

## Forecasting water supply shortages in space missions using scenario - based simulation within erp systems

Victor R. Huaman Simeon

<sup>a</sup> *Aerospace Sciences & Health Research Laboratory (INCAS-Lab), Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur, Lima, Peru, [1923110543@untels.edu.pe](mailto:1923110543@untels.edu.pe)*

<sup>b</sup> *Universidad Nacional de Moquegua, Prolong. Calle Ancash S/N, Moquegua, Peru, [avid.roman-gonzalez@ieee.org](mailto:avid.roman-gonzalez@ieee.org)*

<sup>c</sup> *Image Processing Research Laboratory (INTI-Lab), Universidad de Ciencias y Humanidades, Lima, Peru, [natalia.i.vargascuentas@ieee.org](mailto:natalia.i.vargascuentas@ieee.org)*

\* Corresponding Author

### Abstract

La gestión autónoma de recursos es un desafío crítico para las misiones espaciales de larga duración, donde la toma de decisiones no puede depender de la comunicación con la Tierra. Este trabajo presenta la validación de un sistema de simulación predictiva, integrado en una plataforma de planificación de recursos empresariales (ERP), diseñado para funcionar como una herramienta de soporte a la decisión para la tripulación. El sistema fue evaluado mediante la simulación de múltiples escenarios operativos, demostrando su capacidad para clasificar automáticamente situaciones de riesgo óptimo, moderado y crítico en el abastecimiento de agua. A través de un componente de inteligencia autónoma (ASTRO-AI), el sistema genera alertas preventivas y recomendaciones contextuales sin intervención humana, traduciendo proyecciones de consumo en diagnósticos accionables. Los resultados demuestran que esta herramienta puede mejorar significativamente la conciencia situacional de la tripulación, un paso clave hacia la autosuficiencia en misiones extraplanetarias.

**Keywords:** ERP espacial, simulación por escenarios, escasez de agua, misiones orbitales, predicción autónoma, ASTRO-AI

### 1. Introduction

La gestión de recursos hídricos es un pilar fundamental dentro de los sistemas de soporte vital de circuito cerrado (ECLSS), un factor crítico para la supervivencia en misiones de larga duración [1]. El desarrollo de estas tecnologías es clave para garantizar una planificación operativa exitosa en entornos extraplanetarios [6]. Un desafío principal para futuras misiones a la Luna o Marte es la autonomía en esta gestión, ya que los retardos en la comunicación impiden la supervisión en tiempo real desde la Tierra [2]. Por ello, aumentar la autonomía de la tripulación se ha convertido en un área de investigación prioritaria para la exploración espacial [13]. Para lograr esta autosuficiencia, es esencial el desarrollo de sistemas logísticos robustos [7] y herramientas de soporte a la decisión que permitan a los astronautas operar sin la intervención constante del control de misión [10].

Actualmente, tecnologías como el monitoreo de inventario mediante RFID en la Estación Espacial Internacional (ISS) han mejorado la logística [3], pero aún se centran en el seguimiento de stock y no en la predicción de escenarios de riesgo. Aunque los sistemas

de reciclaje de la ISS han alcanzado una eficiencia de hasta el 98% [4], la toma de decisiones ante una anomalía sigue recayendo en la tripulación. Esta brecha en la capacidad predictiva y de diagnóstico autónomo [12], un pilar de la inteligencia artificial aplicada a la logística espacial [14], es la que busca cerrar la presente investigación.

Este trabajo propone y valida un módulo de simulación integrado en un sistema ERP, una tecnología estándar en la industria aeroespacial [5]. A diferencia de los sistemas pasivos, nuestro enfoque utiliza un componente de inteligencia autónoma (ASTRO-AI) para traducir datos de consumo en diagnósticos de riesgo claros. Como se demostrará, el sistema genera alertas preventivas y recomendaciones contextuales, mejorando la capacidad de la tripulación para gestionar sus recursos de manera proactiva.

### 2. Material and methods

#### 2.1 Plataforma y herramientas utilizadas

El módulo de simulación fue desarrollado utilizando la plataforma Oracle NetSuite, un sistema de

planificación de recursos empresariales (ERP) basado en la nube. El desarrollo se realizó mediante el uso de SuiteScript 2.1, una API basada en JavaScript que permite la personalización del sistema. Para la visualización dinámica, se utilizó la librería Chart.js, mientras que para la generación de alertas por voz se empleó la interfaz Web Speech API integrada en navegadores modernos.

