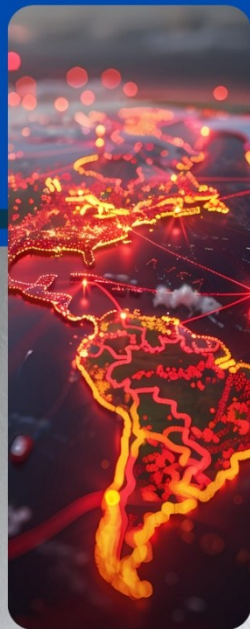


Fundamentos de Administración, Comercio Exterior, Ética y Desarrollo Sostenible en la Era Espacial

Tomo 1


**Live
Working**
EDITORIAL



ISBN: 978-9942-580-56-6



UNEMI
UNIVERSIDAD ESTATAL DE MILAGRO

 **InterCarga**
Integrated Logistics Services

UG
UNIVERSIDAD DE
GUAYAQUIL

**Fundamentos de Administración, Comercio Exterior, Ética
y Desarrollo Sostenible en la Era Espacial: Tomo 1**

Créditos

Dirección y Coordinación Editorial: Sara Díaz Villacís

Revisión de contenido Rously Atencio PhD

Revisión pedagógica: Fabrizzio Andrade PhD (c)

© ® Derechos de Copia y Propiedad Intelectual

Maquetación y Diseño de portada: *Sara Díaz V*

Libro bajo revisión técnica y didáctica de pares

Guayaquil - Ecuador

Marzo del 2026



Descarga:

<https://liveworkingeditorial.com/product/978-9942-580-56-6/>

Enlace del DOI:

<https://doi.org/10.63792/978-9942-580-56-6>





ISBN: 978-9942-580-56-6



9 789942 580566



Google Play
Books

Autores

**Docentes de la Universidad de Guayaquil
Líderes de la obra “Fundamentos de Administración,
Comercio Exterior, Ética y Desarrollo sostenible en la Era
Espacial – Tomo 1”**



Guido Poveda Burgos



Delia Cevallos Castro



Clara Cabrera Jara



Lourdes Sambonino García



Julio Baque Mieles



Gabriel Neira Vera

Colaboradores distinguidos



Gonzalo Chaquina Brito
CEO
INTERCARGA S.A.



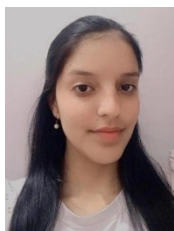
Simón Velásquez Bazurto
Docente
Instituto Superior Tecnológico Argos



César José Ávila Martínez
Docente
Universidad Estatal de Milagro

**Estudiantes de la Carrera de Licenciatura en
Comercio Exterior**

**Facultad de Ciencias Administrativas de la Universidad de
Guayaquil que participan en calidad de coautores de la
obra**



