla Grande de Hawaii, a 2500 metros sobre el nivel del mar. Las ubicaciones de muestreo y experimento se ubicaron mediante un sistema GPS y se presentaron en este artículo utilizando Google Earth. La muestra de la presente investigación fue tomada de la región conocida como Caradhras. Se realizaron 39 recolecciones de esta área específica. Posteriormente, se llevó a cabo una evaluación cualitativa de la dureza de las rocas obtenidas, siguiendo las instrucciones de la prueba de rayado de roca. Los resultados de esta prueba se compararon mediante inspección visual para determinar las diferencias en la dureza de las muestras. Los datos geomecánicos se recopilaron utilizando un DRC marca Schmidt Hammer, número de serie 20M0183N. Este instrumento fue validado y certificado por la empresa peruana Geoteknik. El procedimiento experimental sigue las instrucciones de ASTM D5873. Las unidades de rebote obtenidas durante el experimento fueron convertidas a resistencia a la compresión libre de la roca (en MPa) utilizando curvas de

correlación con un  $R^2 > 0,91$ , a partir de una calibración preliminar de los ensayos de rebote con experimentos de resistencia a la compresión sobre hormigón según la norma UNI EN 12504 -2: 2001. Después de interpretar los resultados, los autores identificaron 20 métodos y procedimientos adicionales útiles para la prospección de tubos de lava, especificando su código estándar ASTM (Sociedad Estadounidense de Pruebas y Materiales) actual. Estos métodos nos permiten ampliar la adquisición de datos de los tubos de lava para futuras misiones planetarias.

El tipo de investigación es experimental y tiene un enfoque cuantitativo, respecto al diseño de dicho trabajo investigativo fue experimental, cuantitativo, transversal y prospectivo.

### **CAPÍTULO III. RESULTADOS**

Objetivo específico 01.

Caracterizar la geomecánica de tubos de lava in situ.

En la Tierra, la formación de tubos de lava (ver Figura 2) comienza cuando la lava emerge del volcán a una temperatura de 1100 a 1200 C° (Detay & Hroarsson, 2011) y una viscosidad entre  $10^1 - 10^2$  Pa\*s (López Ruiz & Cebriá, 2014) ( en comparación, la viscosidad del agua es de  $10^{-3}$  Pa\*s a 20°C (Bird, et al., 2007)). Durante el evento, las regiones en contacto con el aire experimentan un enfriamiento más rápido en comparación con las capas más profundas, lo que resulta en la formación de una "corteza" dura como capa aislante térmica. Primero, fragmentos de una cúpula de corteza sólida crecen sobre el flujo de lava (secuencia en la Figura 2 A). En segundo lugar, hay una acumulación gradual de porciones marginales de lava solidificada, que eventualmente forman una corteza en forma de domo sobre el canal de lava (Figura 2 B). Esta capa podría estar formada por una acumulación continuada de pequeños fragmentos sólidos arrastrados por el magma móvil y depositados en la sinuosidad del flujo de lava, como se ilustra en la Figura 2 C (López Ruiz & Cebriá, 2014). Los tubos de lava formados durante esta primera etapa comienzan con la adición de una fina capa de lava solidificada que se adhiere a ambos lados del canal (XA1). Si el volumen se mantiene constante, la corteza continúa creciendo hacia

el centro del canal hasta que ambos lados, unen los márgenes y logran la conclusión del domo (Figura 2 XA2). La corteza continúa aumentando en espesor y longitud hasta un nivel crítico para el colapso, donde los fragmentos solidificados pueden romperse cuando el nivel del flujo de lava cae abruptamente, formando hoyos a lo largo de la formación (YA2) (López Ruiz & Cebriá, 2014).

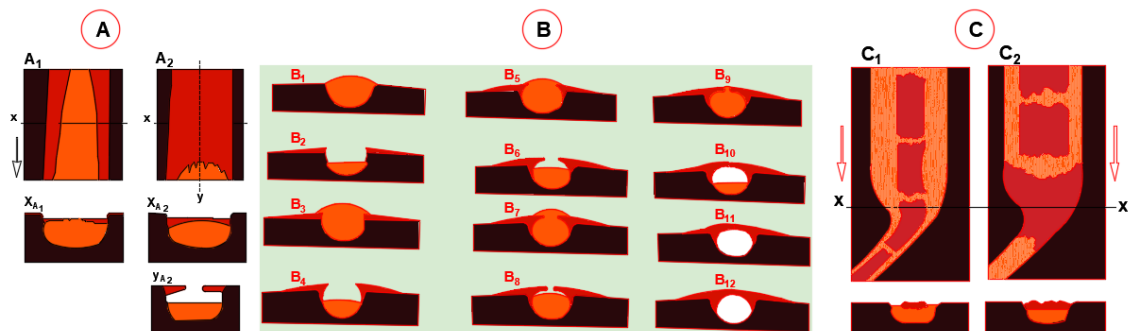
La segunda etapa ocurre durante las fluctuaciones en el nivel del flujo de lava que circula por el canal. Comienza con pequeños desbordamientos de lava en los márgenes externos del canal (Figura B2, B4); cuando estos alcanzan una magnitud significativa, se forma una gruesa capa de lava solidificada que podría completar el domo y cerrar el tubo (Figura B5, B6, B7). Si el volumen de lava aumenta, provocará el llenado completo del tubo (Figura B8), lo que resultará en un crecimiento significativo de la corteza y un aumento de la resistencia (Figura B9); posteriormente, la lava es evacuada disminuyendo su volumen y permitiendo que las paredes del tubo se enfríen y solidifiquen en grandes extensiones (Figura B10, B11, B12) (López Ruiz & Cebriá, 2014). Mientras que la capa de lava poco profunda forma una corteza, el magma fundido en las profundidades continúa fluyendo a una velocidad de 10 a 30 km/h. Una vez escurrida toda la lava, deja un espacio vacío a modo de caverna subterránea o labor minera de varios metros e incluso kilómetros de longitud, con un ancho y alto que oscila entre 0,5 y 30 m (Sauro et al., 2020; Léveillé & Datta, 2010).

