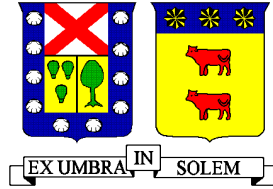


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y DE MATERIALES
SANTIAGO - CHILE



**DISEÑO DE PROTOTIPO DE MAQUINARIA AUTÓNOMA CAPAZ DE EXTRAER
MINERALES DESDE ASTEROIDES TIPO M**

ALLAN PAUL RAFAEL ARAVENA ZAPATA

Memoria para optar al Título de
Ingeniería Civil de Minas

Profesor Guía
Víctor Encina

Julio de 2025



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título; ☐ Tesis de Postgrado;

Título del trabajo: DISEÑO DE PROTOTIPO DE MAQUINARIA AUTÓNOMA CAPAZ DE EXTRAER MINERALES DESDE ASTEROIDES TIPO M

Nombre del candidato(a): Allan Paul Rafael Aravena Zapata

Carrera / Grado: Ingeniería Civil de Minas

Campus: Santiago San Joaquín ; **Departamento:** DIMMM

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Víctor Encina Montenegro, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

☒ El trabajo **NO contiene información que amerite confidencialidad** y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por:

☐ 6 meses; ☐ 12 meses; ☐ 2 años; ☐ 3 años; ☐ 5 años; ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 24/07/2025

; Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 24/07/2025

; Firma:

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

Contenido

CAPÍTULO 1: RESUMEN	4
CAPÍTULO 2: INTRODUCCIÓN	5
2.1 General	5
2.2.- Objetivos	6
2.3.- Alcances	6
CAPÍTULO 3: MARCO TEÓRICO	7
CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA	9
CAPÍTULO 5: ¿CÓMO ES LA MINERÍA EN LA TIERRA?	10
5.1 Requisitos previos	10
5.2 Métodos de explotación minera	10
5.3 Maquinaria para la explotación minera	12
5.4 Requerimientos operaciones mineras	12
5.5 Requerimientos para el procesamiento de minerales	14
CAPÍTULO 6: ¿CÓMO SERÍA LA MINERÍA EN MARTE APLICANDO LA TECNOLOGÍA MINERÍA VIGENTE?	16
6.1 Primer escenario: Minería con condiciones actuales del planeta	16
6.2 Segundo escenario: Minería con terraformación	23
CAPÍTULO 7: COMPARACIÓN DE MINERÍA CONVENCIONAL EN OTROS ASTROS	29
7.1 Planetas	29
7.2 La Luna	34
7.3 Asteroides	35
CAPÍTULO 8: CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES	37
Referencias	38

CAPÍTULO 1: RESUMEN

La minería espacial representa uno de los grandes desafíos y oportunidades del futuro, impulsada por la necesidad de abastecer asentamientos humanos más allá de la Tierra ante una posible escasez de recursos naturales por el crecimiento demográfico y tecnológico. Cuerpos celestes como Marte, Venus, Mercurio, la Luna y los asteroides han sido estudiados por su potencial mineralógico, incluyendo elementos valiosos como hierro, níquel, platino, paladio y hasta agua en forma de hielo. Sin embargo, sus condiciones físicas, desde la ausencia de atmósfera y presión, temperaturas extremas, hasta niveles de gravedad significativamente diferentes, afectan directamente tanto las operaciones mineras como el procesamiento de minerales tal como se realiza en la Tierra.

Métodos convencionales como perforación y tronadura pierden efectividad por la falta de oxígeno y por cambios en la propagación de ondas de choque, lo que impide el uso de explosivos tradicionales. Carguío y transporte se ven alterados por la baja gravedad, reduciendo la tracción de vehículos y la estabilidad de taludes. Además, los componentes de maquinaria terrestre se degradan rápidamente en estos ambientes por radiación intensa y fluctuaciones térmicas que provocan expansión y contracción de materiales. En procesamiento de minerales, la baja presión, la composición atmosférica y la temperatura alteran la formación de burbujas en flotación, la eficiencia en lixiviación hidrometalúrgica, y las condiciones para reacciones pirometalúrgicas y electrometalúrgicas.

Cada cuerpo celeste presenta desafíos únicos: Venus tiene una atmósfera corrosiva y presiones aplastantes, Mercurio alterna temperaturas de -180°C a 430°C , Marte enfrenta temperaturas extremas y baja atmósfera, mientras que la Luna y los asteroides carecen completamente de una atmósfera y tienen niveles mínimos de gravedad. Todo esto obliga a desarrollar maquinaria especializada que pueda operar en estos entornos, automatizada y resistente, además de adaptar o reinventar procesos metalúrgicos para funcionar de forma segura y eficiente. En conjunto, estos aspectos forman el núcleo de las implicancias técnicas y ambientales de la minería espacial, un campo que exige innovación, ingeniería avanzada y una nueva visión de cómo se extraen los recursos más allá de nuestro planeta.

CAPÍTULO 2: INTRODUCCIÓN

2.1 General

La minería espacial, una vez considerada ciencia ficción, está emergiendo como una realidad posible con implicaciones profundas para la humanidad. Esta considera la extracción de minerales y recursos de cuerpos celestes fuera de la Tierra, como asteroides, la Luna y otros planetas. Esta actividad desafía los límites de la exploración espacial convencional y promete abrir nuevas fronteras en la obtención de recursos fundamentales para la industria, la tecnología y la sostenibilidad.

La minería espacial ofrece una serie de implicancias significativas que abarcan desde el avance tecnológico hasta el cambio económico y ambiental. En primer lugar, representa una oportunidad única para diversificar y asegurar el suministro de recursos esenciales para la humanidad. Los asteroides, por ejemplo, contienen una vasta riqueza de minerales como metales preciosos, metales básicos y materiales volátiles que son escasos en la Tierra, pero críticos para la industria moderna. Además, se tiene el potencial de impulsar avances tecnológicos significativos en campos como la robótica, la ingeniería de materiales y la propulsión espacial. La necesidad de desarrollar tecnologías innovadoras para la exploración y extracción de recursos en entornos extremos del espacio desafiará los límites de la ingeniería y la ciencia.

A nivel económico, la minería espacial podría generar nuevas oportunidades comerciales y transformar la economía global. La disponibilidad de recursos extraterrestres podría reducir la dependencia de la Tierra de los suministros terrestres, lo que podría alterar las dinámicas del mercado y crear nuevas industrias.

En este trabajo se realiza una investigación para constatar lo necesario para realizar minería espacial, comparando las tecnologías y métodos utilizados en la minería convencional en la Tierra y los necesarios para realizar la minería espacial. Esta comparación permitirá identificar las brechas y desafíos técnicos que deben superarse para adaptar y desarrollar tecnologías y procesos efectivos para la minería espacial.

2.2.- Objetivos

Objetivo general

Analizar las implicancias técnicas y ambientales de la minería espacial en el contexto actual de la minera en la Tierra.

Objetivos específicos

- Establecer puntos críticos en la minería en Marte (extracción-procesamiento)
- Establecer requerimientos tecnológicos prioritarios para desarrollar minera en Marte

2.3.- Alcances

- Para la realización de este estudio se analizarán las dificultades de la minería en el espacio exterior, considerando los cuerpos celestes más cercanos a al planeta Tierra.
- El estudio es un desarrollo conceptual de la minería en el espacio, enfocándose en Marte y limitándose a la extracción y procesamiento de minerales.
- No se aborda la evaluación económica de la minería espacial.

CAPÍTULO 3: MARCO TEÓRICO

Características físicas y condiciones ambientales de los planetas y asteroides

Tabla 1: Magnitudes físicas de cada astro estudiado

Cuerpo celeste	Temperatura (°C)	Gravedad (m/s ²)	Atmósfera	Campo Magnético (μT)
Mercurio	-180 a 430 (Agency, 2017)	3,7 (Agency, 2017)	Composición: oxígeno (42%), sodio (29%), hidrógeno (22%), helio (6%) y gases traza Presión: 10 ⁻¹⁴ atm Radiación: 6.272 – 14.448 W/m ² (Agency, 2017)	0,3
Venus	438 a 482 (National Weather Service), 2021)	8,87 (Williams, 2024)	Composición: 96,5% dióxido de carbono y 3,5% nitrógeno (Basilevsky et al, 2003) Presión: 92 atm (Taylor F. W., 2014). Radiación: 2660 W/m ² (Clarín, 2016)	0 – 0,00001
Marte	-153 a 20 (NASA, 2013)	3,72 (Hirt, 2012)	Composición: Dióxido de carbono (95%), con trazas de otros gases como el argón (1.6%) y el nitrógeno (3%) Presión: 0,0075 atm Radiación: 493 - 717 W/m ² (NASA, 2013)	0 – 1,5
Luna	-173 a 117 (bugby, 2010)	1,62 (Williams, 2006)	Composición: 65% argón, 19% helio, 16% neón y 0,11% de sodio, potasio e hidrógeno. (Benna et al, 2015) Presión: 10 ⁻¹⁵ atm (Williams, 2006) Radiación: 1368 W/m ² (Williams, 2006)	0 – 0,001
Asteroides	-108 a -73 (Low, 1984)	0,00001 a 0,284 (Park, 2019)	Composición: No presenta Presión: No presenta Radiación: 245 W/m ²	-
Tierra	-25 a 45 (Observatory, 2024)	9,81	Composición: 78% N ₂ , 21% O ₂ (Williams, 2024) Presión: 1 atm Radiación: 1361 W/m ² (Williams, 2024)	25 - 65

Tabla 2: Características superficiales de cada astro estudiado

Cuerpo celeste	Morfología Superficial
Mercurio	Morfología: Cráteres de impacto, acantilados, llanuras Corteza: Alta en S, baja en Fe Mineralogía-rx: Piroxeno (Enstatita) y Olivino (Forsterita). Plagioclasa (Na) y minerales de Mg, Ca y sulfuros (Fe). En zonas menos reflectantes: Grafito (Nittler et al, 2019)
Venus	Morfología: Volcanes, flujos de lava (Gilmore et al, 2023) Corteza: Alta en feldespato (anortita, albita y ortoclasa) (Nicolayeva, 1990) Mineralogía-rx: Mayormente basalto (Gilmore et al, 2023)
Marte	Morfología: Cráteres de impacto, montañas, cañones y llanuras (Wyatt et al, 2002). Corteza: Si, O, Fe, Mg, Al, Ca y K (Foley et al, 2008) Mineralogía-rx: Olivino, piroxeno, feldespatos (Ehlmann et al, 2014)
Luna	Morfología: Cráteres de impacto, montañas, valles, polvo y regolito. (Taylor, 1975) Corteza: Alta en anortosita (Lucey, 2006) Mineralogía-rx: SiO₂, Al₂O₃, CaO, MgO, TiO₂, entre otros. (Taylor, 1975)
Asteroides	Morfología: Puede ser montón de escombros o monolito fracturado (Hartzell et al., 2013) Corteza: No aplica Mineralogía-rx: -Tipo M: Metales (níquel y hierro) -Tipo S: Silicatos (olivino y piroxeno) -Tipo C: Carbonáceos (carbono, agua y materiales orgánicos) (Bus & Binzel, 2002)
Tierra	Morfología: Superficie sólida, montañas, valles, cañones, llanuras y océanos (NASA, 2024) Corteza: 46% O, 28% Si, 8% Al, 5% Fe, 2% (Na, Mg, K) y <1% (Ti, H, P). (Lide, 2005) Mineralogía-rx: Rocas silíceas, andesita y basalto (Robertson, 2011)

CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA

Con el fin de cumplir con los objetivos propuestos en esta memoria, se realizaron una serie de tareas:

1. Revisión bibliográfica acerca de la minería espacial, acerca de los planetas, asteroides y satélites, haciendo enfoque en sus condiciones extremas, tecnologías y métodos propuestos para soportar o contrarrestar las condiciones sin afectar el rendimiento de la extracción de minerales.
2. Analizar los requerimientos de la minería y del procesamiento de minerales en nuestro planeta, los cuales corresponden a la tecnología vigente. Analizar, en base a nuestra tecnología, vigente cómo sería realizar minería en Marte y extrapolar a otros cuerpos celestes.
3. Sintetizar los hallazgos de la investigación y análisis para identificar las implicancias técnicas y científicas actuales de la minería espacial. En base a esto, elaborar conclusiones sobre el desafío de extraer minerales en el espacio en el contexto actual.

CAPÍTULO 5: ¿CÓMO ES LA MINERÍA EN LA TIERRA?

5.1 Requisitos previos

Para la realización de minería, se requieren una serie de requisitos previos a la explotación del yacimiento.

- Permisos y regulaciones: Se necesitan concesiones mineras (exploración y explotación), estudios de impacto ambiental, permisos de agua, tierra y sociales.
- Geología y prospección: Se necesitan realizar estudios geológicos y toma de muestras para identificar la composición, estructura, distribución, presencia y distribución de minerales.
- Mapeo: Se requieren mapas topográficos del área de interés económica, detallando distribución geológica, estructuras y zonas de mineralización.
- Modelo de bloques: Se crea este modelo, con previa evaluación geoestadística, el cual indica la distribución espacial de los recursos minerales, el volumen, ley, etc.
- Estudio de factibilidad: Se realiza el diseño de la mina, métodos de extracción, se eligen las tecnologías y maquinarias necesarias para la explotación. Se realiza un análisis de rentabilidad mediante herramientas financieras.
- Planificación y gestión: Se desarrolla un plan minero y plan de inversiones.

5.2 Métodos de explotación minera

La minería en superficie se divide en tres métodos:

- **Minería a rajo abierto**

El método de extracción se lleva a cabo en la superficie terrestre, donde se remueve la capa superficial de material, mediante explosivos, para acceder a los depósitos de minerales que se encuentran debajo. Los principales procesos son:

- Perforación y tronadura: Este proceso implica la perforación de pozos en la roca para insertar explosivos que fracturen el material, facilitando su extracción. La perforación se realiza en mallas de perforación diseñadas específicamente para maximizar la fragmentación de la roca y permitir un tamaño adecuado para el carguío y transporte posterior. La tronadura debe planificarse cuidadosamente para minimizar la vibración y el impacto en áreas cercanas, respetando también las normativas de seguridad y control de explosivos.

- **Carguío y transporte:** Después de la tronadura, el material fragmentado se carga en camiones de transporte, comúnmente con el uso de maquinaria pesada como palas y cargadores. Este proceso implica transportar el mineral desde el rajo hasta las áreas de procesamiento o almacenamiento. La eficiencia en carguío y transporte es fundamental, ya que representa uno de los costos operativos más elevados en minería a cielo abierto.
- **Geotecnia:** La geotecnia en minería a rajo abierto se enfoca en la estabilidad de taludes y paredes de la mina para evitar derrumbes o deslizamientos. Mediante análisis de la composición y estructura de las rocas, se determina la inclinación óptima de los taludes y se establecen medidas de soporte y monitoreo. La seguridad y viabilidad económica de la mina dependen de una adecuada gestión geotécnica, lo que incluye evaluaciones continuas y planes de contingencia para mantener las condiciones estructurales seguras.

➤ **Minería de placer**

el método de extracción se realiza en depósitos de sedimentos aluviales, como ríos y playas, donde se busca y recoge minerales valiosos (oro, diamantes, zircón, cromita, casiterita) mediante herramientas simples como bateas y cribas.

➤ **Minería in situ**

El método de extracción se realiza en el lugar donde se encuentran los depósitos, sin la necesidad de extraer físicamente los materiales. Se utilizan técnicas como lixiviación, fracturación hidráulica o inyección de solventes para extraer los minerales sin remover la roca o el suelo.

La minería subterránea contiene variados métodos:

➤ **Cavidades autosoportadas**

- Open Stopping
- Room&Pillar

➤ **Cavidades artificialmente soportadas**

- Back Fill
- Cut&Fill
- Filled Room&Pillar

➤ **Cavidades temporalmente soportadas**

- Shrinkage
- Cut&Cave (Long or Short wall)

- Cavidades no soportadas
 - Sub level Caving
 - Block/Panel Caving

5.3 Maquinaria para la explotación minera

Para la minería en superficie se necesitan diferentes maquinarias para realizar las tareas de extracción, transporte, perforación y tronadura. Se mencionan las más importantes para realizar correctamente cada una de las operaciones mencionadas:

- Excavadora minera
- Camión minero
- Perforadora minera
- Palas mineras
- Motoniveladora

Para la minería subterránea se necesitan maquinarias de una menor envergadura que en minería en superficie, sin embargo, no dejan de realizar correctamente las operaciones mineras, ya que están diseñadas para rendir en estas condiciones.

- Cargadores frontales (LHD)
- Dumpers
- Jumbo minero
- Maquinas rozadoras
- Tuneladoras

5.4 Requerimientos operaciones mineras

1. Maquinaria

- Fabricación: Se debe fabricar la maquinaria con materiales resistentes, optimizados para las tareas mineras, y garantizar su suministro mediante contratos.
- Control: Se emplean sistemas automatizados y sensores para monitorear y gestionar la maquinaria de forma precisa y segura.
- Combustible: Se eligen fuentes de energía como diésel, electricidad o energías alternativas, asegurando un suministro constante.
- Mantenimiento: Se implementa un plan de mantenimiento regular para asegurar la longevidad y eficiencia de la maquinaria, evitando fallos.

- Condiciones Ambientales: La maquinaria se adapta a las condiciones ambientales extremas, cumpliendo con normativas para minimizar el impacto en el entorno.

2. Personal

- Alimentación: Se garantiza un suministro continuo de alimentos nutritivos para el personal, con logística adecuada para operaciones remotas.
- Seguridad: Se implementan medidas de seguridad estrictas y se suministra equipo de protección personal, monitoreando el cumplimiento de los protocolos.
- Capacitación: Se capacita al personal en el uso seguro de maquinaria y en procedimientos de emergencia, con formación continua.
- Turnos: Se organizan turnos de trabajo que optimicen la productividad y proporcionen suficiente tiempo de descanso al personal.

3. Logística

- Accesos: Se construyen y mantienen vías de acceso seguras y eficientes para el transporte de materiales y personal.
- Instalaciones: Se establecen áreas de almacenamiento, mantenimiento y descanso para garantizar la eficiencia y bienestar del personal.
- Seguridad: Se instalan sistemas de monitoreo y medidas de seguridad para prevenir robos, accidentes, y gestionar emergencias.
- Suministros: Se coordina una cadena de suministro robusta que garantice la disponibilidad de insumos esenciales en todo momento.
- Distribución: Se planifican rutas óptimas para el transporte de minerales procesados a los mercados, con gestión de permisos aduaneros si es necesario.
- Gestión de Inventario: Se implementan sistemas para monitorear inventarios en tiempo real y evitar exceso de almacenamiento o escasez.
- Catering: Se organiza el suministro continuo de alimentos, garantizando la higiene y disponibilidad, adaptándose a los turnos de trabajo.

5.5 Requerimientos para el procesamiento de minerales

Tabla 3: Requerimientos para realizar cada proceso metalúrgico

Proceso	Reactivos/materiales	Condiciones ambientales	Equipos/Instalaciones
Conminución	-Bolas/barras acero, lubricantes -Control sobre tamaño partícula, flujo material	-Presión y temperatura ambiente	Chancadores, molinos, cintas transportadoras, harneros
Flotación	-Colectores, espumantes, modificadores y depresores -Control sobre pH, flujo de aire o nivel de espuma	-Presión y temperatura ambiente	Celdas de flotación, bombas, sistemas de aireación, dispositivos de monitoreo, almacenamiento de reactivos, tratamiento residuos
Hidrometalurgia	-Cianuro o ácido sulfúrico -Control sobre concentración, pH o tiempo.	-Presión ambiente -Temperaturas entre 20 °C y 80 °C	Tanques de lixiviación, bombas, sistemas recirculación y agitación, almacenamiento de reactivos, tratamiento residuos
Pirometalurgia	-Fundentes, agentes reductores y oxidantes -Control sobre temperatura, concentración de gases o flujo de aire.	-Presión ambiente -Temperaturas entre 1000 °C y 1600 °C	Hornos, equipos de secado y calcinación, equipos de tostación
Electrometalurgia	-Electrolito, ácidos/bases, electrodos, nivelantes, abrillantadores -Control sobre densidad de corriente, concentración de iones, temperatura	-Presión ambiente -Temperaturas entre 40 °C y 65 °C	Filtros, bombas, equipos de control y monitoreo, celdas electrolíticas

Además, para garantizar el funcionamiento del procesamiento de minerales, se necesita cumplir con la logística, control y suministro de energía:

1. Logística

En cuanto al manejo de residuos, es crucial contar con sistemas de transporte y almacenamiento seguros para los desechos generados durante el procesamiento de minerales. Estos residuos, que pueden incluir relaves, escorias y soluciones agotadas, deben ser gestionados adecuadamente para evitar su acumulación y asegurar su disposición en depósitos o plantas de tratamiento de manera eficiente y ambientalmente responsable.