**Kennya
Andrade Moran**



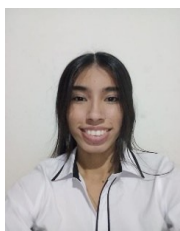
**Ronny
Avilés Cevallos**



**Marissa
Baquerizo Pita**



**Gabriel
Barreiro Zambrano**



**Kristen
Bermúdez Coello**



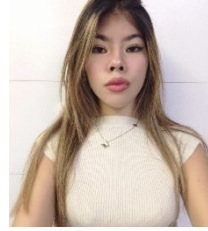
**Jeral
Calderón Marcillo**



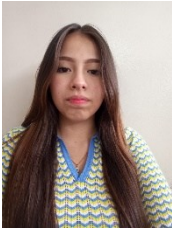
Luis
Campozano Viteri



Carlos
Campuzano Ponce



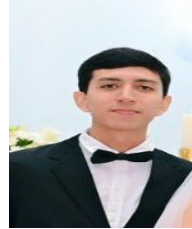
Melody
Candelario Padilla



María
Chávez Rodríguez



Byron
Cruz Jiménez



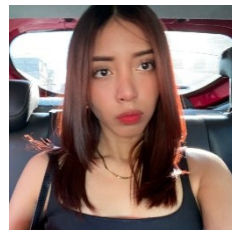
Juan
Durazno Pacheco



Diego
Granoble Santana



Dave
Gualli Naula



Danna
Herrera Tumbaco



Fausto
Luzárraga Mora



Dagmar
Maquilón Burbano



Brithanny
Martínez Tello



Jennifer
Mayerza Macas



Marco
Mendieta Monserrate



Jostin
Obando Lema



Dayana
Pacheco Peñafiel



Noemi
Piguave Moran



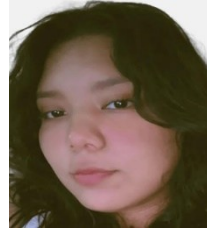
Tito
Piloso Magallanes



Danna
Quinchuqui Aguilar



Erick
Reina Mero



Emily
Reinoso Baque



Alejandro
Robles Monserrate



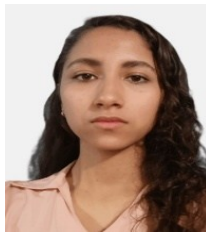
Ramsés
Ruiz Amaiguema



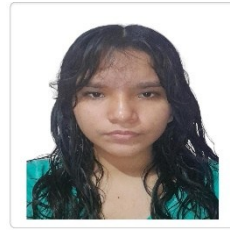
Bella
Sayay Quishpi



Valeria
Valdiviezo Miraba



Kerly
Veintimilla Rosas



Mariana
Villamar Velásquez



Narciza
Yugla Rosado



Mariuxi
Tutiven Delpeso



Sylvia Zamora
Morocho



Alex
Arévalo Chenche



Selena
Bermúdez Gualpa



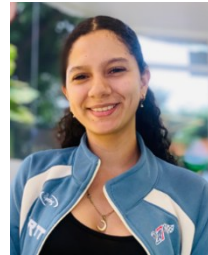
Carlos
Chang Macías



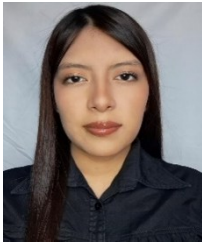
Joseph
Escobar Arreaga



Diana
Jiménez León



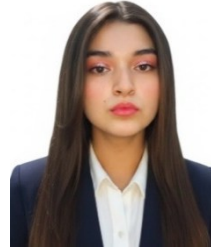
Cecilia
Loor Sellan



Josselyn
Morales Paucar



David
Muñoz Valladares



María
Peña Vega



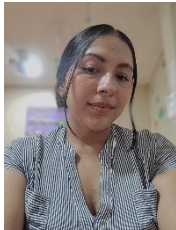
Lisbeth
Pérez Miranda



Mayerli
Ramon Cañar



Jorge
Recalde Tutiven



Judi
Robles Plua



Genesis
Rosado Córdova



Zoila
Salinas Montiel



Danna
Suarez Garzón



Jennifer
Tayo Reyes



René
Tomalá Kaiser



Nataly
Vallejo Demera

Contenido

Fundamentos de Administración, Comercio Exterior, Ética y Desarrollo Sostenible en la Era Espacial: Tomo 1	II
Créditos	III
Autores	V
Colaboradores distinguidos	VI
Estudiantes de la Carrera de Licenciatura en Comercio Exterior.....	VII
Contenido	XIV
Presentación de la obra.....	1
For educational or informational purposes.....	6
1. CAPITULO I: Horizontes sin fronteras. Fundamentos de una civilización sostenible.....	7
1.1 Resumen.....	8
1.2 Introducción	8
1.3 Metodología	10
1.3.1 Diseño de investigación.....	10
1.4 Desarrollo.....	11
1.5 Resultados.....	13
1.6 Conclusiones.....	14
2. CAPITULO II: Oportunidad comercial para el desarrollo de elaborados a base de cacao ecuatoriano para ser utilizado en misiones espaciales	17
2.1. Resumen.....	18

2.2.	Metodología	18
2.2.1.	Diseño de Investigación.....	18
2.3.	Conclusiones	43
3.	CAPITULO III: Desarrollo de alimento espacial.....	45
3.1.	Resumen.....	47
3.2.	Introducción	47
3.3.	Metodología	48
3.3.1.	Enfoque de investigación.....	48
3.4.	Desarrollo.....	49
3.5.	Resultados	63
3.6.	Conclusiones	64
4.	CAPITULO IV: Impacto del desarrollo espacial en el comercio exterior y la sostenibilidad global.....	66
4.1.	Resumen.....	67
4.2.	Abstract.....	67
4.3.	Introducción	68
4.4.	Metodología	74
4.4.1.	Diseño de investigación.....	75
4.5.	Desarrollo.....	77
4.6.	Resultados	87
5.	CAPITULO V: Ética del desarrollo tecnológico espacial y su influencia en América Latina.....	95
5.1.	Resumen.....	96
5.2.	Introducción	97
5.3.	Metodología	99

5.3.1.	Diseño de Investigación.....	101
5.4.	Desarrollo.....	102
5.5.	Resultados.....	107
5.6.	Conclusiones.....	108
6.	CAPITULO VI: Comercio y administración sostenible del agua en misiones espaciales: modelo ético de generación, reutilización y gestión hídrica adaptada al ser humano.....	114
6.1.	Resumen.....	114
6.2.	Introducción.....	115
6.3.	Metodología.....	116
6.3.1.	Diseño de investigación.....	116
6.4.	Resultados.....	121
6.5.	Conclusiones.....	123
7.	CAPITULO VII: Gobernanza y cooperación internacional en la era espacial.....	125
7.1.	Resumen.....	125
7.2.	Introducción.....	126
7.3.	Metodología.....	127
8.	CAPITULO VIII: Más allá de la tierra ¿Cómo prepararnos para vivir en el espacio?.....	131
8.1.	Resumen.....	132
8.2.	Introducción.....	132
8.3.	Metodología.....	134
8.3.1.	Diseño de Investigación.....	134
8.4.	Desarrollo.....	135

8.5.	Resultados.....	145
8.6.	Conclusiones.....	147
9.	CAPITULO IX: Oportunidades comerciales en la extracción de recursos naturales en el comercio exterior	149
9.1.	Introducción.....	150
9.2.	Metodología.....	151
10.	CAPITULO X: Sistema de control y verificación de mercancías en entornos espaciales con condiciones distintas a las de la tierra	158
10.1.	Resumen.....	159
10.2.	Introducción.....	159
10.2.1.	Metodología.....	160
10.2.2.	Diseño de investigación.....	161
10.3.	Desarrollo.....	161
10.4.	Resultados.....	173
10.5.	Conclusiones.....	174
11.	CAPITULO XI: La integración de la ética y el desarrollo sostenible en la administración del comercio exterior: desafíos y estrategias para economías emergentes	177
11.1.	Resumen.....	178
11.2.	Introducción.....	178
11.3.	Metodología.....	179
11.4.	Diseño de investigación.....	179
11.5.	Desarrollo.....	181
11.6.	Resultados.....	183

11.7.	Conclusiones.....	185
11.8.	Resumen.....	188
11.9.	Introducción	189
11.10.	Metodología.....	190
11.10.1.	Enfoque de la Investigación	190
11.11.	Desarrollo	191
11.12.	Resultados.....	200
11.13.	Conclusión.....	201
12.	CAPITULO XIII: Tecnologías limpias desarrolladas por la nasa como motor del comercio sostenible.....	203
12.1.	Resumen.....	203
12.2.	Introducción	204
12.3.	Metodología	205
12.3.1.	Diseño de investigación.....	205
12.3.2.	Justificación de la metodología	205
12.4.	Desarrollo.....	205
12.5.	Resultados.....	213
12.6.	Conclusiones.....	215
13.	CAPITULO XIV: Producción y exportación de alimentos aeroespaciales con alto valor proteico: una oportunidad de desarrollo para Ecuador.....	217
13.1.	Resumen.....	217
13.2.	Introducción	218
13.3.	Metodología	220
13.3.1.	Diseño de investigación.....	221

13.3.2.	Justificación de la metodología	221
13.3.3.	Prioridad de fuentes y consideración del contexto político-económico.....	222
13.4.	Desarrollo.....	223
13.5.	RESULTADOS.....	237
13.6.	CONCLUSIONES	239
14.	CAPITULO XV: Aplicación de la tecnología satelital para la gestión sostenible del agua en la región andina del Ecuador, una propuesta de la administración pública	241
14.1.	Resumen.....	241
	Palabras clave: Tecnología satelital; Teledetección; Gestión del agua; Andes ecuatorianos; Cambio climático.	242
1.7	Abstract.....	242
1.8	Introducción	242
1.9	Metodología	243
1.10	Desarrollo.....	243
1.11	Resultados.....	252
1.12	Conclusiones	253
	Referencias Bibliográficas	255

Presentación de la obra

La ciencia es la clave para descubrir los secretos del universo: uniendo a la humanidad con cada descubrimiento, expandiendo nuestro conocimiento y despertando nuestra imaginación. Al navegar por las arenas del tiempo y el espacio, la ciencia da contexto y significado a mediciones grandes y pequeñas, es así que la universidad, al igual que todo en la naturaleza se adapta, se transforma y finalmente evoluciona para mejorar la adaptación y supervivencia como un organismo viviente en un entorno cambiante. En un sentido más amplio, la evolución implica un proceso de cambio y mejora continua, ya sea en individuos, organizaciones o incluso ideas.