Durante la segunda etapa, la intrusión de fragmentos de corteza que flotan sobre la lava y circulan por el canal, alcanzan áreas estrechas, por lo que gradualmente se acumulan e inician el proceso de formación del domo, finalizando el crecimiento de la sección superior e inferior del tubo (Figura 2 A3, B3 ) (López Ruiz & Cebriá, 2014). Dependiendo de la pendiente del terreno y la intensidad de la actividad volcánica, los tubos de lava pueden ser simples, sinuosos, rectilíneos, trenzados o de varios niveles (Sauro et al., 2020).

Mineralógicamente, los tubos de lava están formados por rocas basálticas con minerales como olivino, plagioclasa y piroxeno, fenocristales y texturas vesiculares o porfídicas (Ballarín, 2020).

En la Tierra, los principales tubos de lava se encuentran en Hawaii (UE), Canarias (España), Islandia, Queensland (Australia), Sicilia (Italia), la isla de Jeju (Corea del Sur) y Galápagos (Ecuador). En la Luna, alrededor de Gruithuisen ( $34,618^{\circ}$ - $43,467^{\circ}$ ) y Marius Hills ( $13,603^{\circ}$ - $58,047^{\circ}$ ), se han identificado posibles cavidades subterráneas similares a cadenas de colapso y pozos. Mientras estuvo en Marte, se han reconocido varios pozos profundos sobre antiguos flujos de lava como la entrada a estas formaciones subterráneas. Algunos ejemplos se encuentran en Arsia ( $-3.062^{\circ}$ - $123.930^{\circ}$ ) y Olympus Mons ( $19.456^{\circ}$ - $133.399^{\circ}$ ) (Sauro et al., 2020). Los datos de teledetección han detectado la existencia de más de 300 (Luna) y 1000 (Marte) características geológicas (ver Figura 1) que sugieren la presencia de tubos de lava extraterrestres (Sauro et al., 2020; Cushing, 2012).

**Figura 2.** Proceso de formación de tubos de lava



Nota. Proceso de formación de tubos de lava en la tierra. Elaborado por los autores en el software de diseño AutoCAD basado en J. López (López Ruiz & Cebriá, 2014).

### Un estudio de caso: prospección geomecánica en tubos de lava hawaianos

HI-SEAS, una base científica operada por la International MoonBase Alliance es una región de gran valor porque el hábitat se ubica sobre antiguos flujos de lava, casi sin presencia de vida silvestre (ni animales ni plantas), y por la cercanía a tubos de lava (Musilova et al., 2021). El área cercana fue utilizada con fines científicos por varias agencias espaciales, incluida la NASA y organizaciones de investigación, para simular la interacción social en condiciones de aislamiento para una futura base humana planetaria (Ganser & Lavery, 2023) y para recolectar

muestras geológicas. De hecho, Gustavo Jamanca-Lino, coautor de este artículo, visitó esta zona en 2021 como tripulante del equipo analógico Selene IV. Durante la estancia de 14 días, la tripulación vivió en completo aislamiento y realizó una estricta rutina, que incluyó control de la dieta, ejercicio físico, experimentos científicos y viajes de exploración a tubos de lava.

**Figura 3.** Base HI-SEAS



incluidas importantes regiones de referencia del antiguo flujo de lava.

El rol de Gustavo fue el de Oficial de Recursos Espaciales, y además de las actividades del equipo, realizó una serie de mediciones de las características geomecánicas del piso y paredes de los tubos de lava, utilizando la prueba de Schmidt Hammer, para medir indirectamente la resistencia a la compresión no confinada de la roca ( UCS) de las formaciones de lava. Las pruebas y recolección de muestras se aplicaron fuera de la base, primero, en la formación de piso basáltico denominada “Mordor” y “Punto Triple”, que se encuentran a más de 0.5 Km al sur de la base HI-SEAS (Ver Figura 3). El área denominada como punto triple, presenta tres formaciones geológicas coexistentes: Aa antiguo flujo de lava (muestra A), antiguo flujo de lava Smooth Pahoehoe (muestra B), y material de ceniza altamente erosionado (C). Estas regiones se presentan en la Figura 4.