## 2.2 Escenario de Misión: Hábitat Lunar "Copernicus"

Para validar el módulo de simulación en un contexto operativo relevante, se definió un caso de estudio basado en una misión de 30 días en un hábitat en la superficie lunar. Este escenario, denominado "Misión Copernicus", asume los parámetros operativos nominales presentados en la Tabla 1, los cuales fueron extraídos del primer escenario de simulación.

Tabla 1. Parámetros de la Simulación para la Misión "Copernicus"

Parámetro	Valor	Fuente / Justificación
Duración (T <sub>m</sub> )	30 días	Parámetro de simulación de misión corta.
Tripulación	3 astronautas	Parámetro de simulación inicial.
Consumo Diario (C <sub>d</sub> )	10.5 litros/día	Parámetro de simulación inicial.
Stock Inicial (S)	500 litros	Parámetro de simulación inicial.
Eficiencia Reciclaje (n <sub>r</sub> )	75%	Sistema de soporte vital intermedio.

## 2.3 Arquitectura del sistema

El sistema se compone de dos scripts principales:

- **Suitelet:** encargado de generar la interfaz visual del simulador, recolectar los parámetros de entrada del usuario (días de misión, consumo diario, eficiencia de reciclaje y stock de agua), y

cargar los elementos gráficos y botones interactivos.

- **Client Script:** responsable del procesamiento en tiempo real de los datos ingresados, el cálculo de consumo neto, la predicción de días de abastecimiento, la clasificación del estado de riesgo y la generación de gráficos, alertas visuales y auditivas.

## 2.4 Variables y parámetros utilizados

El sistema permite configurar las siguientes variables de entrada:

- C<sub>d</sub> : Consumo diario de agua (litros/día)
- n<sub>r</sub> : Eficiencia del reciclaje (fracción decimal)
- S: Stock inicial de agua (litros)
- T<sub>m</sub> : Duración de la misión (días)

Con estas variables, es posible simular cómo se comportan las reservas de agua a lo largo del tiempo.

## 2.5 Cálculos realizados

A partir de los parámetros ingresados, se realizan los siguientes cálculos:

### Consumo neto diario:

$$C_n = C_d \times (1 - n_r)$$

### Días estimados hasta agotamiento del stock:

$$T_a = \frac{S}{C_n}$$

### Umbral mínimo seguro (para tres días de misión):

$$U_s = C_n \times 3$$

Estos cálculos son usados para determinar el nivel de riesgo según las siguientes condiciones:

Clasificación	Condición
Óptimo	$T_a \geq T_m$
Moderado	$T_a \geq 0.6 \times T_m$
Crítico	$T_a < 0.6 \times T_m$

## 2.6 Módulo ASTRO-AI

El sistema cuenta con un componente lógico llamado ASTRO-AI, que interpreta el escenario simulado y genera alertas personalizadas. Las alertas incluyen:

- Mensajes predictivos visuales
- Recomendaciones específicas por nivel de riesgo
- Alertas habladas mediante síntesis de voz

## 2.7 Visualización y usabilidad

La interfaz del simulador incluye:

- Un medidor animado de nivel de agua (representado como gota)
- Gráficas de stock proyectado por día
- Línea de umbral mínimo visible en el gráfico
- Botones de acción: “Calcular” y “Predicción de Días”
- Panel de resumen y alerta inteligente

## 2.8 Validación del sistema

Para validar el funcionamiento del módulo, se simuló un escenario de misión orbital de 30 días con distintos niveles de consumo y reciclaje. Los resultados visuales fueron verificados manualmente para confirmar que la alerta generada coincidía con el estado real del recurso proyectado. Se documentaron capturas de pantalla, niveles de riesgo y recomendaciones generadas por ASTRO-AI.

## 3. Results

Con el objetivo de validar el comportamiento del módulo bajo el escenario de la Misión "Copernicus", se realizaron simulaciones para evaluar diferentes condiciones operativas. El sistema fue evaluado mediante cuatro escenarios clave para determinar su capacidad de clasificación de riesgo y generación de alertas autónomas para la tripulación del hábitat lunar.