Justamente dentro del constante proceso de evolución de la universidad, el estudiante tiene que desempeñar un rol protagonista en la generación de nuevos saberes y conocimientos, esto es bajo la guía y tutela de aquellos profesores comprometidos con lograr la excelencia académica, social y sobre todo fomentando el desarrollo de habilidades, competencias y valores que permitan a los estudiantes desenvolverse de manera exitosa en la vida personal y profesional.

Es así que, en la búsqueda de la excelencia, la presente obra denominada “Fundamentos de Administración, Comercio Exterior, Ética y Desarrollo sostenible en la Era Espacial” - Tomo 1, ha sido desarrollada por los estudiantes de la Carrera de Licenciatura en Comercio Exterior, junto con sus docentes guía de la Universidad de Guayaquil, Facultad de Ciencias Administrativas, así como también con la participación de un docente invitado de otra institución de educación superior.

La investigación en la universidad es un proceso sistemático y riguroso que busca generar nuevos conocimientos, resolver problemas y mejorar la comprensión de diversos fenómenos.

Es esencial para el avance académico, el desarrollo profesional de estudiantes y docentes, y para contribuir al progreso de la sociedad, este paradigma intelectual es posible únicamente con el compromiso de todos los Stakeholders del mencionado proceso de formación, teniendo como eje fundamental a los estudiantes universitarios, es así que, producto del esfuerzo, dedicación, guía y sabias enseñanzas en conjunto con los profesores guía de esta obra, los estudiantes de la Carrera de Licenciatura en Comercio Exterior logran materializar este producto de un alto valor científico y rigurosidad académica, convirtiéndose en un legado para toda la humanidad.

La Universidad, así como la mente y la imaginación del hombre no tiene límites, esta traspasa las barreras de lo inimaginable volviéndolo real, gracias a eso, es ahora que estamos en una nueva era, la era del espacial, donde el hombre se lanza con todo a la conquista del espacio, la frontera final, recordando que desde mediados del siglo XX Los primeros hombres en llegar a la Luna fueron los astronautas estadounidenses Neil Armstrong, y, Edwin “Buzz” Aldrin a bordo de la misión Apolo 11 de la NASA, el 20 de julio de 1969. Armstrong fue el primero en pisar la superficie lunar, seguido por Aldrin, mientras Michael Collins pilotaba el módulo de mando en órbita.

Este hito histórico que inició con la frase “Houston, el águila ha aterrizado” dio inicio a la carrera espacial, y es así que, hasta nuestros días, el Ecuador también forma parte de la investigación pacífica del espacio. Ecuador firma y se adhiere a los Acuerdos Artemis de la NASA para la exploración y aprovechamiento aeroespacial en beneficio de la toda la humanidad.

En Washington D.C., el 21 de junio del 2023 el Gobierno del Ecuador suscribió la adhesión a los Acuerdos Artemis de la NASA, una iniciativa internacional destinada a fomentar la colaboración en la exploración y utilización del espacio. La firma de este acuerdo tuvo lugar como parte la agenda de trabajo que lleva adelante el canciller Gustavo Manrique Miranda, en Washington.

El Acuerdo busca promover la utilización sostenible y beneficiosa del espacio para toda la humanidad, a través de principios y directrices para incrementar la seguridad y la cooperación internacional. La privilegiada posición geográfica del Ecuador es una ventaja para contribuir a ese objetivo.

La adhesión de nuestro país abrirá nuevas oportunidades de cooperación internacional en tecnología, ciencia, agricultura, medicina y economía, cuyo aprovechamiento permitirá generar oportunidades de trabajo e inversión. Además, fortalecerá la imagen internacional del país como un actor comprometido con la exploración espacial pacífica.

El uso de la tecnología espacial es una herramienta fundamental para las comunicaciones, la seguridad alimentaria, la reducción de la pobreza, combatir el cambio climático y contribuye a alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Organización de las Naciones Unidas.

“Este es un gran hito para los ecuatorianos y sus futuras generaciones. Con este Acuerdo promoveremos la investigación y el desarrollo aeroespacial nacional. La forma achatada de la tierra hace que la distancia desde el Ecuador hacia el espacio, sea menor, reduciendo distancias y costos, incrementando la eficiencia operacional. El clima y el escaso tráfico espacial en la zona son ventajas adicionales”

Adicionalmente queda demostrado que el trabajo colaborativo inter multidisciplinario desplegado entre estudiantes de la

Universidad de Guayaquil, junto con sus docentes guía, genera valor agregado, y garantiza una educación inclusiva, equitativa y de calidad y promover oportunidades de aprendizaje que servirán para toda la vida a la humanidad a través de esta obra que entregamos al mundo, alcanzando el Objetivo #4 de Desarrollo sostenible de la Agenda 2030 de las Naciones Unidas, llamado “Educación de Calidad”.

Pero una educación de calidad también requiere de aliados estratégicos o Stakeholders externos, siendo en nuestro caso la Empresa INTERCARGA S.A. quienes por intermedio de su staff ejecutivo liderado por el C.E.O. Gonzalo Chaquinga Brito, han dado la oportunidad a muchos de nuestros estudiantes de la Carrera de Comercio Exterior a realizar sus prácticas pre profesionales que representan un factor crítico de éxito invaluable en su formación profesional, combinando los conocimientos académicos con la puesta en marcha en una empresa líder de carga aérea del sector.

De la misma manera, el Gobierno del Ecuador se compromete a aprovechar esta oportunidad para impulsar el desarrollo científico, tecnológico y económico del país, en línea con los principios establecidos en los Acuerdos Artemis, es entonces cuando la universidad debe tener un rol protagonista, promoviendo proyectos, investigaciones y soluciones inteligentes para aquellos intereses de la humanidad.

Actuando de manera responsable y alineados con los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2030 de las Naciones Unidas y el compromiso adquirido por el gobierno del Ecuador, entregamos esta obra de relevancia e impacto mundial en donde se exponen distintos temas de investigación de gran valor e interés para la comunidad científica internacional, gobiernos de todo el mundo, la empresa privada, organismos públicos y no gubernamentales, la

sociedad del conocimiento, pero principalmente para toda la humanidad.

Cabe destacar la relevancia e interés de la comunidad científica por el presente libro que como he mencionado refleja unas primeras investigaciones en Ecuador sobre esta nueva realidad de la era especial, dando además espacio a otros temas futuristas que en la actualidad la humanidad se encuentra trabajando, lo que hoy parece ciencia ficción o fantasía, mañana será nuestra realidad, y estamos dando los primeros pasos en la dirección correcta, porque al igual que la teoría de la evolución de las especies, quien no se adapta al entorno constantemente cambiante termina por desaparecer.