En cuanto al abastecimiento de materias primas incluye garantizar la disponibilidad de suficiente mineral en los puntos de trituración y molienda para la conminución, y posteriormente asegurar el flujo continuo de material hacia las etapas de concentración o refinamiento. Además, se debe prever

el transporte de productos intermedios entre las diferentes etapas del proceso, como el concentrado de mineral en la flotación

En cuanto al abastecimiento de insumos en procesos como la hidrometalurgia y flotación, es necesario asegurar el suministro constante de reactivos químicos, como ácidos, colectores y espumantes, mientras que en la pirometalurgia se requieren grandes cantidades de combustibles y reductores. Para la electrometalurgia, el abastecimiento de electricidad es esencial, además de los materiales necesarios para el proceso, como los electrodos y reactivos para el mantenimiento de las celdas. Se debe garantizar que estos insumos lleguen a tiempo y en las cantidades adecuadas, evitando interrupciones en el proceso productivo.

2. Energía

La flotación, la hidrometalurgia y la electrometalurgia requieren principalmente energía eléctrica para su funcionamiento. En la flotación, la electricidad se utiliza para operar los sistemas de bombeo, agitación y aireación de las celdas, esenciales para la separación de minerales. En la hidrometalurgia, la energía eléctrica es necesaria para bombear y circular las soluciones de lixiviación, así como para mantener las condiciones controladas de temperatura y presión. En la electrometalurgia, la electricidad juega un papel crucial al proveer el flujo de corriente constante que impulsa el proceso de electrolisis, indispensable para la refinación de metales.

Por otro lado, la conminución y la pirometalurgia requieren fuentes de energía adicionales además de la eléctrica. En la conminución, además de la energía eléctrica para mover los equipos de trituración y molienda, se requiere una alta cantidad de energía mecánica para la reducción de tamaño de los minerales. En la pirometalurgia, que opera a temperaturas extremadamente altas, se emplean generalmente combustibles fósiles o electricidad para alimentar hornos, generando el calor necesario para la fusión y purificación de minerales, lo que convierte este proceso en uno de los más demandantes en términos de energía térmica

3. Control

En la conminución, el control de la granulometría del mineral es crucial para asegurar que el material triturado cumpla con los requerimientos de las etapas posteriores. En la flotación, se debe monitorear y ajustar continuamente variables críticas como el pH, la concentración de reactivos, y el nivel de espuma, para maximizar la recuperación de minerales valiosos. En la hidrometalurgia, es necesario un monitoreo constante del flujo y composición química de las soluciones lixiviantes, así como de las reacciones de extracción. La pirometalurgia exige un control riguroso de la temperatura, atmósfera y la composición química de los productos fundidos. Por último, en la electrometalurgia, el monitoreo y control de las variables eléctricas y químicas durante los procesos de electrolisis son determinantes para asegurar la eficiencia y pureza del metal extraído.

CAPÍTULO 6: ¿CÓMO SERÍA LA MINERÍA EN MARTE APLICANDO LA TECNOLOGÍA MINERÍA VIGENTE?

Marte es uno de los planetas más próximos a la Tierra, con un rango de distancia 56,6 a 401 millones de kilómetros y resulta ser el de mayor interés para el hombre. Debido a esto, se han realizado diferentes misiones exitosas mediante sondas y rovers que permiten conocer las condiciones del planeta. Sus temperaturas altas son parecidas a las de la Tierra (20 °C), pero sus bajas temperaturas son muy extremas en comparación (-153 °C). Además, su atmósfera no es apta para la vida humana, siendo mucho más delgada que la terrestre y en su mayoría compuesta por dióxido de carbono (Ver Tabla 1). Su masa y su tamaño son menores comparado con la Tierra, por lo que su gravedad también es menor, aproximadamente 3 veces menor. Por otro lado, las rocas ígneas son las que predominan en la superficie marciana, concordando con su historia volcánica pasada.

En vista a las condiciones que ofrece Marte, realizar minería allí requiere considerar dos escenarios posibles: i) minería directamente con las condiciones actuales de este planeta ii) modificar estas condiciones para beneficio humano, lo que se conoce como Terraformación. Por lo tanto, se analizarán ambos por separado.

6.1 Primer escenario: Minería con condiciones actuales del planeta

En este primer escenario, se pueden tener dos subescenarios: el primero sería realizar minería con operadores humanos; y el segundo sería realizar minería sin operadores humanos, contando con maquinaria autónoma capaz de llevar a cabo las operaciones necesarias.

1.- Requisitos previos

Para la realización de minería en Marte, se requerirían una serie de requisitos previos a la explotación del yacimiento.

- **Permisos y regulaciones:** El principal marco legal es el Tratado sobre el Espacio Ultraterrestre de 1967, que establece que el espacio es patrimonio común de la humanidad y prohíbe la apropiación nacional de cuerpos celestes (U.S. Department of State, 2017). Algunos países aprueban leyes sujetas a la explotación de recursos espaciales, como la Ley del Espacio que aprobó Estados Unidos en 2015, la cual permite la explotación de recursos espaciales a empresas privadas (Derecho Espacial, 2015). Sin embargo, hace falta un amplio marco legal que defina la propiedad de los recursos extraídos, seguridad o responsabilidad ambiental. Actualmente, no existe legislación para Marte.
- **Geología y prospección:** Realizar estudios geológicos extensivos para identificar y caracterizar los yacimientos minerales en Marte. Esto incluiría la utilización de tecnología prospección remota, como radares de penetración de suelo y espectroscopia desde orbitadores y rovers.

- **Mapeo:** Se llevaría a cabo un mapeo detallado del terreno utilizando técnicas de teledetección y georreferenciación, con todo lo que conlleva realizar esto (satélites, sensores LIDAR, monolitos, etc.)
- **Modelo de bloques:** La creación de modelos de bloques tridimensionales permitiría estimar la distribución y la calidad de los minerales. Este proceso sería fundamental para la planificación de la extracción en un entorno tan desafiante como Marte, el cual se puede realizar desde la Tierra.
- **Estudio de factibilidad:** Un estudio de factibilidad evaluaría los aspectos técnicos, económicos y logísticos de la minería en Marte, considerando la viabilidad de los proyectos bajo las condiciones ambientales extremas del planeta.
- **Planificación y gestión:** La planificación estratégica incluiría el desarrollo de infraestructuras, la gestión de recursos y la implementación de sistemas automatizados para minimizar la intervención humana directa en las operaciones mineras.

2.- Métodos de explotación minera en Marte

➤ Minería en superficie

Tabla 4: Influencia de factores críticos en operaciones mineras en superficie en Marte

Operación	Atmosfera	Temperatura	Gravedad
Perforación y Tronadura	-Falta oxígeno para combustión de explosivos. -Presión atmosférica afecta propagación de ondas de choque -Presión atmosférica ayuda a remoción de polvo y detritos del pozo	-Difícil uso de agua -Explosivos pierden efectividad	-Disminuye la presión de contacto de la perforadora -Disminuye la contención de gases dentro del pozo, provocando menor eficiencia en tronadura. -Aumentaría la proyección de fragmentos
Carguío y Transporte	-Dificulta disipación de polvo -Falta oxígeno para combustión de petróleo	-Afecta el rendimiento de los equipos (baterías y neumáticos)	-Reduce el peso de la carga -Reduce tracción de vehículos
Geotecnia	-	-	-Reduce el peso sobre los taludes

➤ Minería de placer

La minería a placer se utiliza para concentrar minerales valiosos en depósitos aluviales, pero Marte no tiene cuerpos de agua líquidos que permitan este proceso. Los minerales más abundantes en Marte, como el olivino, piroxeno, feldespatos y óxidos de hierro, no se concentran de manera eficiente con este método debido a la ausencia de agua y la diferente dinámica geológica. Además, la baja gravedad marciana reduce la eficacia de la separación por gravedad, lo que dificulta el uso de este método para concentrar los minerales presentes en el regolito y las rocas.

➤ Minería in situ

La minería in situ se basa en la extracción de minerales sin necesidad de excavar grandes cantidades de roca, utilizando fluidos o reactivos para disolver los minerales. Sin embargo, reactivos como el ácido sulfúrico, no funcionan de la misma manera con las condiciones extremas de Marte, reduciendo su efectividad. Además, los minerales más abundantes como el olivino, piroxeno y feldespatos, que son silicatos estables, no se disuelven fácilmente en los reactivos comunes, como ácidos o bases, y la falta de agua líquida en Marte complica aún más el proceso, haciendo que la minería in situ sea poco viable para su extracción.

➤ Minería Subterránea

Tabla 5: Influencia de factores críticos en operaciones minería en subterránea en Marte

Métodos	Atmósfera	Temperatura	Gravedad
Open Stopping - Room&Pillar	Afecta al explosivo utilizado por falta de oxígeno y a la ventilación	Afecta a los equipos	-Beneficia a la estabilidad de estructuras y transporte de material. - Cavidades pueden ser de mayor tamaño
Back Fill – Cut &Fill	Afecta al explosivo utilizado por falta de oxígeno y a la ventilación	Afecta a los equipos	-Beneficia a la estabilidad de estructuras y transporte de material - Pilares o soportes pueden ser de menor envergadura
Filled Room&Pillar - Shrinkage	Afecta al explosivo utilizado por falta de oxígeno y a la ventilación	Afecta a los equipos	-Beneficia a la reducción de peso soportado por estructuras, y transporte de material - Relleno puede ser menor al usado habitualmente
Cut&Cave	Afecta a la ventilación	Afecta a los equipos	-Beneficia a la reducción de peso soportado por estructuras, y transporte de material -Afecta al movimiento de material por caída
Sub Level Stopping – Block/Panel Caving	Afecta al explosivo utilizado por falta de oxígeno y a la ventilación	Afecta a los equipos	-Beneficia a la reducción de peso soportado por estructuras, y transporte de material -Afecta al movimiento de material por caída

3.- Maquinaria para la explotación minera en Marte

- Maquinaria para minería en superficie:

La maquinaria existente para la minería en superficie (excavadora, camión minero, perforadora, etc.) podría funcionar para las operaciones mineras en Marte. La gravedad ayudaría a que las enormes cantidades de material extraído sea transportado con un menor peso y, por tanto, un menor trabajo. Sin embargo, con las condiciones actuales de este planeta, sufrirían deterioro en su estructura. Las extremas temperaturas que se tienen en la noche y la radiación afectarían a las baterías, componentes eléctricos y todo tipo de (lubricantes, gasolina, aceites, etc.). Los principales componentes de tracción, que son los neumáticos, se endurecerían y volverían frágiles durante la noche, provocando grietas, roturas y una disminución en la flexibilidad. Esto mismo les ocurriría a los materiales de la estructura de cada maquinaria, especialmente los componentes metálicos que experimentarían contracción y expansión todos los días marcianos. Además, considerando que la operación se realiza operadores humanos, la misma operación no sería posible sin protección contra la radiación, oxígeno y calefacción equipados en la misma maquinaria.