**Figura 4.** Actividades en la antigua región de flujo de lava, cerca de HI-SEAS



Nota. A la (Izquierda) Vista aérea del área del punto triple. A la (Derecha) Ensayos de geomecánica, en la foto Gustavo Jamanca-Lino y Michaela Musilova.

La primera región correspondiente al antiguo flujo de lava Aa (región A) contiene ángulos y bloques de roca porque está asociada a una alta velocidad de deposición de magma, expandiendo el material fundido e impidiendo la formación de capas continuas; por lo tanto, fue imposible obtener datos geomecánicos de esta región debido al procedimiento estándar que sugiere una superficie plana y uniforme para reducir la desviación y el sesgo experimental. El segundo lugar explorado fue el antiguo flujo de lava suave Pahoehoe (región B), el cual presenta capas superpuestas depositadas en la superficie con una textura suave, continua y plana; en consecuencia, su origen y características se atribuyen a la baja velocidad del magma durante la formación. Por lo tanto, aunque la composición química y mineralógica es similar a la formación del flujo de lava Aa, la baja velocidad de deposición y el desplazamiento del magma marcan la diferencia en la textura. La Región C contiene cenizas y otros materiales muy afectados por la erosión, con baja cantidad de rocas centimétricas. Debido a la ausencia de una capa sólida continua, tampoco se realizaron pruebas allí. Después del reconocimiento visual del área, se

aplicó una prueba de rayado cualitativo sobre muestras de roca de 4 a 6 cm de diámetro. La región B fue identificada como el valor de dureza más alto.

Objetivo específico 02.

Analizar los datos y comparar con los niveles de resistencia existentes para estructuras.

Los datos geomecánicos se midieron en 20 puntos diferentes de la Región B. Los valores de rebote se registraron en el rango de 16 a 23, lo que representa 17 a 37 MPa. Según esto, la superficie presenta resistencia suficiente para permitir el tránsito de pequeños rovers y tripulaciones humanas sin riesgo de quedar atrapados. Sin embargo, la topografía y la estabilidad de los bloques pueden restringir la capacidad de movimiento. Visualmente, identifica algunas áreas con capas débiles que pueden romperse durante el tráfico continuo. En comparación, la mayoría de estos antiguos flujos de lava tienen una resistencia similar a la de las superficies residenciales comunes de hormigón (17 MPa), mientras que otras áreas son similares a las superficies residenciales de alta dureza (41 MPa). Por el contrario, las características de la región A, que presenta rocas angulares, dificultan el desplazamiento de un sistema robótico, e incluso las actividades de muestreo realizadas por humanos plantean riesgos de caída. La región C, que está formada principalmente por ceniza y tierra, tendría suficiente resistencia para soportar el movimiento de pequeños rovers, pero la fina granulometría supone un riesgo de atascamiento.

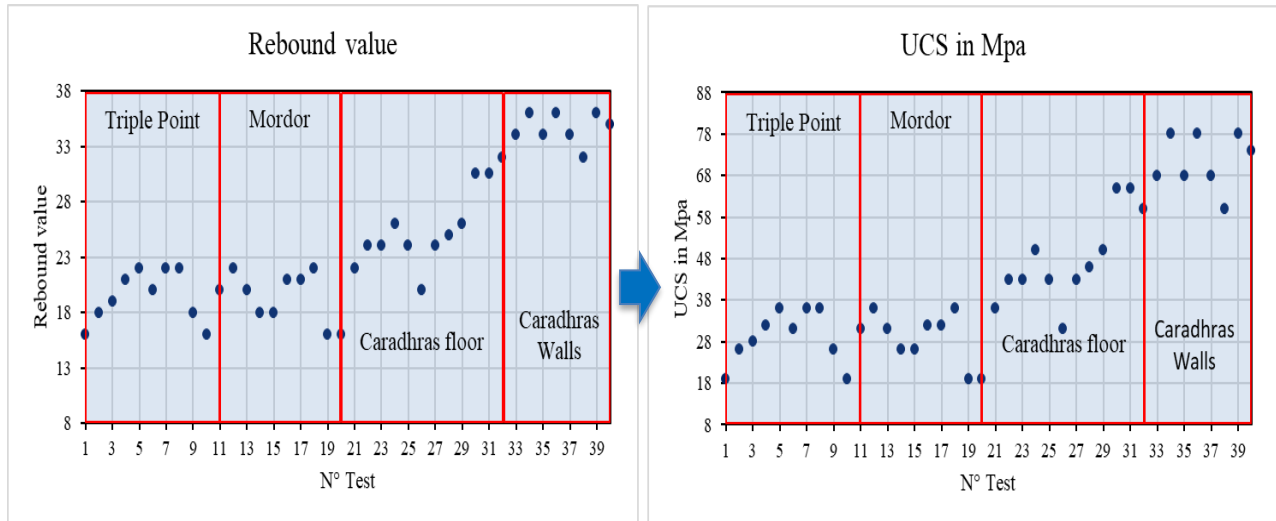
**Figura 5.** Actividades de muestreo y prueba en tubos de lava