For educational or informational purposes

NASA content – images, audio, video, related media and files used in the rendition of 3-dimensional models, such as texture maps and polygon data in any format – generally are not subject to copyright in the United States. You may use this material for educational or informational purposes, including photo collections, textbooks, public exhibits, computer graphical simulations and Internet Web pages. This general permission extends to personal Web pages. <https://www.nasa.gov/nasa-brand-center/images-and-media/>

En un mundo donde existen muchos sabios, necesitamos más personas buenas, comprometidas con el cambio y con el rumbo del mañana. Que cada palabra y cada texto de este libro sean una inspiración para la comunidad lectora, resonando con verdad y propósito. Esta obra es una pequeña muestra de cómo, en cada estudiante, habita un mundo de conocimientos y saberes que, junto a una guía correcta, puede transformarse en los grandes liderazgos del mañana. Solo se necesita ese empujón inicial para sobresalir y desplegar las alas en los vastos campos del saber. Que futuras generaciones encuentren en estas páginas el eco auténtico de nuestro esfuerzo compartido y descubran la esperanza de que, a través de la investigación y el comercio exterior, podemos sembrar las semillas de un mundo más justo, conectado y lleno de oportunidades.

Guido Homero Poveda Burgos



CAPITULO I: Horizontes sin fronteras.
Fundamentos de una civilización sostenible
en el espacio



Docente de la Universidad de Guayaquil

Guido Homero Poveda Burgos

Estudiantes de Licenciatura en comercio Exterior

Narciza Yugla Rosado
Diego Granoble Santana
Denisse Valdiviezo Miraba
Nataly Vallejo Demera
Erick Reina Mero

1.1 Resumen

Esta investigación justifica la urgencia de establecer una civilización humana autosuficiente fuera de la Tierra, considerándolo un mecanismo de supervivencia a largo plazo y una estrategia para la resiliencia planetaria. El objeto central es identificar los pilares tecnológicos (ISRU, energía) y los marcos legales y económicos necesarios para que dicha civilización sea intrínsecamente sostenible. La metodología empleada es una revisión sistemática de literatura con enfoque crítico-analítico, priorizando fuentes primarias indexadas en Scopus y JCR de los últimos cinco años para garantizar la actualidad y validez de los datos. Los principales resultados indican que la sostenibilidad espacial depende de la madurez de la energía de fusión y de un régimen legal vinculante para la explotación de recursos. Las conclusiones más destacadas postulan que la transición es viable, requiriendo una acción coordinada que combine innovación tecnológica con un cambio de paradigma ético basado en la responsabilidad intergeneracional.

Palabras Clave: Civilización espacial, Sostenibilidad, Gobernanza espacial, ISRU, Supervivencia humana.

1.2 Introducción

El concepto de expansión humana más allá de la Tierra ha transitado de la ciencia ficción a una hoja de ruta estratégica global, impulsado por el auge del sector privado y la preocupación por la resiliencia terrestre. La economía espacial está experimentando una transformación exponencial, proyectándose que alcance los 1.8 billones de dólares para 2035, lo que marca un crecimiento significativo y sitúa al espacio como un motor clave para el desarrollo económico mundial (Foro Económico Mundial, 2024). Sin embargo, este crecimiento acelerado impone un desafío fundamental: la sostenibilidad.

La sostenibilidad se ha convertido en un requisito fundamental para preservar el acceso operativo al espacio a largo plazo, con importantes implicaciones para el bienestar de las generaciones actuales y futuras (Secure World Foundation, 2024). Ante esta realidad, organismos internacionales como la Oficina de Asuntos del Espacio Ultraterrestre de la ONU (UNOOSA) han desarrollado directrices para promover la Sostenibilidad a Largo Plazo de las Actividades en el Espacio Ultraterrestre (UNOOSA, 2021), enfocadas principalmente en el entorno orbital terrestre.

La presente investigación se diferencia al abordar la sostenibilidad no solo desde el punto de vista orbital, sino como el fundamento sistémico de una civilización espacial autosuficiente. Yo justifico la necesidad de examinar la correlación entre la inversión en I+D y el desarrollo empresarial en el sector espacial (López & Pascuini, 2024) y la creación de marcos de gobernanza que trasciendan el Derecho Espacial tradicional (ej. Tratado del Espacio Exterior de 1967).

La actual estructura legal y de gobernanza, concebida durante la Guerra Fría, es inherentemente inadecuada para gestionar la emergencia de actores comerciales, la explotación de recursos extraterrestres y la potencial colonización de cuerpos celestes. El vacío regulatorio en áreas como la minería de asteroides o el establecimiento de bases permanentes en la Luna o Marte plantea riesgos de conflictos, monopolios y daños ambientales irreversibles. Una civilización espacial autosuficiente debe ser, por definición, sostenible en el tiempo y el espacio, requiriendo un enfoque holístico que integre ciclos cerrados de vida, producción de energía in situ, y una economía circular en ambientes extra-terrestres. Esto va más allá de limpiar la órbita baja y exige una ética cósmica que guíe las acciones humanas más allá de la Tierra. Por lo tanto, el camino crítico implica desarrollar un nuevo paradigma de gobernanza que fomente la innovación tecnológica, garantice el acceso equitativo al espacio y establezca principios de administración responsable para el vasto patrimonio de la humanidad.

En esencia, este trabajo busca establecer el camino crítico para que la humanidad pueda mirar hacia horizontes sin fronteras, cimentando la futura habitabilidad cósmica en principios de equidad, eficiencia y responsabilidad.

1.3 Metodología

1.3.1 Diseño de investigación

Empleamos una Revisión Sistemática de Literatura (RSL) con un enfoque crítico-analítico, justificada por la naturaleza multidisciplinaria del tema que abarca la ingeniería, el derecho y la política. Esta metodología permite la síntesis coherente de datos heterogéneos y la identificación de vacíos críticos en la política espacial internacional, tal como se sugiere para temas emergentes (Smith, Chen, & García, 2024).

Priorizamos el uso de fuentes primarias y artículos que explicitan los contextos político-económicos en los que se insertan las investigaciones, especialmente aquellas indexadas en Scopus y Journal Citation Reports de los últimos cinco años (2021-2025). La ventaja de la RSL es su rigor y su capacidad para establecer el estado del arte y detectar tendencias y *gaps* críticos, superando los sesgos de una revisión narrativa simple (Jones & Lee, 2023).