### 3.1 Escenario de Operación Nominal en "Copernicus"

Este primer escenario evaluó el rendimiento del sistema bajo las condiciones operativas nominales de la misión, definidas en la Tabla 1. Para una tripulación de 3 astronautas y un consumo de 10.5 litros diarios, con una eficiencia de reciclaje del 75% y un stock de 500 litros, el sistema calculó un consumo neto de 2.63 litros por día, proyectando una duración estimada de 190.5 días. La visualización mostró una curva de descenso lineal y estable del recurso, sin alcanzar el umbral mínimo de seguridad (ver Fig. 1). El componente ASTRO-AI clasificó el riesgo como óptimo y emitió el mensaje: “Resources are sufficient. Normal operations ongoing.” (ver Fig. 2). Además, el medidor orbital se mantuvo al 100 %, indicando una situación completamente segura (ver Fig. 3).

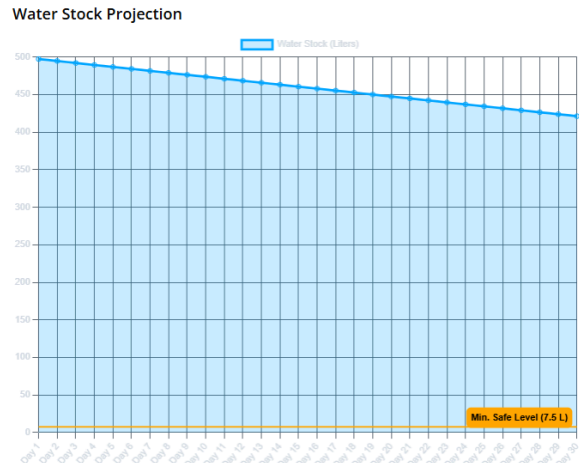


Fig. 1. Proyección del stock de agua diario durante la misión. La curva muestra el nivel descendente del recurso en función del consumo, sin cruzar el umbral mínimo de seguridad.

## Result

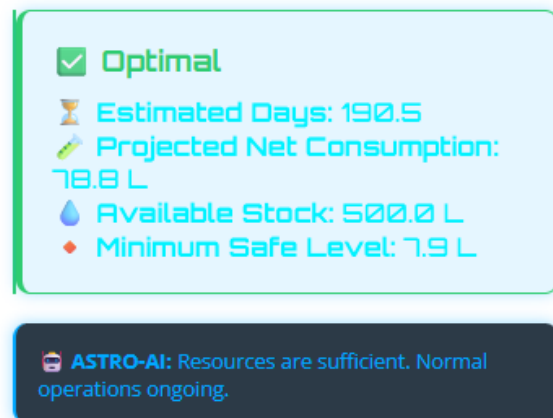


Fig. 2. Resultado del análisis simulado con clasificación de riesgo óptima y mensaje autónomo generado por ASTRO-AI.



Fig. 3. Medidor orbital visual con nivel del 100 %, correspondiente a un escenario de riesgo nulo.

### 3.2 Escenario con eficiencia degradada

Este escenario representa una situación en la que el sistema de reciclaje opera con eficiencia limitada, simulando una condición parcialmente comprometida. Se configuraron los siguientes parámetros: consumo diario de 10.5 litros, eficiencia de reciclaje del 40 % y un stock inicial de 315 litros, para una misión de 30 días.

El sistema calculó un consumo neto de 6.3 litros por día, lo que proyectó una duración estimada de 50.0 días. Aunque este valor supera el tiempo nominal de la misión, no alcanza el umbral considerado como óptimo ( $\geq 60$  días), por lo que el sistema clasificó la condición como de riesgo moderado.

La visualización evidenció una curva de descenso progresiva, cercana a la línea de umbral mínimo de seguridad, definida en 33.0 litros (ver Fig. 4). ASTRO-AI generó una alerta contextual indicando: “Moderate risk. Keep monitoring the situation.”, junto con recomendaciones para optimizar el consumo (ver Fig. 5). El medidor orbital mostró un nivel del 100 % relativo, reflejando la autonomía proyectada respecto al valor máximo esperado (ver Fig. 6). El color amarillo del panel y el mensaje reforzaron visualmente la clasificación como riesgo moderado.