- Maquinaria para minería subterránea:

La maquinaria existente para la minería subterránea (LHD, dumpers, tuneladoras, jumbo minero, etc.) también podrían funcionar en Marte, y tienen una ventaja en cuando a la maquinaria de minería en superficie, y es que no estarían expuestas a la radiación. Además, la baja gravedad también ayudaría a realizar un menor trabajo en cuando al transporte de material. A pesar de ello, sufrirían las mismas condiciones de la extrema baja temperatura, ocasionando los mismos daños a los sistemas eléctricos, neumáticos, baterías, la estructura misma, etc. Por otro lado, al igual que en minería en superficie, se necesitaría protección contra el operador sobre la radiación, escasez de oxígeno y temperaturas bajas.

4.- Requerimientos para operaciones mineras en Marte

➤ Maquinaria

Fabricación: La maquinaria para operaciones en Marte se fabricaría en la Tierra y se transportaría en componentes para ser ensamblada o finalizada en el propio planeta, aprovechando los recursos y materiales locales cuando sea posible para reducir costos y dependencia de suministros desde la Tierra.

Control: La operación de la maquinaria se gestionaría desde centros de control en Marte o mediante control remoto desde la Tierra. El uso de sistemas automatizados y drones se emplearía para supervisar la operación de manera eficiente y continua, adaptando el control a las condiciones de distancia y retardo de señal entre los dos planetas.

Combustible: Dada la ausencia de combustibles fósiles en Marte, se priorizaría el uso de fuentes de energía sostenibles, como energía solar y reactores nucleares portátiles, adaptados para soportar las temperaturas extremadamente bajas de la superficie marciana.

Mantenimiento: El personal de mantenimiento debería tener capacitación especializada para realizar reparaciones en un ambiente marciano, considerando tanto las condiciones ambientales como los requisitos técnicos de la maquinaria que operaría en Marte.

Condiciones ambientales: La maquinaria estaría diseñada para operar en temperaturas extremadamente bajas y resistir la radiación y el polvo característicos de Marte. Las cabinas de operador, si son necesarias, incluirían sistemas de oxígeno y calefacción para proteger a los trabajadores de las condiciones ambientales.

➤ Personal

Catering: Se aseguraría el suministro constante y adecuado de alimentos, adaptados a las demandas físicas y de salud del personal que opera en Marte, considerando las altas necesidades calóricas y nutricionales de los trabajadores en condiciones extremas.

Seguridad: La seguridad del personal se garantizaría mediante el uso de trajes espaciales de alta resistencia y refugios presurizados, diseñados específicamente para proteger a los trabajadores de la radiación, las temperaturas extremas y las tormentas de polvo en Marte. El equipo de protección personal (EPP) se adaptaría especialmente para el ambiente marciano.

Capacitación: La capacitación rigurosa se brindaría tanto en simuladores en la Tierra como en Marte para que los mineros puedan operar de manera segura y eficiente en condiciones marcianas, incluyendo el uso de herramientas y técnicas especiales.

Turnos: Los turnos de trabajo se estructurarían cuidadosamente para maximizar la eficiencia de los trabajadores y evitar la fatiga. La duración de los turnos se ajustaría a las condiciones exigentes de Marte para asegurar la efectividad de las operaciones y la seguridad del personal.

➤ Logística

Accesos: Las rutas de acceso a las áreas mineras se planificarían en función de la topografía y gravedad de Marte para minimizar el consumo de energía de las maquinarias y maximizar la eficiencia en el transporte y acceso a los sitios de extracción.

Instalaciones: Las instalaciones necesarias para la operación minera se construirían cerca de los sitios de extracción y estarían presurizadas y diseñadas para ser autosuficientes. Estas estructuras se adaptarían a las características ambientales y de aislamiento requeridas en Marte.

Seguridad: Los protocolos de seguridad se implementarían para proteger contra amenazas ambientales como la radiación y las tormentas de polvo, y para garantizar la seguridad en la operación minera bajo las condiciones marcianas.

Suministros: La logística de abastecimiento consideraría el envío periódico de suministros críticos desde la Tierra, complementado con la producción local cuando sea posible. Los tiempos de envío y reposición se planificarían con antelación para evitar demoras.

Distribución: La distribución de recursos dentro de Marte se automatizaría mediante sistemas de transporte robotizado, garantizando un flujo constante de materiales entre la mina y las instalaciones de procesamiento. La logística de distribución hacia la Tierra implicaría un costo y complejidad adicionales significativos.

Gestión de inventario: La gestión de inventarios se basaría en sistemas inteligentes para optimizar el almacenamiento y la utilización de recursos, minimizando desperdicios y asegurando el abastecimiento constante en las operaciones.

Catering: El sistema de soporte vital incluiría el cultivo de alimentos en un sistema cerrado y sistemas avanzados de reciclaje de agua y nutrientes para el abastecimiento continuo y autosostenido del personal en Marte.

5.- Requerimientos para el procesamiento de minerales

Tabla 6: Influencia de factores críticos en el procesamiento de minerales en Marte

Proceso	Atmósfera	Temperatura	Gravedad
Conminución	Afecta a los equipos	Afecta a los equipos	Afecta a la energía necesaria para triturar rocas
Flotación	Afecta a la formación de burbujas	Afecta a la cinética de los reactivos	Afecta al proceso de adherencia de partículas a las burbujas y cómo se elevan a la superficie
Hidrometalurgia	Afecta al proceso de lixiviación	Afecta a la cinética de la reacción	Afecta al comportamiento de fluidos
Pirometalurgia	Afecta la eficiencia energética de procesos de combustión	No afecta en gran medida, el proceso se lleva a cabo en hornos	Afecta al comportamiento de los gases
Electrometalurgia	Afecta la cinética, volatilidad y ayudaría a la formación de subproductos indeseados	Afecta a la conductividad eléctrica y cinética	Afecta al comportamiento de fluidos

Además, se necesitan aspectos como:

Control

En Marte, para los procesos de hidrometalurgia, flotación y electrometalurgia, se requeriría un monitoreo constante de variables clave como la temperatura, el pH y las características químicas de los reactivos, además del control de las condiciones eléctricas en la electrometalurgia. El manejo adecuado de los reactivos, junto con sistemas de monitoreo y almacenamiento ajustados a las condiciones marcianas, sería esencial para garantizar la eficiencia de estos procesos en el entorno del planeta.

Por otro lado, en los procesos de conminución y pirometalurgia, se debería implementar un control riguroso de las variables críticas relacionadas con la calidad del material procesado y las altas temperaturas necesarias. En la conminución, se controlarían los estándares de material procesado, mientras que, en la pirometalurgia, el control estricto de variables como la temperatura y las condiciones atmosféricas sería crucial para el funcionamiento óptimo de los procesos en el entorno marciano.

Instalaciones

Las instalaciones necesarias para llevar a cabo procesos metalúrgicos en Marte se verán afectadas por las condiciones del planeta. La radiación solar, considerablemente más intensa debido a la delgada atmósfera marciana, impactará las estructuras, generando la necesidad de protección adicional. La gravedad reducida, al ser un tercio de la terrestre, podría alterar la estabilidad de las instalaciones y el comportamiento de los materiales y equipos dentro de ellas.

Las bajas temperaturas en Marte afectarán los sistemas y procesos que dependen del calor para su funcionamiento, como la pirometalurgia, y podrían generar cambios en el rendimiento de las instalaciones si no están adaptadas para operar en esas condiciones. Asimismo, la baja presión atmosférica y la composición de la atmósfera, compuesta principalmente de dióxido de carbono, modificarán la eficiencia de los equipos que requieren un ambiente controlado, como en los procesos de flotación y electrometalurgia.

Estas mismas instalaciones, si replicadas en Marte sin modificaciones significativas, podrían enfrentar dificultades derivadas de las diferencias en la atmósfera, presión, temperatura, radiación y gravedad, factores que influirán en la operación de los procesos de manera que se desvíen de su desempeño en la Tierra.

Energía

La energía nuclear y solar serían las principales fuentes utilizadas para los distintos procesos metalúrgicos en Marte. En la pirometalurgia, ambas fuentes serían esenciales para alcanzar y mantener las altas temperaturas requeridas en los hornos y reactores. La electrometalurgia dependería de un suministro continuo de energía nuclear o solar para garantizar un proceso eficiente, alimentando

los equipos que requieren grandes cantidades de electricidad. Para la hidrometalurgia, la energía solar y nuclear proporcionaría la estabilidad necesaria para operar los sistemas de lixiviación y flotación, manteniendo el flujo energético adecuado. En los procesos de conminución, estas mismas fuentes energéticas asegurarían la operación constante de los equipos de trituración y molienda, y en la flotación, el suministro de energía nuclear y solar sería clave para mantener el funcionamiento de las celdas de flotación de manera sostenible y eficiente.

6.2 Segundo escenario: Minería con terraformación

➤ Terraformación

La terraformación de Marte implica modificar su ambiente para hacerlo similar al de la Tierra, lo que permitiría la vida humana sin necesidad de trajes espaciales e infraestructuras de soporte vital. Esto implicaría poder realizar minería sin las complicaciones que se tienen con las condiciones actuales de Marte, como son la radiación, falta de oxígeno, temperaturas extremas, etc.

Para poder realizar la terraformación de Marte existen tres opciones prometedoras que buscan inducir el aumento de la temperatura que se requiere para producir un efecto invernadero. La primera opción es el uso de espejos orbitales para cambiar el equilibrio de calor de la tapa polar sur, de manera que su depósito de CO₂ se vaporice, la segunda opción es la importación de amoníaco desde asteroides, y, por último, la producción de gases de halocarbono artificial (“CFC”) en la superficie marciana (Zubrin et al, 1993).

Para poder garantizar que la terraformación sea duradera y efectiva durante muchos años, se deben realizar operaciones adicionales:

- Mantener presión atmosférica: Operar fábricas de gases de efecto invernadero que continúen liberando compuestos como perfluorocarbonos (PFCs). Además, mantener un monitoreo continuo en busca de fugas y reparar cualquier punto débil.
- Gestión del calor: Implementar sistemas de almacenamiento térmico para liberar calor de manera controlada, además de utilizar la energía solar a favor con paneles solares.
- Producción de oxígeno y mantenimiento de ecosistemas: desarrollar ecosistemas autosuficientes que puedan reciclar nutrientes y mantener la producción de oxígeno.
- Escudo magnético artificial: Es posible colocar un escudo magnético en el punto de Lagrange L1, este actuaría similar al campo magnético de la Tierra, protegiendo al planeta de las partículas cargadas del viento solar.