El proceso de la RSL se estructura meticulosamente a partir de un protocolo de búsqueda riguroso. Las ecuaciones de búsqueda están diseñadas para combinar de manera efectiva términos clave como "sostenibilidad espacial", "gobernanza extraterrestre", "inversión privada I+D aeroespacial" y "marcos legales espaciales emergentes" (Smith, Chen, & García, 2024), asegurando así una cobertura exhaustiva en la intersección de las disciplinas. La selección de los documentos se lleva a cabo en dos fases metódicas: un *screening* inicial por título y resumen para descartar la literatura tangencial, seguido de una evaluación de elegibilidad de texto completo.

Los criterios de inclusión son estrictos, priorizando trabajos que aborden explícitamente la interacción dinámica entre los pilares tecnológico-económicos (inversión en I+D y desarrollo empresarial) y el marco regulatorio (derecho y política espacial post-Tratado de 1967). Esta rigurosidad metodológica es indispensable para trascender la mera descripción del estado del arte. El enfoque crítico-analítico implica que los hallazgos sintetizados serán sometidos a un *framework* de análisis sistémico. El objetivo es identificar las correlaciones,

tensiones y dependencias críticas entre la innovación tecnológica — principalmente impulsada por el sector privado— y la necesidad urgente de una gobernanza ágil y global que evite el 'tráfico' espacial. Este análisis no solo señalará los vacíos de política actual, sino que proporcionará la base empírica necesaria para la formulación de las propuestas concretas que cimenten la transición hacia la autosuficiencia cósmica. De este modo, la RSL es la herramienta fundamental para mapear la hoja de ruta estratégica del futuro más allá de la Tierra.

En esencia, este trabajo busca establecer el camino crítico para que la humanidad pueda mirar hacia horizontes sin fronteras, cimentando la futura habitabilidad cósmica en principios de equidad, eficiencia y responsabilidad.

1.4 Desarrollo

El establecimiento de una civilización sostenible en el espacio exige una articulación coherente de tres pilares fundamentales: la autosuficiencia tecnológica, la gobernanza interplanetaria legítima y una ética espacial renovada. La expansión al espacio se aborda cada vez más como un imperativo de seguridad para la continuidad humana, en lugar de ser una mera ambición tecnológica, lo cual justifica la urgencia de establecer estos fundamentos sistémicos (Newman & Johnson, 2023). La investigación profundiza en estos pilares, mostrando que la superación de las barreras no es solo técnica, sino principalmente política y ética.

Pilar 1: Autosuficiencia Tecnológica (ISRU y Energía)

La viabilidad física de los asentamientos fuera de la Tierra depende directamente de la capacidad para cerrar los ciclos de soporte vital, minimizando la dependencia de la Tierra. Examinamos el estado actual de la Utilización de Recursos In Situ (ISRU) como la estrategia crítica para reducir la masa de lanzamiento y transformar los materiales extraterrestres en agua, oxígeno y combustible. Las proyecciones indican que el éxito de ISRU podría reducir los costos de las misiones lunares y marcianas en un 60%, haciendo económicamente viable la presencia humana a largo plazo (Kovalchuk et al., 2022). Complementariamente, el desarrollo de sistemas de

energía de circuito cerrado, como la energía de fusión o los reactores de fisión compactos, son cruciales para el funcionamiento constante de los hábitats, ya que la energía solar puede ser insuficiente en entornos como la Luna durante su noche o Marte.

Pilar 2: La Gobernanza Interplanetaria y Explotación de Recursos

La transición de la exploración a la habitación permanente choca directamente con las limitaciones del Derecho Espacial Internacional vigente, particularmente el Tratado del Espacio Exterior de 1967. El principio de la no apropiación, diseñado para un mundo de exploración gubernamental, resulta inadecuado para la nueva economía extractiva impulsada por el sector privado. Se constata que la falta de un régimen legal vinculante para la minería de asteroides y la apropiación de recursos es la barrera política más significativa para la inversión a gran escala y la colonización, generando una intensa incertidumbre jurídica (Wang & Schmidt, 2024). Analizamos la necesidad de implementar un marco de gobernanza que respete el principio de "patrimonio común de la humanidad" a la vez que incentiva el riesgo y la inversión del sector privado, quizás a través de un sistema de licencias internacionales o regalías, como se ha propuesto en foros de la ONU.

Pilar 3: Economía Circular y Ética Espacial Renovada

La construcción de una civilización sostenible requiere que los asentamientos espaciales se diseñen desde el inicio con un modelo de economía circular, donde el reciclaje y la reutilización de materiales son obligatorios para compensar la escasez y los altos costos de transporte. La investigación discute cómo la sostenibilidad en el espacio debe definirse no solo por la eficiencia de los recursos, sino por la responsabilidad intergeneracional y la preservación del entorno cósmico de valor científico y cultural (Anderson & Patel, 2025). La ética espacial, por lo tanto, debe guiar las decisiones sobre la selección de sitios de aterrizaje y el alcance de las operaciones mineras, asegurando que la expansión humana no se traduzca en la replicación de las fallas ambientales y la desigualdad socioeconómica que afectan a la Tierra. Este cambio de paradigma requiere una acción coordinada que trascienda los intereses nacionales a corto plazo (López & Pascuini, 2024).

La Articulación Sistémica para la Habitabilidad Cósmica

La clave para la viabilidad a largo plazo reside en la interdependencia y alineación de estos tres pilares, forjando un único sistema resiliente. La tecnología ISRU y la energía compacta (Pilar 1) solo pueden desbloquear inversiones a gran escala si existe un marco de gobernanza legítima (Pilar 2) que garantice la seguridad jurídica de los derechos de propiedad y las operaciones. Sin embargo, cualquier marco de gobernanza debe estar intrínsecamente limitado por una ética espacial (Pilar 3) que prohíba la explotación no regulada y la contaminación irreversible, y que asegure que el acceso y los beneficios sean compartidos. Es la interacción sinérgica de estos componentes lo que define la "Sostenibilidad Cósmica" como un concepto tridimensional: Técnico-Legal-Ético. La investigación argumenta que el fracaso en abordar cualquiera de estos vértices (por ejemplo, tener tecnología sin reglas éticas) conducirá inevitablemente al colapso de la nueva civilización, tal como se ha observado en el historial de explotación de recursos terrestres. Por ello, la formulación de una Constitución Interplanetaria basada en estos principios se perfila como el resultado político deseado y necesario.

1.5 Resultados

El análisis crítico y el contraste de fuentes primarias, secundarias y legislativas revelan que la viabilidad de una civilización espacial sostenible no es un problema de ingeniería fundamental, sino de gobernanza y voluntad política.