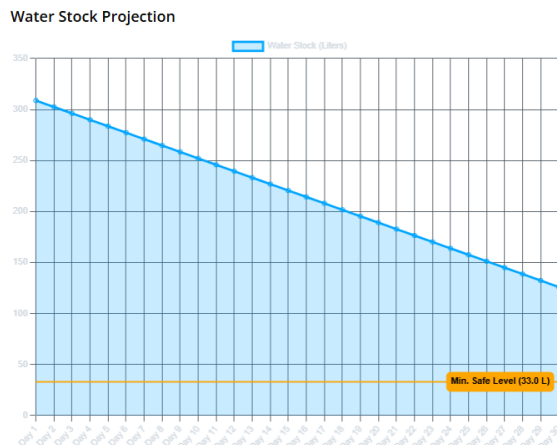


Fig. 4. Proyección del stock de agua bajo condiciones degradadas. La curva descendente se aproxima al umbral de seguridad mínima.

### Result



Fig. 5. Resultado del análisis con clasificación de riesgo moderado y alerta generada automáticamente por ASTRO-AI.



Fig. 6. Medidor orbital con nivel visual alto (100 %) y contexto de riesgo moderado.

### 3.3 Escenario proyectado por consumo actual

Este escenario ilustra la funcionalidad predictiva del sistema ante una situación sin horizonte de misión definido, donde se busca estimar la autonomía del recurso hídrico exclusivamente a partir de los valores actuales de consumo, eficiencia y stock disponible.

Se ingresaron los siguientes parámetros en la interfaz del simulador: consumo diario de 9.0 litros, eficiencia de reciclaje de 60 % y stock inicial de 240 litros. El sistema recibió estos valores a través de la opción “Predict Days”, que activa el modo de proyección dinámica (ver Fig. 7).

Como resultado, el sistema calculó un consumo neto de 3.6 litros por día y estimó una duración de 66.7 días, lo cual supera ampliamente la duración típica de misión (30 días) y el umbral de clasificación óptima (60 días). ASTRO-AI clasificó la situación como óptima, generando el mensaje “Resources are sufficient. Normal operations ongoing.” y sugiriendo continuar con el

monitoreo pasivo. La curva de stock se extendió visualmente mediante una línea punteada roja, diferenciando la proyección dinámica del cálculo estándar (ver Fig. 8).



Fig. 7. Interfaz del sistema con parámetros ingresados

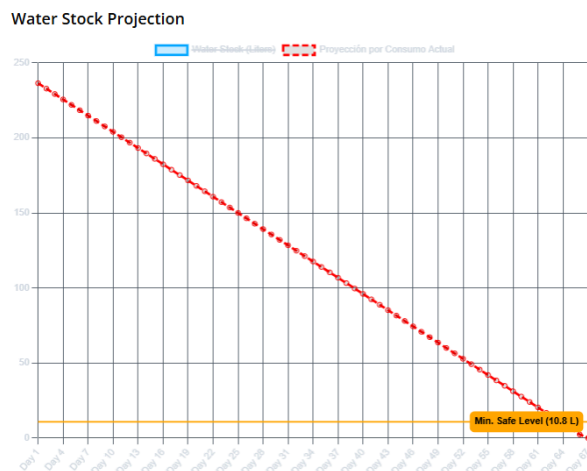


Fig. 8. Curva de proyección extendida generada automáticamente. La línea punteada roja representa la predicción de duración basada en consumo actual.

### 3.4 Escenario crítico de riesgo

Este escenario representa una condición operativa severa, donde el consumo hídrico supera los niveles sostenibles y la eficiencia del sistema de reciclaje es baja. Se ingresaron los siguientes parámetros: consumo diario de 16.0 litros, eficiencia de reciclaje de 25 % y un stock disponible de 200 litros, para una misión de 30 días.

El sistema calculó un consumo neto de 12.0 litros por día, proyectando una duración estimada de 16.6 días, valor que se encuentra significativamente por debajo del mínimo requerido. Como resultado, el sistema clasificó el escenario como de riesgo crítico, activando alertas inmediatas y recomendaciones de contingencia.

La curva de stock mostró una pendiente pronunciada de agotamiento, evidenciando la proximidad al umbral de seguridad (ver Fig. 9). El componente ASTRO-AI generó el mensaje: “Critical water level! ASTRO-AI recommends immediate intervention.”, junto con sugerencias como la reducción urgente del consumo y la activación de protocolos de emergencia (ver Fig. 10). El medidor orbital se visualizó en color rojo con un nivel

inferior al 60 %, reflejando una situación inestable (ver Fig. 11).

Este tipo de simulación permite al sistema actuar de forma preventiva, alertando sobre condiciones que podrían comprometer la continuidad de la misión incluso antes de alcanzar niveles críticos de stock.