Nota. En la foto Gustavo Jamanca-Lino realizando actividades de muestreo y prueba en tubos de lava

El segundo lugar visitado fue la región de tubos de lava denominada Caradhras, a 1 km de la base (ver Figuras 3 y 5). En las paredes se revelan varios flujos basálticos, probablemente provenientes de eventos volcánicos diferentes y secuenciales. Además, aparecen manchas blancas en el techo y las paredes debido a la interacción con microorganismos. Los valores de rebote del suelo basáltico oscilan entre 20 - 29 (42 - 67 MPa), y las paredes oscilan entre 32 - 38 (58 - 78 MPa). Estos valores son similares a los de los túneles mineros subterráneos, con una clasificación resistente de clase R4 (resistencia uniaxial de 50 a 100 MPa). Estas formaciones rocosas se consideran resistentes y, para mayor seguridad, pueden requerir soporte adicional (por ejemplo, apuntalamientos de madera para vigas y pilares). Los datos completos obtenidos se describen en las figuras 5 y 6.

**Figura 6.** Pruebas de resistencia a la compresión de la misión SELENE IV y resultados en MPa.



Nota. A la Izquierda las pruebas de resistencia a la compresión de la misión SELENE IV y a la derecha los resultados convertidos a MPa.

## CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN

Objetivo específico 03.

Discutir los resultados para aplicaciones en el espacio y la tierra.

Los autores sugieren las siguientes actividades para una caracterización extensa. El primer conjunto de procedimientos está relacionado con la detección, forma, pendiente de buzamiento e interconexión de estos túneles naturales. Los métodos geofísicos como la gravimetría, el radar de penetración terrestre (GPR), la refracción sísmica y la resistividad eléctrica podrían adaptarse para un estudio aéreo o terrestre de tubos de lava y cavernas cercanas a las regiones volcánicas. En segundo lugar, los sistemas robóticos (como rovers o drones teleoperados) podrían recopilar datos topográficos internos utilizando LiDAR (Light Detección y Rango o Láser Imaging Detección y Rango) para una mejor descripción de las irregularidades y el acceso. Finalmente, una vez que se detecte y cartografíe en general el tubo de lava, una tripulación o un sistema robótico podría explorar geoquímicamente in situ y clasificar

geomecánicamente la formación. Un buen ejemplo de caracterización química y mineralógica in situ se aplica actualmente a bordo del Perseverance y Opportunity mediante espectroscopia de rayos X y emisión térmica para explorar Marte. (Node & Washington University, s/f) y (*Mini-TES*, s/f).

Según los datos recogidos en Hawaii, los tubos de lava basáltica serían calificados como "resistentes" (R4), estables y no requerirían soporte adicional para resistir eventos sísmicos. Estas formaciones serían adecuadas para la construcción de estructuras o instalaciones subterráneas en su interior. Con el fin de garantizar la seguridad y continuidad de las operaciones Hernández & Santamarta (2015), las pruebas geomecánicas utilizadas en la minería subterránea para analizar la calidad del túnel, la resistencia a la fractura y la capacidad de carga podrían adaptarse a estos entornos. Incluye el análisis de designación de calidad de roca (RQD), índice geomecánico de cuevas (CGI), índice Q de Barton y calificación del macizo rocoso (RMR) para determinar la estabilidad del macizo rocoso. Los datos generados por estas pruebas serán esenciales para la fase de planificación del soporte geomecánico, la construcción civil y el monitoreo. Además, el uso del martillo Schmidt podría adaptarse para una medición indirecta de UCS, y se podrían usar sistemas visuales (por ejemplo, cámaras y mapeo 3D con LIDAR) para detectar fracturas en las paredes y el techo de la caverna para una evaluación cuantitativa. En función de los resultados obtenidos se decidirá el despliegue de apoyos adicionales (por ejemplo, apuntalamientos de madera para vigas y pilares, refuerzo con hormigón proyectado o mallas electrosoldadas en zonas locales con riesgo de colapso). Al diseñar sistemas para evaluar las propiedades geomecánicas y la resistencia de estas formaciones rocosas, los ingenieros podrían concebir y perfeccionar diseños de construcción civil apropiados para tubos de lava en la Luna y Marte, como hábitats o estaciones de investigación.