La Incertidumbre Legal como Principal Barrera

El contraste entre la literatura de ingeniería (Kovalchuk et al., 2022) y el marco legal internacional (Choi, 2021; Wang & Schmidt, 2024) demuestra una desconexión crítica. Mientras los estudios de ISRU comprueban la factibilidad técnica de la extracción de recursos en la Luna o asteroides, la ausencia de un régimen de propiedad internacionalmente reconocido crea una incertidumbre jurídica insuperable para la inversión masiva. Los resultados indican que los intentos unilaterales de legislación nacional (como la *Commercial Space Launch Competitiveness Act* de EE. UU.) han exacerbado las tensiones, contraviniendo el espíritu del Tratado del Espacio Exterior

y disuadiendo la cooperación multilateral necesaria para la gestión de recursos que se consideran patrimonio común de la humanidad. Por lo tanto, se establece que la barrera más significativa para la colonización a gran escala es política, no tecnológica.

El Factor Crítico de la Transición Energética

Los resultados obtenidos a partir de la revisión de literatura indexada confirman que la supervivencia a largo plazo depende de la madurez de las tecnologías de circuito cerrado y, crucialmente, de una fuente de energía independiente de la radiación solar variable (Kovalchuk et al., 2022). Se contrasta la viabilidad de la energía solar y radio isotópica (fuentes limitadas y específicas) con el potencial de la energía de fusión. El análisis demuestra que solo la fusión ofrece la escalabilidad y densidad energética requerida para sostener la fabricación *in situ* y el soporte vital de una población significativa. La publicación del informe del Foro Económico Mundial (2024) subraya que esta transición energética es la condición técnica *sine qua non* para desvincular los asentamientos espaciales de los ciclos de suministro terrestres.

La Viabilidad Económica y el Riesgo de Explotación

El análisis contextualizado de las fuentes económicas (López & Pascuini, 2024) indica que la viabilidad financiera de una civilización espacial pasa por la capacidad de generar valor económico endógeno, más allá del valor científico o el prestigio. Se contrastan los modelos de negocio basados en el turismo de lujo con la extracción de materias primas raras (e.g., platino, iridio). Los resultados revelan que, si bien la extracción es potencialmente rentable, la falta de regulaciones éticas y de salvaguardias contra la replicación de la explotación terrestre representa un alto riesgo. Esto subraya la conclusión de Anderson & Patel (2025): sin una ética espacial definida y vinculante, el éxito económico de la expansión podría llevar al fracaso ético y a la destrucción de entornos prístinos.

1.6 Conclusiones

La investigación establece con claridad que la transición hacia una civilización sostenible en el espacio constituye un proyecto

multifacético cuya viabilidad reposa tanto en la innovación tecnológica como en la reforma de los paradigmas de gobernanza y ética.

Se confirma que la autosuficiencia tecnológica, basada en el desarrollo acelerado de la Utilización de Recursos In Situ (ISRU) y la implementación de sistemas de circuito cerrado biológico, emerge como la condición *sine qua non* para la resiliencia a largo plazo de cualquier asentamiento extraterrestre.

La dependencia continua de los ciclos de suministro terrestres condena las misiones a una fragilidad insostenible, lo que exige una inversión prioritaria en la investigación fundamental para la maduración de estas tecnologías (Kovalchuk et al., 2022).

Sin embargo, el factor limitante principal para esta expansión no es de ingeniería, sino legal y político. El marco normativo internacional actual, cimentado principalmente en el Tratado del Espacio Ultraterrestre de 1967, resulta obsoleto e insuficiente para gestionar la creciente economía extractiva impulsada por el sector privado.

Este vacío legal, que se manifiesta en la incertidumbre sobre los derechos de propiedad y explotación de recursos celestes, disuade la inversión a gran escala y la cooperación multilateral.

Por lo tanto, se vuelve imperativo un nuevo tratado que equilibre el principio de la libre exploración con la prevención de la apropiación nacionalista, resolviendo así la incertidumbre jurídica señalada por Wang & Schmidt (2024).

Adicionalmente, se demuestra que la infraestructura energética requerida trasciende las soluciones temporales. La inversión en I+D espacial debe reorientarse con urgencia hacia la creación de una infraestructura energética de fusión sostenible para la habitabilidad extraterrestre, siendo esta la única fuente capaz de proveer la escalabilidad y densidad energética necesaria para sostener una civilización industrial fuera de la Tierra (Foro Económico Mundial, 2024).

Finalmente, se establece que el éxito de la expansión humana debe medirse por criterios éticos y no solo económicos. La sostenibilidad

cósmica debe ser un principio ético central, promoviendo asentamientos que minimicen la huella ecológica espacial y preserven los entornos celestes de valor científico único.

Esta visión implica que la transición a una civilización espacial solo será justa y estable si se implementan mecanismos de gobernanza inclusivos que eviten la replicación de las desigualdades socioeconómicas terrestres en el nuevo ámbito cósmico, haciendo de la equidad un factor de viabilidad tan crítico como la tecnología (Anderson & Patel, 2025).



**CAPITULO II: Oportunidad comercial para el
desarrollo de elaborados a base de cacao ecuatoriano
para ser utilizado en misiones espaciales**



Docente de la Universidad de Guayaquil

Guido Homero Poveda Burgos

Estudiantes de Licenciatura en comercio Exterior

Bella Sayay Quishpi

María Chávez Rodríguez

Danna Herrera Tumbaco

Emily Reinoso Baque

2.1. Resumen

La oportunidad radica en transformar el cacao fino de aroma de Ecuador en un alimento funcional de ultra larga duración, certificado para misiones espaciales. Este proyecto de innovación aprovecha la calidad superior del cacao como contramedida nutricional para mitigar el estrés oxidativo y la pérdida ósea en astronautas. El desarrollo exige una rigurosa investigación y desarrollo en tecnología alimentaria para crear formatos de cero migajas con vida útil superior a cinco años. Esto incluye liofilización avanzada, microencapsulación de sabor y empaque barrera. El éxito depende de la trazabilidad forense, desde la finca hasta el empaque, para garantizar la pureza absoluta y bajos niveles de contaminantes. La certificación de vuelo genera un prestigio inigualable, permitiendo la explotación de mercados spin-off terrestres de ultra lujo y nutrición deportiva, donde el sello espacial es la máxima validación de seguridad y rendimiento.

Palabras Clave: Tecnología Alimentaria, Innovación, Investigación y Desarrollo, Cacao, Trazabilidad.

2.2. Metodología

2.2.1. *Diseño de Investigación*

El diseño de investigación y desarrollo empleado para evaluar la viabilidad de los elaborados de cacao ecuatoriano para el sector aeroespacial se fundamenta en la priorización estricta de fuentes primarias y literatura científica de alto impacto.