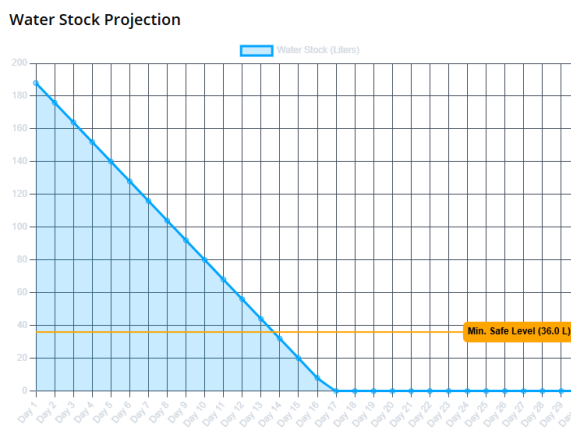


Fig. 9. Proyección del stock bajo condiciones críticas. La curva presenta un descenso acelerado con cruce anticipado del umbral mínimo.

## Result

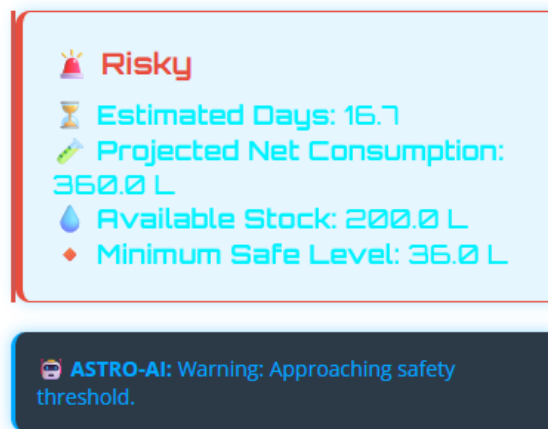


Fig. 10. Alerta de nivel crítico generada por ASTRO-AI, con recomendaciones de acción inmediata.

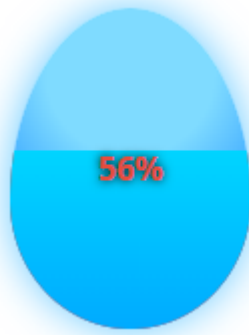


Fig. 11. Medidor orbital visual con nivel inferior al 60 % y color rojo, correspondiente a riesgo crítico.

#### 4. Discussion

Los resultados obtenidos a través de las simulaciones demuestran la capacidad del sistema propuesto para operar de manera autónoma en la evaluación del recurso hídrico durante misiones espaciales. La clasificación de riesgo, el análisis de duración proyectada y la generación de alertas en tiempo real permiten anticipar situaciones críticas sin intervención humana.

La importancia de estos hallazgos se magnifica en el contexto de la Misión "Copernicus". Por ejemplo, en el escenario de falla crítica (3.4), una alerta temprana de ASTRO-AI le daría a la tripulación del hábitat lunar un tiempo de reacción crucial para diagnosticar el problema o activar protocolos de racionamiento. Esto demuestra que el sistema no es solo una herramienta de monitoreo, sino un sistema de soporte a la decisión proactivo, que reduce la carga cognitiva de la tripulación en un entorno de alto estrés.

En comparación con los métodos actualmente utilizados en la Estación Espacial Internacional, como el monitoreo mediante tecnología RFID, el sistema desarrollado ofrece una ventaja sustancial en términos de autonomía. El módulo ASTRO-AI actúa como una capa de inteligencia que no solo interpreta los datos, sino que también comunica recomendaciones específicas. La representación visual de los escenarios aporta claridad y facilita la toma de decisiones, mientras que la diferenciación entre estados óptimo, moderado y crítico habilita acciones anticipadas.

Sin embargo, es crucial reconocer una limitación inherente a la implementación actual, utilizada para esta prueba de concepto: su dependencia de una arquitectura en la nube. Si bien fue ideal para la validación, una versión operativa para la Misión "Copernicus" requeriría una arquitectura local ('on-edge') en los sistemas de la nave. El desarrollo futuro debería centrarse en un módulo local que se sincronice periódicamente con un ERP en la Tierra a través de una API ligera y resiliente, asegurando así una autonomía completa incluso durante pérdidas de comunicación.