Dos aspectos importantes para determinar la génesis del macizo rocoso y su potencial civil para los hábitats humanos son la dureza superficial (capacidad de resistir deformaciones o abrasiones en su superficie) y la resistencia (capacidad de soportar fuerzas o presiones

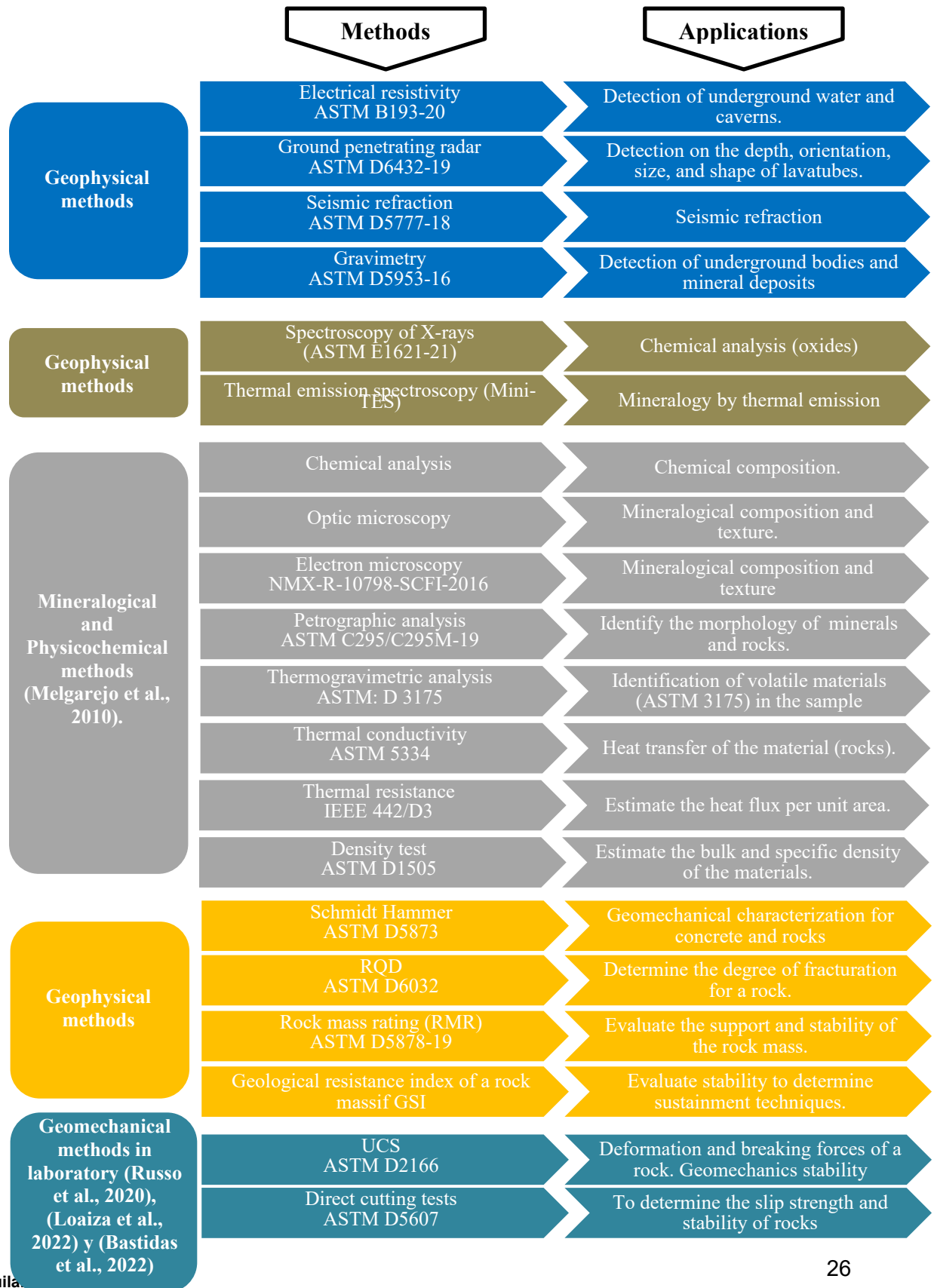
continuas). En los tubos de lava ambas características varían según las condiciones de formación, como flujos de lava volcánica (basaltos, traquitas y fonolitas) o flujos de piroclastos volcánicos. Mientras que el primer grupo es un material uniforme con mayor densidad y resistencia, el segundo está formado por materiales fragmentados de alta porosidad y baja densidad. Por lo general, ambos grupos aparecen con mucha frecuencia de forma alternada y entremezclada, afectando la formación del macizo rocoso. Por lo tanto, para cumplir con los estándares de seguridad, es necesario realizar pruebas in situ y de laboratorio en diferentes zonas de la formación. Estos datos permiten modelar el comportamiento geomecánico de la formación subterránea, y determinar si requiere sistemas de soporte adicionales para evitar colapsos o hundimientos en la estructura rocosa. Para toda la actividad de prospección, los autores sugieren la lista de métodos descritos en la Figura 7.