➤ ¿Qué cambia con respecto a realizar minería sin terraformación?

La temperatura, la radiación, la composición y presión de la atmósfera serían similares a los valores presentes en la Tierra. Sin embargo, la gravedad no cambiaría, ya que significaría cambiar la masa o el volumen del planeta. Es por esto por lo que algunos requerimientos cambiarían con respecto al primer escenario de un Marte no terraformado:

1. Métodos de explotación minera en Marte

➤ Mina a rajo abierto

Tabla 7: Influencia de factores críticos en operaciones mineras en Marte con Terraformación

Operación	Atmosfera	Temperatura	Gravedad
Perforación y Tronadura	-Explosivos son igual de efectivos que en la Tierra -Presión atmosférica es cercana a la de la Tierra, lo que no perjudica la propagación de ondas de choque	-El uso de agua es posible -Explosivos no pierden efectividad	-Disminuye la presión de contacto de la perforadora -Disminuye la contención de gases dentro del pozo, provocando menor eficiencia en tronadura. -Aumentaría la proyección de fragmentos
Carguío y Transporte	-Disipación de polvo funciona igual que en la Tierra -No hay un mayor desgaste componentes electrostáticos	-El rendimiento de los equipos no se ve afectado	-Reduce el peso de la carga -Reduce tracción de vehículos
Geotecnia	-Presión atmosférica contiene de la misma forma al material suelto que en la Tierra	-No existen fluctuaciones de temperatura, por lo que no existen expansiones y contracciones en taludes ni fracturas	-Reduce el peso sobre los taludes -Reduce la cohesión del material

- **Minería de placer:** En un Marte terraformado, donde la atmósfera incluyera agua líquida y presión suficiente, se considera posible la minería a placer. Este tipo de minería depende de la presencia de ríos o corrientes de agua que transporten y depositen minerales valiosos en zonas aluviales, similar a los depósitos naturales de oro o platino en la Tierra. Con agua fluyendo en la superficie marciana, podrían formarse depósitos aluviales que permitan aplicar técnicas de minería a placer. Aun así, los tipos de minerales disponibles y las características geológicas locales de Marte seguirían siendo determinantes. Dado que Marte es rico en silicatos como olivino, piroxeno y feldespatos, los cuales no tienden a concentrarse en depósitos aluviales, la eficiencia de las técnicas de placer dependería de la disponibilidad de

minerales adecuados y de la existencia de corrientes con caudales suficientes para transportar dichos minerales.

- **Minería in situ:** En un entorno así, con la presión atmosférica y el agua adecuadas para disolver minerales, los métodos de minería in situ serían aplicables, siempre que se dispusiera de reactivos capaces de disolver los minerales presentes en Marte. No obstante, la eficiencia del proceso dependería de la naturaleza de los minerales en el planeta, ya que muchos de los compuestos predominantes, como los silicatos (por ejemplo, olivino, piroxeno y feldespatos), muestran una alta estabilidad química y son poco reactivos frente a los reactivos de disolución tradicionales. Si bien en un Marte terraformado sería posible aplicar minería in situ a depósitos con minerales más solubles, como ciertos óxidos y sulfatos, la viabilidad dependería del desarrollo de técnicas y reactivos que aprovechen estas condiciones.

2. Requerimientos para las operaciones mineras subterráneas en Marte

Tabla 8: Influencia de factores críticos en operaciones mineras subterráneas en Marte con terraformación

Métodos	Atmósfera	Temperatura	Gravedad
Open Stoping - Room&Pillar	Ventilación y explosivos funcionan de la misma manera que en la Tierra	Equipos no se ven afectados mayormente	-Beneficia a la estabilidad de estructuras y transporte de material. - Cavidades pueden ser de mayor tamaño
Back Fill – Cut & Fill	Ventilación y explosivos funcionan de la misma manera que en la Tierra	Equipos no se ven afectados mayormente	-Beneficia a la estabilidad de estructuras y transporte de material - Pilares o soportes pueden ser de menor envergadura
Filled Room&Pillar - Shrinkage	Ventilación y explosivos funcionan de la misma manera que en la Tierra	Equipos no se ven afectados mayormente	-Beneficia a la reducción de peso soportado por estructuras, y transporte de material - Relleno puede ser menor al usado habitualmente
Cut&Cave	Ventilación funciona de la misma manera que en la Tierra	Equipos no se ven afectados mayormente	-Beneficia a la reducción de peso soportado por estructuras, y transporte de material -Afecta al movimiento de material por caída
Sub Level Stoping – Block/Panel Caving	Ventilación y explosivos funcionan de la misma manera que en la Tierra	Equipos no se ven afectados mayormente	-Beneficia a la reducción de peso soportado por estructuras, y transporte de material -Afecta al movimiento de material por caída

Maquinaria

Fabricación: Se puede aprovechar recursos locales en mayor medida, reduciendo aún más la dependencia de componentes traídos desde la Tierra. El ensamblaje se puede realizar de manera más eficiente en Marte gracias a la atmósfera y presión adaptadas, optimizando tanto la fabricación como el mantenimiento de la maquinaria en el propio planeta.

Control: La operación de la maquinaria puede gestionarse desde centros de control en Marte o remotamente desde la Tierra, pero los sistemas de supervisión y automatización serían más eficientes gracias a las condiciones atmosféricas mejoradas, que reducirían el impacto de la radiación en los sistemas de comunicación y monitoreo.

Combustible: Las fuentes de energía sostenibles seguirían siendo fundamentales. Sin embargo, la disponibilidad de oxígeno y una atmósfera más densa facilitarían el desarrollo de sistemas de combustible y energía, permitiendo que los reactores nucleares y las plantas solares operen de manera óptima, además de abrir posibilidades para el uso de combustibles derivados de procesos químicos locales.

Mantenimiento: Las tareas de mantenimiento resultarían menos complejas, ya que las condiciones atmosféricas mejoradas y una temperatura más estable facilitarían el trabajo directo sobre las máquinas. El personal de mantenimiento podría realizar reparaciones sin trajes espaciales extremos, incrementando la eficiencia y rapidez de estos procesos.

Condiciones ambientales: La maquinaria diseñada para operar en Marte terraformado no necesitaría tantas modificaciones para resistir la radiación extrema y el polvo marciano. Las cabinas para operadores también podrían prescindir de sistemas de oxígeno y calefacción sofisticados, ya que la atmósfera sería respirable y la temperatura más favorable para la operación humana.

Personal

Catering: En un Marte terraformado, la disponibilidad de recursos agrícolas facilitaría la producción local de alimentos frescos. Esto reduciría la dependencia de alimentos importados y permitiría cubrir las necesidades calóricas y nutricionales del personal de forma sostenible, adaptando la producción a las condiciones menos extremas del nuevo ambiente marciano.

Seguridad: Con una atmósfera respirable y temperaturas más moderadas, el personal no necesitaría trajes espaciales completos ni refugios presurizados extremos. El equipo de protección personal se asemejaría al ya existente en la Tierra, ya que la exposición a radiación y temperaturas estarían reducidas, lo cual mejoraría la movilidad y comodidad del personal en las operaciones diarias.

Capacitación: La capacitación se enfocaría en operar maquinaria y adaptarse a las particularidades de Marte, pero el entorno terraformado reduciría la necesidad de entrenamientos específicos para trajes espaciales y sistemas de soporte vital complejos, simplificando los protocolos de seguridad y operación.

Turnos: La regulación de turnos seguiría siendo importante, pero con condiciones ambientales similares a las de la Tierra, la duración de los turnos podría ampliarse, ya que la atmósfera y el clima terraformado reducirían la presión física y mental sobre los trabajadores. Esto aumentaría la productividad y la eficiencia en las operaciones.

Logística

Accesos: Las rutas de acceso a áreas mineras se planificarían de la misma manera que en un Marte terraformado, ya que no se vería afectada la topografía ni la gravedad del planeta.

Instalaciones: No necesitarían ser completamente presurizadas. La infraestructura necesaria podría construirse de manera similar a las instalaciones terrestres, teniendo en cuenta que se tiene un ambiente reducido en gravedad.

Seguridad: Con una atmósfera que protege contra la radiación y disminuye las tormentas de polvo, los protocolos de seguridad se simplificarían considerablemente. Esto mejoraría la seguridad en la operación minera y reduciría los requerimientos de protección personal y de infraestructura específica contra el clima.

Suministros: En un Marte terraformado, la producción local de suministros se vería beneficiada por la atmósfera y los recursos disponibles, disminuyendo la dependencia de los envíos terrestres. La autosuficiencia en recursos básicos sería más factible.

Distribución: La distribución de productos mineros hacia la Tierra implicaría costos y logística extremadamente altos debido a las condiciones atmosféricas y la necesidad de lanzamientos espaciales especializados. Esto obligaría a evaluar la rentabilidad de la operación en función de los altos costos.

Gestión de inventario: La gestión de inventarios se beneficiaría de condiciones más predecibles y un sistema de almacenamiento convencional, lo que reduciría la necesidad de sistemas inteligentes avanzados de monitoreo constante y aseguraría un abastecimiento más estable y económico.

Catering: El cultivo de alimentos en un Marte terraformado sería mucho más eficiente y permitiría la implementación de granjas a mayor escala y sistemas agrícolas más convencionales.

3. Requerimientos para el procesamiento de minerales en Marte

Tabla 9: Influencia de factores críticos en procesamiento de minerales en Marte con terraformación

Proceso	Atmósfera	Temperatura	Gravedad
Conminución	Equipos no se ven mayormente afectados	Equipos no se ven mayormente afectados	Afecta a la energía necesaria para triturar rocas
Flotación	Formación de burbujas no se vería mayormente afectada	La cinética de los reactivos no se vería mayormente afectada	Afecta al proceso de adherencia de partículas a las burbujas y cómo se elevan a la superficie
Hidrometalurgia	Proceso de lixiviación no se vería mayormente afectada	La cinética de la reacción no se vería mayormente afectada	Afecta al comportamiento de fluidos
Pirometalurgia	La eficiencia energética de procesos de combustión, no se vería mayormente afectada	No afecta en gran medida, el proceso se lleva a cabo en hornos	Afecta al comportamiento de los gases
Electrometalurgia	La cinética y volatilidad no se verían mayormente afectadas. Y no se beneficiaría a la formación de subproductos indeseados	La conductividad eléctrica y cinética no se verían mayormente afectadas	Afecta al comportamiento de fluidos

CAPITULO 7: COMPARACIÓN DE MINERÍA CONVENCIONAL EN OTROS ASTROS

7.1 Planetas

En este apartado se hablará netamente de planetas terrestres cercanos a la Tierra, como lo son Mercurio y Venus

1.- Mercurio

Mercurio es uno de los planetas más cercanos al Sol, con una distancia que varía entre 46 y 70 millones de kilómetros. Aunque ha sido menos explorado en comparación con otros planetas como Marte y Venus, su estudio es crucial para comprender mejor la formación y evolución del sistema solar. A lo largo de los años, misiones como Mariner 10 y MESSENGER de la NASA han enviado sondas y orbitadores para investigar sus condiciones extremas y su superficie. Mercurio presenta temperaturas extremadamente variables, con máximas que pueden alcanzar hasta 430 °C durante el día y mínimas de hasta -180 °C durante la noche, debido a su delgada atmósfera que no retiene el calor. Su atmósfera es muy tenue y está compuesta principalmente por oxígeno, sodio, hidrógeno, helio y potasio, lo que la hace inapta para la vida humana. Mercurio tiene una masa y un tamaño menor en comparación con la Tierra, y su gravedad es aproximadamente el 38% de la gravedad terrestre.