#### 5. Conclusions

El presente trabajo demostró la viabilidad de integrar un módulo de simulación predictiva en una plataforma ERP como herramienta de soporte a la decisión para misiones espaciales. La validación, realizada a través del caso de estudio de la Misión "Copernicus", confirmó la capacidad del sistema para clasificar de forma autónoma escenarios de riesgo óptimo, moderado y crítico, traduciendo datos complejos en diagnósticos visuales y accionables.

La integración del componente ASTRO-AI fue clave para alcanzar una operación sin intervención humana, una capacidad esencial para futuras misiones a la Luna o Marte. Si bien se ha validado como una prueba de concepto en una arquitectura en la nube, se concluye que este enfoque representa un primer paso fundamental hacia sistemas de logística inteligentes y autónomos. El desarrollo futuro de una versión local ('on-edge') consolida esta herramienta como una solución robusta para la autosuficiencia en plataformas extraplanetarias.

#### References

- [1] M. K. Ewert, "A review of recent developments in advanced life support systems for long-duration space missions," *Acta Astronautica*, vol. 198, pp. 245-259, Sep. 2022.
- [2] A. D. C. Smith and L. Jones, "Logistics for a sustained lunar presence: A review of cis-lunar supply chain challenges," *Journal of Spacecraft and Rockets*, vol. 60, no. 1, pp. 15-28, Jan. 2023.
- [3] J. Miller, et al., "Autonomous inventory management and logistics on the International Space Station: An update on the RFID REALM system," in *Proc. 74th International Astronautical Congress (IAC)*, Baku, Azerbaijan, Oct. 2-6, 2023, Paper IAC-23-D3.2.1.
- [4] NASA, "NASA Achieves Water Recovery Milestone on International Space Station," *NASA.gov*, Jun. 22, 2023. [Online]. Available: <https://www.nasa.gov/missions/station/iss-research/nasa-achieves-water-recovery-milestone-on-international-space-station/>
- [5] P. K. Sharma and S. Kumar, "The role of ERP systems in the digital transformation of the aerospace industry: A 2024 perspective," *Computers in Industry*, vol. 155, 103987, Mar. 2024.



- [6] D. DePasquale, J. L. de la Torre, and M. A. Rosen, "A review of advanced life support system technologies for long-duration space missions," *Journal of the British Interplanetary Society*, vol. 72, pp. 198-213, 2019.
- [7] T. E. Stuit, J. A. Levri, and C. H. L. N. Zabel, "An integrated model for mission planning and logistics management for long-duration human space exploration," *Acta Astronautica*, vol. 177, pp. 731-741, Dec. 2020.
- [8] European Space Agency (ESA), "Advanced Closed Loop System," ESA.int. [Online]. Available: [https://www.esa.int/Science\\_Exploration/Human\\_and\\_Robotic\\_Exploration/Research/Advanced\\_Closed\\_Loop\\_System](https://www.esa.int/Science_Exploration/Human_and_Robotic_Exploration/Research/Advanced_Closed_Loop_System)
- [9] D. T. Andersen, C. P. McKay, and D. A. Wharton, "Autonomous systems for life detection in remote environments," *Astrobiology*, vol. 11, no. 10, pp. 949-960, Dec. 2011.
- [10] S. B. Johnson and C. M. Holloway, "A survey of decision support systems for spaceflight operations," in *Proc. IEEE Aerospace Conference*, 2019, pp. 1-13.
- [11] O. de Weck and D. Simchi-Levi, "SpaceNet 1.4: A discrete event simulation model for space logistics," in *AIAA SPACE 2005 Conference & Exposition, Long Beach, CA, USA*, 2005.
- [12] J. R. Brogan and J. D. L. Rodriguez, "Predictive modeling of consumable usage for long-duration space missions," *Journal of Spacecraft and Rockets*, vol. 58, no. 5, pp. 1245-1256, Sep. 2021.
- [13] K. H. Beaton, et al., "Crew autonomy in long-duration space exploration missions: A review of the literature," *Acta Astronautica*, vol. 162, pp. 449-458, Sep. 2019.
- [14] I. I. Inc. and A. Corporation, "The Application of Artificial Intelligence to Space Logistics," NASA, Tech. Rep. NASA/CR-2018-220038, 2018.
- [15] J. D. Carpenter, et al., "In-Situ Resource Utilisation (ISRU) for sustainable lunar exploration," *Planetary and Space Science*, vol. 182, 104838, Mar. 2020.