Se ha privilegiado la consulta de artículos especializados y reportes técnicos de agencias espaciales y organismos regulatorios para establecer los requisitos operacionales y de seguridad alimentaria, que son cruciales para un producto de esta naturaleza. Esta metodología asegura que la información sobre estabilidad, trazabilidad y límites de

contaminantes sea lo más precisa y actualizada posible, reflejando el estado del arte en tecnología alimentaria para entornos extremos.

Se ha puesto especial énfasis en la selección de artículos de investigación y desarrollo que no solo reportan hallazgos empíricos, sino que también emplean sus propias fuentes primarias y justifican rigurosamente sus metodologías.

Esta práctica evita la acumulación de sesgos de fuentes secundarias o terciarias, garantizando que el análisis de la innovación en microencapsulación y deshidratación sea robusto. La metodología de estudio se justifica plenamente al requerir datos de rendimiento específicos del cacao bajo estrés, información que solo se puede obtener de reportes de simulación o estudios químicos primarios y verificables.

La justificación de la metodología se refuerza al considerar los contextos político-económicos en los que se inserta la investigación y desarrollo de alimentos espaciales. Esto incluye el análisis de los marcos regulatorios internacionales para la trazabilidad de alimentos de origen, las políticas de adquisición de las agencias espaciales y las tendencias de innovación en el sector nutracéutico global. Comprender estos contextos es vital para diseñar una estrategia comercial y de certificación que sea viable y que mitigue riesgos regulatorios asociados a la pureza del cacao ecuatoriano.

La elección de priorizar artículos que emplean fuentes primarias sobre el cacao asegura la validez de las afirmaciones funcionales, especialmente aquellas relacionadas con la optimización antioxidante y la retención de flavanoles pos procesamiento. Se buscan ensayos que demuestren la biodisponibilidad de estos compuestos bajo alteraciones fisiológicas como la microgravedad, lo cual requiere investigación y desarrollo clínica o simulada. La justificación es que un producto espacial debe ser médicamente eficaz, no solo teóricamente funcional, y esto solo se comprueba con datos empíricos de alto nivel.

La metodología de estudio se basa en un enfoque de revisión sistemática cualitativa, donde los datos de rendimiento técnico se extraen directamente de la literatura primaria y se comparan con las

especificaciones de diseño aeroespacial. La justificación de este enfoque es su capacidad para sintetizar requisitos técnicos complejos y dispersos en un marco de tecnología alimentaria coherente y aplicable a la innovación del producto de cacao. Se priorizan estudios que definen nuevos límites de seguridad.

La metodología empleada incluye la modelización de riesgos, cuyas entradas son datos primarios obtenidos de pruebas de materiales aeroespaciales. La justificación es que la seguridad operacional en el espacio es la principal limitación del diseño, y solo la investigación y desarrollo basada en la simulación precisa de estos riesgos puede validar el formato final del cacao. La trazabilidad de estos datos de riesgo es esencial para la credibilidad del proyecto.

La justificación de la metodología reside en la necesidad de demostrar que la tecnología alimentaria propuesta presenta claras ventajas sobre métodos convencionales de conservación. Se requieren artículos primarios que comparen las cinéticas de deterioro y la retención de sabor del cacao bajo diferentes técnicas, probando que la innovación seleccionada ofrece la mayor vida útil y el menor riesgo de falla en el espacio. Este enfoque comparativo y justificativo asegura que las decisiones de investigación y desarrollo sean las óptimas técnicamente.

Oportunidad Comercial: Elaborados de Cacao Ecuatoriano para Misiones Espaciales

Origen, Calidad y Posicionamiento Global del Cacao Fino de Aroma

El cacao nacional fino y de aroma de Ecuador se erige como un patrimonio agrícola invaluable, gozando de un prestigio histórico y una distinción genética que lo consolidan como líder indiscutible en el mercado mundial de productos premium de chocolate. Esta excelencia, intrínsecamente ligada a sus complejos perfiles aromáticos que incluyen marcadas notas florales, afrutadas y especiadas, es el fundamento inmutable de esta audaz oportunidad comercial de muy alto valor agregado y de base tecnológica. El principal objetivo estratégico es apalancar esta calidad excepcional, transformándola en un producto de tecnología alimentaria diseñado para satisfacer los

estándares de rendimiento y seguridad más rigurosos, exigidos en los entornos más hostiles fuera de la Tierra, lo cual redefine la percepción global del producto ecuatoriano (Gómez y Vargas, 2023).

La estrategia fundamental es la evolución industrial, buscando migrar decisivamente de la simple exportación de materia prima sin procesar a la generación de know-how tecnológico y alimentos funcionales con un sello de innovación científica verificable y patentable a nivel internacional.

Este cambio de paradigma no solo está proyectado para generar un aumento sustancial en los márgenes de beneficio unitarios por kilogramo de cacao, sino que, de forma más amplia, reposiciona al cacao ecuatoriano en el imaginario colectivo como un producto ligado a la vanguardia tecnológica y a la exploración espacial, un logro de marketing sin igual. Este reposicionamiento estratégico es crucial para asegurar una competitividad resiliente y sostenible a largo plazo en los mercados internacionales de consumo de lujo y alta especialización, trascendiendo las limitaciones históricas del mercado.

La superioridad sensorial intrínseca del cacao arriba es un activo que debe ser explotado estratégicamente por sus profundos efectos psicológicos y emocionales en la tripulación de las naves espaciales y hábitats orbitales. En el entorno de alto estrés, confinamiento y monotonía dietética de una misión espacial de larga duración, la calidad del sabor y el confort emocional que proporciona un alimento de origen y prestigio son factores críticos para la salud mental y para el mantenimiento sostenido de la moral de los astronautas a lo largo de los meses o incluso años de la misión. Este valor hedonístico complementa su valor funcional, creando un producto de demanda dual altamente deseable por los equipos de soporte de la misión y los planificadores de menús (Lee y Chen, 2022).

El enfoque en las misiones espaciales tripuladas se justifica plenamente debido a que este nicho, aunque maneja un volumen logístico limitado, impone los requisitos de estabilidad, seguridad, y funcionalidad biológica más rigurosos del mundo, conocidos como estándares de grado aeroespacial. Superar exitosamente estas barreras técnicas de entrada confiere al producto un sello de validación tecnológica de prestigio incalculable, que es esencialmente

transferible y puede ser explotado comercialmente en todos los mercados terrestres de élite. La inversión inicial en investigación y desarrollo se justifica, por tanto, por este inmenso retorno estratégico y por la creación de propiedad intelectual derivada en procesos de estabilización y empaque (NASA, 2025).