Debido a las condiciones extremas de Mercurio, se deben considerar dos posibles escenarios: realizar minería bajo las condiciones actuales de Mercurio o modificar estas condiciones en beneficio humano, en lo que se conoce como terraformación. A continuación, se analizarán ambos escenarios por separado.

1.1 Primer escenario: Minería bajo las condiciones actuales de Mercurio

Tabla 10: Influencia de factores críticos operaciones y procesamiento de minerales en Mercurio

Proceso	Atmósfera	Temperatura	Gravedad
Operaciones Mineras en Superficie	-Presión atmosférica baja y ausencia de oxígeno afectan la efectividad de P&T -Radiación no es contenida por atmósfera, provocando daños en el personal y equipos	-Provocaría expansión y contracción de metales en los equipos, provocando fallos mecánicos -Explosivos no serían efectivos -Generaría grietas en taludes, afectando estabilidad	-Se disminuye la presión de contacto de perforadora, la contención de gases dentro del pozo y aumenta la proyección de fragmentos en tronadura -Se reduce peso de material cargado y la tracción de vehículos.

			-Se reduce el peso sobre taludes y la cohesión del material
Operaciones Mineras en Subterránea	-La presión atmosférica baja no ayuda a contener las estructuras, reduciendo la estabilidad -Explosivos no serían efectivos	-Provocaría expansión y contracción de paredes, techo y pilares de la mina, al igual que en metales en los equipos -Explosivos no serían efectivos	-Beneficia a la reducción de peso soportado por estructuras, y transporte de material -Afecta al movimiento de material por caída -Cavidades pueden ser de mayor tamaño
Procesamiento de minerales	-Dificulta el control de la dispersión del polvo -Formación de burbujas es ineficaz -Difícil uso de agua y ácido sulfúrico -Afecta al flujo de gases y reacciones combustión -Ausencia de gases (Oxígeno, nitrógeno, hidrógeno) dificulta reacciones en electrometalurgia	-Provocaría expansión y contracción de metales en equipos, provocando fallos mecánicos -Dificulta el uso de agua, provocando dificultades en procesos como flotación, hidrometalurgia y electrometalurgia -En el día se acelerarían las reacciones químicas, produciendo subproductos no deseados	-Afecta a la energía necesaria para triturar rocas -Afecta al proceso de adherencia de partículas a burbujas en flotación -Afecta al comportamiento de gases y fluidos

1.2. Segundo escenario: Minería con terraformación

La terraformación de Mercurio implica modificar su ambiente para hacerlo más similar al de la Tierra, permitiendo la vida humana sin necesidad de trajes espaciales e infraestructuras de soporte vital complejas. Este proceso es extremadamente complejo y desafiante, pero podría ofrecer beneficios significativos para la minería y la colonización.

Para poder bajar las temperaturas en el planeta, se podrían utilizar embarcaciones de vela solar en el punto Mercurio-Sol L1, la cual reduciría el flujo solar que incide sobre Mercurio. El problema es que, debido a la alta excentricidad en la órbita de este, las velas tendrían que trabajar constantemente para mantener su posición, por lo que se necesitaría una coordinación y capacidad de maniobra impecable en cada nave. Estas, se podrían diseñar para convertir la radiación recibida en energía y transmitirla hacia Mercurio, generando electricidad en la superficie. Además, considerando que cada nave tiene un área de un kilómetro cuadrado, se necesitarían entre 16 y 17 millones de naves para cumplir con la misión (Kenneth, 2015).

Otra opción para una terraformación, que en este caso sería una paraterraformación, la cual es una terraformación parcial. La idea consta de construir una estructura capaz de sostener el un techo transparente estanco que permita la entrada de luz solar, lo que es crucial para que cualquier forma de vida (Taylor R. , 1992). Esta estructura tendría una altura entre uno y tres kilómetros, con el beneficio de que se puede construir de forma incremental, ampliándose hasta cubrir todo el planeta. Los desafíos para realizar este método son muchos, partiendo de la idea de la resistencia que debe tener la estructura para soportar los gases que debe almacenar, mantener un control de fugas y un mantenimiento eficaz, además de la construcción misma de esta en el contexto de las condiciones de Mercurio.

Los desafíos que involucran cualquiera de estos métodos son:

- Logística y transporte: enviar materiales y productos entre Mercurio y la Tierra requiere una planificación logística compleja y costosa. Se necesita optimizar la carga útil y las rutas de transporte.
- Adaptación de técnicas mineras: la reducción de gravedad afecta al diseño de maquinarias y a la ejecución de métodos mineros.
- Seguridad y salud de trabajadores: se debe monitorear constantemente el estado de salud de las personas, la baja gravedad podría afectar al cuerpo humano.
- Sostenibilidad y viabilidad: se debe planificar con detalle la misión minera, contando estudios geológicos, análisis de riesgos, desarrollo de tecnología, suministros, soporte vital, etc.

2.- Venus

Venus es el planeta terrestre más cercano a la Tierra en términos de distancia media, oscilando entre 38 y 261 millones de kilómetros. Es de gran interés para la exploración espacial debido a sus características extremas y únicas. A lo largo de los años, varias misiones, principalmente de la Unión Soviética y la NASA, han enviado sondas y orbitadores para estudiar su superficie y atmósfera. Las temperaturas en Venus son extremadamente altas, alcanzando hasta 450 °C, lo que lo convierte en el planeta más caliente del sistema solar debido a un intenso efecto invernadero. Su atmósfera es densa y compuesta en su mayoría por dióxido de carbono, con nubes de ácido sulfúrico, lo que la hace altamente corrosiva y tóxica para la vida humana. Venus tiene una masa y un tamaño similar al de la Tierra, pero su gravedad es ligeramente menor, aproximadamente el 90% de la gravedad terrestre.

Se analizarán dos posibles escenarios: uno en el que el planeta ha sido terraformado y otro con la con las condiciones actuales de este.

2.1 Primer escenario: Minería con condiciones actuales del planeta

Tabla 11: Influencia de factores críticos en operaciones y procesamiento de minerales en Venus

Factor	Atmósfera	Temperatura	Gravedad
Operaciones Mineras en Superficie	-Presión atmosférica alta y ausencia de oxígeno afectan la efectividad de P&T y estabilidad de taludes -Equipos convencionales serían aplastados por la alta presión, y corroídos por el CO₂ y H₂SO₄ presente en la atmosfera	-Provocaría la degradación de materiales comunes en vehículos, provocando daños irreparables. -Explosivos no serían efectivos	-Se disminuye (en menor medida) la presión de contacto de perforadora, la contención de gases dentro del pozo y aumenta (en menor medida) la proyección de fragmentos en tronadura -Se reduce (en menor medida) peso de material cargado y la tracción de vehículos. -Se reduce (en menor medida) el peso sobre taludes y la cohesión del material
Operaciones Mineras en Subterránea	-La presión atmosférica alta condiciona las estructuras, amplificando los esfuerzos que se les aplican. -Explosivos no serían efectivos -Equipos convencionales serían aplastados por la alta presión	-Material de relleno no sería efectivo a altas temperaturas -Provocaría la degradación de materiales comunes en vehículos, provocando daños irreparables. -Explosivos no serían efectivos	-Beneficia a la reducción de peso soportado por estructuras, y transporte de material -Afecta al movimiento de material por caída -Cavidades pueden ser de mayor tamaño
Procesamiento de minerales	-Dificulta el control de la dispersión del polvo -Formación de burbujas es ineficaz -Difícil uso de agua y ácido sulfúrico -Afecta al flujo de gases y reacciones combustión -Ausencia de gases (Oxígeno, nitrógeno, hidrógeno) dificulta reacciones en electrometalurgia	-Provocaría degradación de materiales de equipos, como celdas, chancadores o espesadores -Dificulta el uso de agua y ácido sulfúrico -Se acelerarían las reacciones químicas, produciendo subproductos no deseados	-Afecta a la energía necesaria para triturar rocas -Afecta al proceso de adherencia de partículas a burbujas en flotación -Afecta al comportamiento de gases y fluidos

2.2 Segundo escenario: Minería con terraformación

La terraformación en Venus implica realizar un proceso de transformación del planeta, con tal de que sea habitable o sus condiciones extremas sean parecidas a las de la Tierra. Esto quiere decir que, se espera obtener un planeta con condiciones aptas para la vida, lo que significaría una reducción de los requerimientos en minería en cuanto a la maquinaria, infraestructura, métodos, etc. Los desafíos que se deben realizar son los siguientes:

- Reducir la temperatura y la presión atmosférica
- Alterar la composición atmosférica para que sea respirable
- Proteger la atmosfera y la superficie de la radiación solar
- Crear un campo magnético artificial
- Modificar la rotación del planeta

Existen varios métodos teóricos para poder terraformar este planeta. Uno de ellos es el secuestro de dióxido de carbono mediante la magnesita. Este mineral es capaz de almacenar CO₂, el cual se forma de manera natural en cientos o miles de años. Sin embargo, se ha encontrado la manera de fabricarlo en 72 días mediante microesferas de poliestireno como catalizador (Goldschmidt Conference, 2018). Hay que considerar el traslado y producción masiva de los reactivos (magnesio y poliestireno) que se deben utilizar, la distribución uniforme de estos en la atmosfera hostil de Venus y asegurar que el CO₂ de la atmosfera reaccione eficientemente con el magnesio. Otro método que serviría para enfriar este planeta es utilizar “cortinas solares” y/o espejos que se colocarían en el punto de Lagrange Sol-Venus L1 (punto de equilibrio entre Sol y Venus). Esto eliminaría el problema de la exposición a la radiación y evitaría que el planeta se caliente gracias al calor del Sol (Birch, Terraforming Venus Quickly, 1991). También se menciona la opción de enfriar el planeta mediante el enfriamiento radiactivo (Zevenhoven et al, 2018), la cual utilizaría radiadores que absorberían el calor de la atmosfera y lo radiarían al espacio. Sin embargo, para que el método sea efectivo a una escala planetaria, se necesitarían enormes cantidades de radiadores y/o extremadamente grandes. Por otro lado, para lograr modificar la rotación de Venus, se ha propuesto usar corrientes de masa de alta velocidad para transferir energía y momento angular alrededor del ecuador de Venus (Birch, 1993).