Los tubos de lava se pueden utilizar como fuentes para la extracción de minerales planetarios y actividades de utilización de recursos in situ. En la Tierra, el basalto, rico en hierro, es un recurso esencial para la construcción de herramientas, maquinaria e infraestructuras. De manera similar, en la Luna, el basalto podría satisfacer la demanda futura de construcción civil. De hecho, en la superficie lunar es necesario construir carreteras, hábitats y pistas de aterrizaje utilizando materiales in situ. Se han propuesto técnicas como la sinterización o la fundición del regolito para fabricar ladrillos como materiales de soporte en la construcción civil. Aunque estos ladrillos se venderían como subproductos de las actividades de extracción, su formación implica un consumo intensivo de energía. Por el contrario, los tubos de lava ofrecen "ladrillos" naturales que sólo requieren operaciones de perforación y corte, que consumen menos energía en comparación con las operaciones térmicas mencionadas anteriormente. Por lo tanto, la extracción directa de basaltos lunares de formaciones de tubos de lava es una tecnología competitiva para la construcción civil y, aunque requiere más evaluación, debe considerarse junto con otras tecnologías de fabricación como la fabricación aditiva, la sinterización y la fundición. De hecho, los basaltos lunares son una fuente de un material homogéneo con propiedades

superiores al regolito lunar, lo que los hace útiles para la fabricación aditiva (impresión 3D) y abre un amplio espectro de posibilidades en la fabricación de estructuras y componentes. Así, el basalto lunar sería una piedra angular en el desarrollo de asentamientos de construcción civil en el espacio, aumentando el valor potencial económico de los tubos de lava lunares.

Además, el basalto lunar es una rica fuente de oxígeno, hierro y silicio, tres de los principales recursos necesarios para los futuros hábitats lunares. Sin embargo, la utilización del basalto lunar para actividades metalúrgicas requiere la implementación de operaciones de trituración y molienda en la superficie lunar. Aunque todavía no existe un estudio oficial sobre las técnicas de conminución en superficies extraterrestres y la mayoría de los investigadores sugieren procesar directamente el regolito ultrafino, la eficiencia de una etapa de beneficio utilizando regolito es incierta debido al efecto de degradación de los micrometeoroides lunares, que han convertido el original. minerales monofásicos en granos mixtos fractales con dos o tres fases de mineral en el mismo grano, lo que hace que las técnicas de concentración sean más desafiantes y reduce la posibilidad de obtener concentrados de alta pureza.

Figura 7. Métodos de geomecánica: in situ y en laboratorio.



(Bermejo et al, 2014), (Russo et al., 2020) y (Bastidas et al., 2022).

Nota. Lista de métodos in situ y de laboratorio que sugieren los autores para toda la actividad de prospección en un tubo de lava.

Por el contrario, el entorno del tubo de lava preserva la formación original de minerales, lo que hace que sea más práctico concentrar minerales de basalto directamente que el regolito lunar, para obtener concentrados de alta pureza con altos niveles de recuperación. Desde una perspectiva adicional de las ciencias de los materiales, el basalto lunar es un mineral potencial para producir fibras de lana y láminas de vidrio, lo que beneficia a diversas industrias, como la construcción y la energía solar, al ofrecer una fuente local y sostenible de estos materiales clave.

En cuanto al potencial astrobiológico, en la Tierra los tubos de lava son entornos naturales que albergan diferentes microorganismos (cianobacterias, micelios de hongos y diatomeas) que pueden crecer sin condiciones de luz solar y absorber sílice o hierro según lo permita su estructura microbiana. Por lo tanto, es posible que los tubos de lava sirvan como refugios potenciales para la vida microbiana antigua en Marte (Léveillé & Datta, 2010), y se debe abordar la adquisición de datos. Actualmente, el rover Perseverance de la NASA está utilizando una variedad de técnicas para buscar indirectamente signos de vida en el planeta rojo, como la fluorescencia de rayos X (PIXL) Aeroespacial (2021), y el instrumento LIBS (espectroscopia de descomposición inducida por láser) Amazings & NCYT (2021). Se podrían probar estrategias y métodos similares para la detección indirecta y directa de microorganismos en tubos de lava para encontrar organismos quimiotróficos resistentes (microorganismos capaces de obtener nutrientes de minerales) que podrían existir en el planeta rojo.

La exploración de tubos de lava puede proporcionarnos información relevante para el campo geológico y ayudarnos a comprender la historia de las erupciones volcánicas circundantes y la composición de la lava. Con base en los datos recolectados, concluimos que la resistencia geomecánica a lo largo de los flujos de lava superficiales no es constante y tiene una desviación estándar alta, afectada por la proximidad de zonas de transición, donde las capas se vuelven

frágiles. En segundo lugar, la transitabilidad de los rovers y robots es posible, pero son preferibles sistemas más ligeros para evitar daños en las zonas frágiles. Por el contrario, el suelo dentro de los tubos de lava es más resistente, al igual que las superficies de cemento duro de los edificios industriales, por lo que puede soportar vehículos exploradores más pesados y con mayor carga útil. En general, las formaciones de tubos de lava son lo suficientemente estables y fuertes como para no necesitar soporte geotécnico, pero se deben tomar consideraciones adicionales, como el cálculo de RMR, RQD y GSI. Finalmente, las estrategias de seguridad que incluyan el monitoreo de gases son cruciales para garantizar las expediciones humanas. Además del potencial científico de los tubos de lava terrestres, otra aplicación interesante podría estar relacionada con la producción de materiales estructurales ligeros, con alta resistencia mecánica y capacidad de aislamiento térmico frente a radiaciones ultravioleta y no ionizantes. Más allá de la Tierra, los tubos de lava son posibles refugios naturales para los asentamientos humanos como protección en otros planetas. Finalmente, los recursos basálticos en tubos de lava junto con el regolito poco profundo se posicionan como pilares fundamentales en la expansión y desarrollo de la humanidad en el espacio.