Considerando que Venus es parecido a la Tierra en volumen y masa, realizar minería con una terraformación efectiva no sería un problema mayor, ya que la única dificultad sería adaptarse a la gravedad del planeta, la cual es muy parecida a la que estamos acostumbrados. El desafío no estaría en la minería en sí, sino en la logística de transporte de los materiales necesarios que deben, en un comienzo, venir desde la Tierra. Se debe analizar si es factible enviar las máquinas y los insumos necesarios para comenzar la extracción de minerales.

7.2 La Luna

Uno de los principales objetivos de explotación de recursos es el satélite natural de la Tierra, la Luna, por lo que en este apartado se centra en esta. El helio-3 es el principal motivo de esto, ya que este puede usarse para generar energía en la fusión nuclear. La particularidad que tiene es que es muy escaso en la Tierra y no es un elemento radioactivo, por lo que puede generar energía sin generar residuos radioactivos. Sin embargo, hay muchos otros minerales de interés, como los minerales del grupo del platino, volátiles, titanio y agua en forma de hielo.

Sin embargo, se tienen complicaciones al momento de realizar minería en este satélite:

Tabla 12: Influencia de factores críticos en operaciones y procesamiento de minerales en la Luna

Factor	Atmósfera	Temperatura	Gravedad
Operaciones Mineras en Superficie	-Ausencia de atmosfera y ausencia de oxígeno afectan la efectividad de P&T, estabilidad de taludes y el control del polvo fino -Radiación no es contenida por atmósfera, provocando daños a equipos	-Provocaría expansión y contracción de metales en equipos, provocando fallos mecánicos -Explosivos no serían efectivos -Generaría grietas en taludes, afectando estabilidad	-Se disminuye (en gran medida) la presión de contacto de perforadora, la contención de gases dentro del pozo y aumenta (en gran medida) la proyección de fragmentos en tronadura -Se reduce (en gran medida) peso de material cargado y la tracción de vehículos. -Se reduce (en gran medida) el peso sobre taludes y la cohesión del material
Operaciones Mineras en Subterránea	-Ausencia de presión atmosférica dificulta el control del polvo fino y perjudica a la contención de estructuras -Explosivos no serían efectivos	-Provocaría expansión y contracción de metales en equipos, provocando fallos mecánicos -Material de relleno no sería efectivo con cambios de temperatura -Explosivos no serían efectivos	-Beneficia a la reducción de peso soportado por estructuras, y transporte de material -Afecta al movimiento de material por caída -Cavidades pueden ser de mayor tamaño

Procesamiento de minerales	-Dificulta el control de la dispersión del polvo -Formación de burbujas es ineficaz -Difícil uso de agua y ácido sulfúrico -Afecta al flujo de gases y reacciones combustión -Ausencia de gases (Oxígeno, nitrógeno, hidrógeno) dificulta reacciones en electrometalurgia -Radiación no es contenida por atmosfera, afectando a procesos y equipos	-Provocaría desgaste de materiales de equipos, como celdas, chancadores o espesadores -Dificulta el uso de agua y ácido sulfúrico -Se desacelerarían las reacciones químicas durante la noche y acelerarían durante el día, produciendo subproductos no deseados	-Afecta a la energía necesaria para triturar rocas -Afecta al proceso de adherencia de partículas a burbujas en flotación -Afecta al comportamiento de gases y fluidos
----------------------------	---	--	--

7.3 Asteroides

La minería de asteroides ofrece revolucionar el suministro de recursos minerales. Esto se debe a las muchas razones existentes, tales como la reducción de la contaminación al medio ambiente o la inmensa riqueza de los asteroides (Lewis, 1996). Un ejemplo de esto es el asteroide Psyche 16, el cual se cree con firmeza que contiene enormes cantidades de hierro y níquel principalmente (Moura et al., 2019), y su valor estaría estimado en más de 10 trillones de dólares. Otra de las razones para realizar este tipo de minería es la investigación científica. Esta permitiría conocer con mayor exactitud la formación del sistema solar, puesto que se cree que asteroides, como el mencionado anteriormente, podrían ser núcleos de planetas. Incluso, hay asteroides que contienen agua en forma de hielo, lo cual sería esencial para el combustible de los cohetes y para el suministro de agua y oxígeno para la vida humana, tanto para las misiones espaciales como para la vida en la Tierra.

Sin embargo, realizar minería allí conlleva las siguientes condiciones:

Tabla 13: Influencia de factores críticos en operaciones y procesamiento de minerales en asteroides

Factor	Atmósfera	Temperatura	Gravedad
Operaciones Mineras en Superficie	-Ausencia de atmosfera y ausencia de oxígeno afectan la efectividad de P&T, estabilidad de taludes y el control del polvo fino -Radiación no es contenida por atmósfera, provocando daños a equipos	--Provocaría fallas en sistemas electrónicos, hidráulicos y de tracción de equipos -Explosivos no serían efectivos -Material se vuelve frágil a bajas temperaturas,	-Se disminuye (en gran medida) la presión de contacto de perforadora, la contención de gases dentro del pozo y aumenta (en gran medida) la proyección de fragmentos en tronadura

		perjudicando a la estabilidad de taludes	-Se reduce (en gran medida) peso de material cargado y la tracción de vehículos. -Se reduce (en gran medida) el peso sobre taludes y la cohesión del material
Operaciones Mineras en Subterránea	-Ausencia de presión atmosférica dificulta el control del polvo fino y perjudica a la contención de estructuras -Explosivos no serían efectivos	-Material de relleno no sería efectivo a bajas temperaturas -Material se vuelve frágil a bajas temperaturas, perjudicando estabilidad de paredes, pilares y techo -Provocaría fallas en sistemas electrónicos, hidráulicos y de tracción de equipos -Explosivos no serían efectivos	-Beneficia a la reducción de peso soportado por estructuras, y transporte de material -Afecta al movimiento de material por caída -Cavidades pueden ser de mayor tamaño
Procesamiento de minerales	-Dificulta el control de la dispersión del polvo -Formación de burbujas es ineficaz -Difícil uso de agua y ácido sulfúrico -Afecta al flujo de gases y reacciones combustión -Ausencia de gases (Oxígeno, nitrógeno, hidrógeno) dificulta reacciones en electrometalurgia -Radiación no es contenida por atmosfera, afectando a procesos y equipos	-Provocaría desgaste de materiales de equipos, como celdas, chancadores o espesadores -Dificulta el uso de agua y ácido sulfúrico -Se disminuiría la velocidad de reacciones químicas	-Afecta a la energía necesaria para triturar rocas -Afecta al proceso de adherencia de partículas a burbujas en flotación -Afecta al comportamiento de gases y fluidos

CAPÍTULO 8: CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES

La minería espacial representa un desafío sin precedentes, ya que resulta inviable aplicar métodos convencionales fuera de la Tierra. Las condiciones extremas de presión, temperatura y gravedad obligan a repensar completamente tanto las operaciones mineras como el procesamiento de minerales. Para avanzar en esta dirección, es indispensable desarrollar equipos especializados capaces de funcionar en entornos con baja gravedad y temperaturas extremas, así como adaptar métodos de extracción, ventilación y uso de explosivos que no dependan del oxígeno.

En cuanto al procesamiento de minerales, se deben crear entornos controlados que simulen las condiciones terrestres o bien modificar cada proceso utilizando reactivos resistentes a las condiciones adversas. Además, es crucial evaluar cómo la baja gravedad afecta la eficiencia de estos procesos, ya que puede alterar completamente su comportamiento y resultados.

La terraformación de planetas como Marte, Venus y Mercurio se plantea como una alternativa para establecer hábitats humanos estables. Aunque es un proceso lento, las propuestas tecnológicas, como los espejos orbitales, el secuestro de CO₂ o la instalación de embarcaciones solares, buscan generar condiciones similares a las de la Tierra, permitiendo la utilización de recursos locales como base para un nuevo hogar.

La explotación de la Luna y los asteroides introduce un enfoque distinto, donde se prioriza la extracción in situ y el transporte del material hacia la Tierra para su posterior procesamiento. Esto requiere nuevas estrategias logísticas y maquinarias específicas para operar en cuerpos celestes con condiciones físicas radicalmente distintas.

La minería espacial no solo requiere innovaciones tecnológicas profundas, sino también una transformación conceptual sobre cómo, dónde y para qué extraer recursos fuera del planeta, siempre bajo una visión integrada entre ingeniería, sostenibilidad y colonización futura.

Referencias

- Agency, E. S. (2017). *THE EUROPEAN SPACE AGENCY*. Obtenido de [https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Spain/Todo_sobre_Mercurio#:~:text=Atm%C3%B3sfera%3A%20muy%20delgada%20\(%3C10,Lunas%3A%20ninguna](https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Spain/Todo_sobre_Mercurio#:~:text=Atm%C3%B3sfera%3A%20muy%20delgada%20(%3C10,Lunas%3A%20ninguna).
- Asphaug, E. (2009). Growth and Evolution of Asteroids. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 37: 413-448.
- Basilevsky, A. T., & W. Head, J. (2003). The surface of Venus. *Reports on Progress in Physics*, 66(10): 1699-1734.
- Bell, Davis, D., Hatmann, W. K., & Gaffey, M. J. (1989). Asteroids: The big picture. En *Astroids II* (págs. 921-948). University of Arizona Press, Tucson.
- Benna, M., Mahaffy, P. R., Halekas, J. S., Elphic, R. C., & Delory, G. T. (2015). Variability of helium, neon and argon in the lunar exosphere as observed by LADEE NMS instrument. *Geophysical Research Letters*, 42(10): 3723-2729.
- Birch, P. (1991). Terraforming Venus Quickly. *Journal of the British Interplanetary Society*.
- Birch, P. (1993). How to spin a planet. *Journal of the British Interplanetary Society*.
- Bugby, D. C., Farmer, J. T., O'Connor, B. F., Wirzburger, M. J., Stouffer, C. J., & Abel, E. D. (2010). Two-Phase Thermal Switching System for a Small, Extended Duration Lunar Surface Science Platform. *AIP Conference Proceedings*, (págs. 76-83).
- Bus, S. J., & Binzel, R. P. (2002). Phase II of the Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey: A Feature-Based Taxonomy. *Icarus*, 158(1): 146.
- Calla, P., Fries, D., & Welch, C. (2019). *Asteroid mining with small spacecraft and its economic feasibility*. International Space University, France.
- Chopra, S., Gururaj, A., Kulkarni, R., & Guven, U. (2015). ASTEROID MINING USING A SOLAR POWERED ROVER. *Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC*, 9559-9558.
- Chpolianski, D., & Zong-Xian, Z. (2024). REVIEW ON QUARRYING METHODS SUITABLE FOR SPACE MINING MISSIONS. *JOURNAL OF SUSTAINABLE MINING*, Vol 23: Iss2, Article 8.
- Clarín. (13 de December de 2016). *Clarín*. Obtenido de https://www.clarin.com/sociedad/registraron-chile-mayor-radiacion-solar-historia-planeta-superior-venus_0_dOsyBOoJvU.html
- Clark, B. e. (1976). Inorganic Analysis of Martian Samples at the Viking Landing Sites. *Science*, 1283-1288.
- Derecho Espacial. (6 de Diciembre de 2015). *Derecho Espacial*. Obtenido de Una ley en Estados Unidos habilitó la propiedad privada de objetos del espacio: <https://www.derechoespacial.org/2015/12/una-ley-en-estados-unidos-habilito-la-propiedad-privada-de-objetos-del-espacio/>
- Ehlmann, B. L., & Edwards, C. S. (2014). Mineralogy of the Martian Surface. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 291-315.
- Foley, C. N., Economou, T. E., Clayton, R. N., Brückner, J., Dreibus, G., Rieder, R., & Wänke, H. (2008). Martian surface chemistry: APXS results from the Pathfinder landing site. En J. Bell, *The Martian Surface: Composition, Mineralogy and Physical Properties* (págs. 42-43). UK: Cambridge Planetary Science.
- Fujiwara, A., Kawaguchi, J., Yeomans, D. K., Abe, M., Mukai, T., Okada, T., . . . Uesugi, K. (2006). The Rubble-Pile Asteroid Itokawa as Observed by Hayabusa. *Science*, 312(5778): 1330-1334.
- Gaffey. (1976). Spectral reflectance characteristics of the meteorite classes. *J. Geophys*, 905-920.
- Gilmore, M. S., Darby Dyar, M., Mueller, N., Brossier, J., Santos, A. R., Mikhail, I., . . . Jörn, H. (2023). Mineralogy of the Venus Surface. *Space Science Reviews*, Volume 219, 52.

- Goldschmidt Conference. (14 de August de 2018). *PHYS.ORG*. Obtenido de <https://phys.org/news/2018-08-scientists-mineral-co2-atmosphere.html>
- Hall, L. (2017). *NASA*. Obtenido de <https://www.nasa.gov/general/optical-mining-of-asteroids-moons-and-planets-to-enable-sustainable-human-exploration-and-space-industrialization/>
- Hartzell, C. M., & Scheeres, D. J. (2013). Dynamics of levitating dust particles near asteroids and the Moon. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 118, 116-125.
- Hirt, C., Claessens, S. J., Kuhn, M., & Featherstone, W. E. (2012). Kilometer-resolution gravity field of Mars: MGM2011. *Planetary and Space Science*, 147-154.
- Kenneth, R. (2015). Terraforming Mercury. En *Inner Solar System: Prospective Energy and Material Resources* (págs. 421-435). Springer International Publishing.
- Lide, D. R. (2005). ABUNDANCE OF ELEMENTS IN THE EARTH'S CRUST AND IN THE SEA. En W. M. Haynes, *CRC handbook of chemistry and physics, Internet Version* (págs. 14-17).
- Low, F. J., Beintema, D. A., Gautier, T. N., Gillet, F. C., Beichman, C. A., Neugebauer, G., . . . Wesselius, P. R. (1984). Infrared cirrus - New components of the extended infrared emission. *Astrophysical Journal Letters*, L19-L22.
- Low, F. J., Beintema, D. A., Gautier, T. N., Gillett, F. C., Beichman, C. A., Neugebauer, G., . . . Wesselius, P. R. (1984). Infrared cirrus – New components of the extended infrared emission. *Astrophysical Journal Letters*, 19-22.
- Lucey, P., Korotev, R. L., Gillis, J. J., Taylor, L. A., Lawrence, D., Campbell, B. A., . . . Maurice, S. (2006). Understanding the lunar surface and space-Moon interactions. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 60(1): 83-219.
- McCarthy, N. (2009). *Autonomous systems: Social, legal and ethical issues*. The Royal Academy of Engineering.
- Millholland, C. D. (07 de July de 2021). *Thermo Fisher*. Obtenido de Evaluación de materiales de control térmico para proteger naves espaciales: <https://www.thermofisher.com/blog/cienciaacelerada/materiales/evaluacion-de-materiales-de-control-termico-para-proteger-naves-espaciales/>
- Moura, T. S., Winter, O. C., Amarante, A., Sfair, R., Borderes-Motta, G., & Valvano, G. (2020). Dynamical environment and surface characteristics of asteroid (16) Psyche. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 3120-3136.
- NASA. (2013). Obtenido de <https://web.archive.org/web/20130607140708/http://quest.nasa.gov/aero/planetary/mars.html>
- NASA. (2024). *NASA*. Obtenido de <https://ciencia.nasa.gov/cambio-climatico/preguntas-frecuentes/se-puede-utilizar-la-nueva-tecnologia-de-conversion-de-carbono-en-oxigeno-de-la-nasa-como-moxie-para-abordar-el-cambio-climatico/>
- NASA. (15 de March de 2024). *Todo sobre la Tierra*. Obtenido de NASA Space Place: <https://spaceplace.nasa.gov/all-about-earth/sp/#:~:text=Tiene%20una%20superficie%20s%C3%B3lida%20y,el%2070%25%20de%20su%20superficie.&text=Nuestra%20atm%C3%B3sferaest%C3%A1%20compuesta%20en,ox%C3%ADgeno%20que%20nos%20permite%20respirar.>
- Nikolayeva, O. V. (1990). GEOCHEMISTRY OF THE VENERA 8 MATERIAL DEMONSTRATES THE PRESENCE OF CONTINENTAL CRUST ON VENUS. *Earth, Moon and Planets*, (50) 329-341.
- Nittler, L. R. (2011). *The Major-Element Composition of Mercury's Surface from MESSENGER X-ray Spectrometry*.
- Nittler, L. R. (2019). *The Surface Composition of Mercury*.
- Nittler, L. R., & Weider, S. Z. (2019). The Surface Composition of Mercury. *Elements*, 33-38.
- Observatory, N. E. (April de 2024). *Land Surface Temperature*. Obtenido de NASA Earth Observatory: https://earthobservatory.nasa.gov/global-maps/MOD_LSTD_M

- Park, R. S., Vaughan, A. T., Konopliv, A. S., Ermakov, A. I., Mastrodemos, N., Castillo-Rogez, J. C., . . . Zuber, M. T. (2019). High-resolution shape model of Ceres from stereophotoclinometry using Dawn Imaging Data. *Icarus*, 812-827.
- PRESS, I. (2020). *IBERIAN PRESS*. Obtenido de https://www.iberianpress.es/noticia/artemisa-el-proyecto-de-mineria-lunar/31237#Artemisa_y_la_mineria_lunar
- Robertson, E. C. (14 de January de 2011). *United States Geological Survey (USGS)*. Obtenido de The interior of the Earth: <https://pubs.usgs.gov/gip/interior/#:~:text=The%20crust%20is%20presumed%20to,more%20titanium%20than%20earth%20basalt.>
- Salas, J. (2024). *EL PAÍS*. Obtenido de Descubiertos depósitos masivos de agua helada bajo el ecuador de Marte: <https://elpais.com/ciencia/2024-01-18/descubiertos-depositos-masivos-de-agua-helada-en-el-ecuador-de-marte.html>
- Service, N. W. (7 de August de 2021). Obtenido de <https://web.archive.org/web/20210807222839/https://www.weather.gov/fsd/venus>
- SERVICE, N. W. (07 de August de 2021). *NATIONAL WEATHER SERVICE*. Obtenido de <https://web.archive.org/web/20210807222839/https://www.weather.gov/fsd/venus>
- Smrekar, S., Stofan, E., & Mueller, N. (2014). Venus: Surface and Interior. En T. Spohn, D. Breuer, & T. V. Johnson, *Encyclopedia of the Solar System* (págs. 332-334).
- Sun, Z., Jia, Y., & Zhang, H. (2013). Technological advancements and promotion roles of Chang'e-3 lunar probe mission. *Science China*, 56 (11): 2702-2708.
- T., P. (2020). Thermal Extraction of Volatiles from Lunar and Asteroid. *Journal of Aerospace Engineering*.
- Taylor, F. W. (2014). Venus: Atmosphere. En T. Spohn, D. Breuer, & T. V. Johnson, *Encyclopedia of the Solar System*.
- Taylor, R. (1992). Paraterraforming: The Worldhouse Concept. *Journal of the British Interplanetary Society*, 45: 341-352.
- Taylor, S. R. (1975). *Lunar science: a post-Apollo view*. New York: Pergamon Press.
- U.S. Department of State. (20 de Enero de 2017). *U.S. Department of State*. Obtenido de Treaty on Principles Governing the Activities of States in the Exploration and Use of Outer Space, including the Moon and Other Celestial Bodies (Outer Space Treaty): <https://2009-2017.state.gov/t/isn/5181.htm>
- Univision. (5 de April de 2018). *Univision*. Obtenido de <https://www.univision.com/explora/que-tan-fuerte-es-la-gravedad-en-los-planetas-del-sistema-solar>
- Williams, D. (2 de February de 2006). *NASA*. Obtenido de Moon Fact Sheet: <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/moonfact.html>
- Williams, D. (11 de January de 2024). *NASA Earth Fact Sheet*. Obtenido de <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/earthfact.html>
- Williams, D. (11 de January de 2024). *Venus Fact Sheet*. Obtenido de <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/venusfact.html>
- Wyatt, M., & McSween, H. (2002). Spectral evidence for weathered basalt as an alternative to andesite in the northern lowlands of Mars. *Nature*.
- Zevenhoven, R., & Fält, M. (2018). Radiative cooling through the atmospheric window: A third, less intrusive geoengineering approach. *Energy*, 27-33.
- Zubrin, R. M., & McKay, C. P. (1993). Technological Requirements for Terraforming Mars. *American Institute of Aeronautics and Astronautics*.
- Zubrin, R., & Wagner, R. (2011). *The Case for Mars: The Plan to Settle the Red Planet and Why We Must*.