## CAPÍTULO V: CONCLUSIONES

Los autores sugieren las siguientes actividades para una caracterización exhaustiva. El primer conjunto de procedimientos se relaciona con la detección, forma, pendiente de buzamiento e interconexión de estos túneles naturales. Métodos geofísicos como la gravimetría, el georradar (GPR), la refracción sísmica y la resistividad eléctrica podrían adaptarse para un estudio aéreo o terrestre de tubos de lava y cavernas cercanas a las regiones volcánicas. En segundo lugar, sistemas robóticos (como rovers o drones teleoperados) podrían recopilar datos topográficos internos utilizando LiDAR (detección y alcance por luz o detección y alcance por imágenes láser) para una mejor descripción de la rugosidad y el acceso. Finalmente, una vez detectado y mapeado el tubo de lava, una tripulación o un sistema robótico podría explorar geoquímicamente in situ y clasificar geomecánicamente la formación. Un buen ejemplo de caracterización química y mineralógica in situ se aplica actualmente a bordo del Perseverance y el Opportunity mediante espectroscopia de emisión térmica y de rayos X para explorar Marte.

## REFERENCIAS

- Aeroespacial, A. (2021, julio 22). El rover Perseverance de la Nasa empieza su búsqueda de signos de vida en Marte. Actualidad Aeroespacial.
- Amazings & NCYT (Ed.). (2021). Proponen un método de análisis rápido para encontrar huellas biológicas en Marte. <https://noticiasdelaciencia.com/art/42263/proponen-un-metodo-de-analisis-rapido-para-encontrar-huellas-biologicas-en-marte>
- Ballarín, P. (2020, noviembre 19). Composición de los magmas. *Biologia-geologia.com*. [https://biologia-geologia.com/geologia/334\\_composicion\\_de\\_los\\_magmas.html](https://biologia-geologia.com/geologia/334_composicion_de_los_magmas.html)
- Bastidas, G., Soria, O., Mulas, M., & Bordehore, L. (2022). Análisis de Estabilidad y Riesgos Asociados a las Cuevas Vol- 2 cáncas de las Islas Galápagos: comparación de Métodos Empí- 3 ricos y Numéricos. <https://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/123456789/57493/BASTIDAS%20SORIA%20%20%20T-70538.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>
- Bastidas, G., Soria, O., Mulas, M., & Bordehore, L. (2022). Análisis de Estabilidad y Riesgos Asociados a las Cuevas Volcánicas de las Islas Galápagos: comparación de Métodos Empíricos y Numéricos. <https://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/123456789/57493/BASTIDAS%20SORIA%20%20%20T-70538.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>
- Bermejo et al, L. (2014). Técnicas de prospección geofísica aplicadas a yacimientos kársticos: Tomografía de Resistividad Eléctrica (ERT) en el Karst de Ojo Guareña. [https://cir.cenieh.es/bitstream/20.500.12136/637/1/Técnicas%20de%20prospección%20geofísica%20aplicadas%20a%20yacimientos%20kársticos%20Tomografía%20de%20Resistividad%20Eléctrica%20%28ERT%29%20en%20el%20karst%20de%20Ojo%20Guareña\\_Bermejo\\_et\\_al\\_2014.pdf](https://cir.cenieh.es/bitstream/20.500.12136/637/1/Técnicas%20de%20prospección%20geofísica%20aplicadas%20a%20yacimientos%20kársticos%20Tomografía%20de%20Resistividad%20Eléctrica%20%28ERT%29%20en%20el%20karst%20de%20Ojo%20Guareña_Bermejo_et_al_2014.pdf)
- Cushing, G. (2012). Candidate cave entrances on Mars. *Journal of cave and karst studies: the National Speleological Society bulletin*, 74(1), 33–47. <https://doi.org/10.4311/2010ex0167r>
- Detay, M., & Hroarsson, B. (2011). Túneles de lava. 62. <https://www.researchgate.net/publication/263621095>
- Ganser, A., & Lavery, C. (Eds.). (2023). *Maritime Mobilities in Anglophone Literature and Culture*. Springer International Publishing.
- Guerra, C., Gustavo, J., Rincon, S., Rezich, E., & Casasbuenas, I. (2022). Geomechanics on the Moon. A prospecting mission architecture concept. *Proceedings of 73rd International Astronautical Congress (IAC), Paris, France.*, [https://www.researchgate.net/publication/364811555\\_Geomechanics\\_on\\_the\\_Moon\\_A\\_prospecting\\_mission\\_architecture\\_concept](https://www.researchgate.net/publication/364811555_Geomechanics_on_the_Moon_A_prospecting_mission_architecture_concept)

- Hernández, L., & Santamarta, J. (2015). Ingeniería geológica en terrenos volcánicos métodos, técnicas y experiencias en las Islas Canarias. Ilustre Colegio Oficial de Geólogos. [https://oa.upm.es/40578/1/INGENIERIA\\_GEOLOGICA\\_TERRENOS\\_VOLCANICOS\\_1.pdf](https://oa.upm.es/40578/1/INGENIERIA_GEOLOGICA_TERRENOS_VOLCANICOS_1.pdf)
- Jamanca, G., Aoun, W., Roy, E., Chloé, C., Böttge, A., & Stéphanie, G. (2021). REDMARS - Lowering the Perchlorate for agriculture on Mars and In-situ resource utilization. International Astronautical Federation (IAF), A5, 16. [https://www.researchgate.net/publication/362112906\\_REDMARS\\_-\\_Lowering\\_the\\_Perchlorate\\_for\\_agriculture\\_on\\_Mars\\_and\\_In-situ\\_resource\\_utilization](https://www.researchgate.net/publication/362112906_REDMARS_-_Lowering_the_Perchlorate_for_agriculture_on_Mars_and_In-situ_resource_utilization)
- Léveillé, R. J., & Datta, S. (2010). Lava tubes and basaltic caves as astrobiological targets on Earth and Mars: A review. *Planetary and Space Science*, 58(4), 592–598. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2009.06.004>
- Loaiza, S., Rodríguez, G., & Mulas, M. (2022). Análisis de estabilidad de la cueva volcánica El Mirador de los 2 Túneles (Islas Galápagos, Ecuador) combinando métodos empíricos, numéricos, técnicas remotas y realidad virtual. <https://www.dspace.espol.edu.ec/retrieve/11a9d682-05c0-4d36-bd16-50f667765d2c/T-70540%20RODRIGUEZ.pdf>
- López, J., & Cebriá, J. (2014). Tipología de las Lavas generadas en Ambiente Subaéreo por las Erupciones Basálticas. *Revista de la sociedad española de mineralogía*, 8. [https://www.semineral.es/websem/PdfServlet?mod=archivos&subMod=publicaciones&archivo=Macla14\\_012.pdf](https://www.semineral.es/websem/PdfServlet?mod=archivos&subMod=publicaciones&archivo=Macla14_012.pdf)
- Marín, D. (2011). La radiación en el espacio. <https://danielmarin.naukas.com/2011/03/23/la-radiacion-en-el-espacio/>
- Melgarejo, J. C., Proenza, J. A., & Gali y X. LL. Llovet, S. (2010). Técnicas de caracterización mineral y su aplicación en exploración y explotación minera. Scielo. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-33222010000100002](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-33222010000100002)
- Mini-TES. (s/f). Nasa.gov. Recuperado el 13 de septiembre de 2023, de <https://mars.nasa.gov/mer/mission/instruments/mini-tes/>
- Musilova, M., Foing, B., & Rogers, H. (2021). Simulating lava tube exploration research during analog lunar and Martian missions at HI-SEAS in Hawaii. En EGUGA (pp. EGU21-14600). <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-14600>
- NASA. (2024a, enero 11). Moon fact sheet. Nasa.gov. <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/moonfact.html>
- NASA. (2024b, marzo 7). HiRISE spots the mouth of a martian lava tube –. NASA Mars Exploration. <https://mars.nasa.gov/resources/26349/hirise-spots-the-mouth-of-a-martian-lava-tube/>

- NASA. (2024c, octubre 3). Mars fact sheet. Nasa.gov.  
<https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/marsfact.html>
- Node, P. G., & Washington University. (s/f). Alpha particle X-ray spectrometer (APXS). Wustl.edu. Recuperado el 13 de septiembre de 2023, de <https://an.rsl.wustl.edu/help/Content/About%20the%20mission/MER/Instruments/MER%20APXS.htm>
- R. B. Bird, W. E. Stewart (2007). Lightfoot. Viscosity of Liquids and Gases, 2ª edición, John Wiley & Sons, pag 10.
- Russo, A., Vela, I., & Hormazabal, E. (2020). Cuantificación del Índice de Resistencia Geológica Intacta para Macizos Rocosos en Ambientes Hipógenos. MassMin. <https://cdn-web-content.srk.com/upload/user/image/Cuantificación%20del%20Indice%20de%20Resistencia%20Geológica%20Intacta20210826100427320.pdf>
- Sauro, F., Pozzobon, R., Massironi, M., De Berardinis, P., Santagata, T., & De Waele, J. (2020). Lava tubes on Earth, Moon and Mars: A review on their size and morphology revealed by comparative planetology. Earth-Science Reviews, 209(103288), 103288. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103288>
- Steigerwald, W. (2022, julio 26). NASA's LRO finds lunar pits harbor comfortable temperatures. NASA. <https://www.nasa.gov/solar-system/nasas-lro-finds-lunar-pits-harbor-comfortable-temperatures/>
- Viúdez-Moreiras, D. (2021). The ultraviolet radiation environment and shielding in pit craters and cave skylights on Mars. Icarus, 370(114658), 114658. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2021.114658>