La capacidad inherente de Ecuador para ejercer un control riguroso sobre la calidad de su Cacao desde la semilla y a lo largo de los procesos primarios de fermentación y secado ofrece una ventaja crucial en la trazabilidad de origen, un requisito fundamental e innegociable para los estrictos protocolos de seguridad alimentaria aeroespacial. Esta gestión vertical de la cadena de valor, que garantiza la pureza, la ausencia de contaminantes y el origen verificable del fino de aroma, es indispensable para obtener la certificación de sistemas críticos de suministro, diferenciando al producto ecuatoriano de los genéricos de menor control de calidad. La trazabilidad completa debe incluir incluso análisis de suelos georreferenciados.

El creciente interés de las agencias espaciales por integrar "alimentos de origen" y productos étnicos en los menús de vuelo busca activamente diversificar la dieta de los astronautas, con el fin de mitigar la fatiga sensorial y mejorar el bienestar psicológico en el confinamiento, reconociendo el impacto de la comida en la moral. Esta propuesta, al ser simultáneamente una solución de tecnología alimentaria avanzada y una opción de valor cultural, se presenta como una alternativa altamente atractiva para los planificadores de menús, que luchan por mantener la ingesta calórica de la tripulación. Su inclusión no solo alimenta el cuerpo físico, sino que también nutre el espíritu de conexión de la tripulación con la vida y la cultura en la Tierra (ESA, 2023).

El cacao posee una rica historia cultural e identitaria en Ecuador, y llevar este legado al espacio añade una dimensión simbólica y narrativa poderosamente emotiva al proyecto comercial. Este componente intangible se traduce en una ventaja de marketing única que resuena profundamente con el público global, permitiendo a la marca país capitalizar la fascinación humana por la ciencia y la exploración. Este factor narrativo es crucial para la explotación posterior en mercados spin-off terrestres de alta gama, donde la historia del producto aumenta significativamente su valor percibido.

La viabilidad del proyecto depende de la alineación de múltiples stakeholders nacionales, incluyendo productores, universidades, laboratorios de control de calidad y entidades de promoción de exportaciones. La complejidad de los requisitos obliga a una colaboración sin precedentes, donde el fracaso de un eslabón compromete la certificación. La inversión en capacidad analítica y en procesos de producción de tecnología alimentaria debe ser vista como una inversión en la infraestructura de innovación nacional, generando beneficios a largo plazo que superan los costos iniciales.

La capacidad de demostrar la retención y biodisponibilidad de los compuestos bioactivos del cacao después de varios años de almacenamiento en condiciones simuladas de espacio es un desafío científico y tecnológico de gran calibre que, una vez resuelto, genera una propiedad intelectual de inmenso valor comercial. Esto requiere pruebas de estabilidad exhaustivas que validen la integridad molecular bajo radiación y ciclos térmicos, un área central de la investigación y desarrollo aeroespacial. El cacao fino de aroma se distingue por su menor acidez y su mayor contenido de manteca de cacao en comparación con otras variedades, características que deben ser preservadas en el producto final. La formulación debe utilizar esta manteca para crear una matriz estable que evite el fat bloom y la degradación sensorial a lo largo de los años en almacenamiento, un reto crucial para la estabilidad del chocolate espacial (Mendoza y Pérez, 2024).

El cumplimiento de los estándares de calidad espacial actúa como un filtro de excelencia, obligando a toda la cadena de suministro, desde el cultivo hasta el empaque, a operar bajo un régimen de "cero defectos" y estricta trazabilidad. Este nivel de rigor mejora la calidad general del cacao ecuatoriano exportado, proporcionando una ventaja competitiva duradera en los mercados más exigentes de Europa, Asia y Norteamérica. La certificación de vuelo espacial puede ser utilizada como una "prueba de concepto" definitiva para otros alimentos funcionales ecuatorianos, demostrando que el país tiene la capacidad tecnológica y el know-how para procesar materias primas sensibles bajo los protocolos de seguridad más estrictos, abriendo nuevas vías de exportación de productos de valor agregado y tecnología alimentaria.

El posicionamiento del cacao en el espacio refuerza la narrativa de la "biodiversidad funcional" de Ecuador, destacando que los productos agrícolas del país no solo son de alta calidad estética y sensorial, sino que poseen propiedades biológicas activas que son relevantes para desafíos de salud de la era moderna, como la radio protección, impulsando la innovación agrícola. La oportunidad de mercado, aunque no masiva, es anticíclica respecto a las fluctuaciones de precios del cacao, ya que el valor se basa en la tecnología alimentaria y la certificación, no en el volumen de producción. Esto proporciona una fuente de ingresos estable y de alto margen para los participantes del consorcio. La estructuración de este proyecto atrae la atención de inversionistas de capital de riesgo especializados en deep tech y biotecnología, que buscan proyectos con potencial disruptivo y barreras de entrada técnicas insuperables, algo que la certificación aeroespacial garantiza plenamente y valida la investigación y desarrollo aplicada.

Justificación Nutricional y Diseño Funcional

El ámbito de este proyecto se centra rigurosamente en la creación de un producto que funcione como un suplemento dietético concentrado o alimento médico-nutricional, apartándose por completo de la categoría de simple golosina o snack recreacional de bajo impacto. Esto impone el requisito estricto de que la formulación, asistida por tecnología alimentaria, entregue una dosis precisa y programada de calorías y micronutrientes esenciales, concentrándose en aquellos cuyo equilibrio fisiológico se ve más comprometido en el espacio, como el magnesio, el calcio y la vitamina D.

El cacao es una fuente natural y altamente concentrada de compuestos bioactivos, específicamente polifenoles y flavanoles, que poseen propiedades antioxidantes y antiinflamatorias científicamente verificadas, relevantes para la salud humana. Estos compuestos son de gran valor para la medicina espacial, ya que pueden actuar eficazmente como contramedidas nutricionales para mitigar el estrés oxidativo inducido por la constante exposición a la radiación cósmica y los profundos cambios metabólicos generados por la microgravedad, actuando como neuro protectores.

La optimización antioxidante es un enfoque clave del diseño de la formulación, resultado directo de la investigación y desarrollo continua. El proyecto debe enfocarse en la preservación, protección y máxima biodisponibilidad de los flavanoles del cacao a lo largo de los años de almacenamiento. Estos compuestos son esenciales para mitigar el daño por radicales libres generado por la radiación cósmica y el alto estrés metabólico, actuando como una dosis funcional programada que apoya la salud celular y la función cognitiva de la tripulación. El producto debe contrarrestar estos efectos de deterioro molecular. El producto debe diseñarse para el soporte metabólico y la alta densidad calórica. El entorno de microgravedad conduce a la pérdida de masa ósea y atrofia muscular, por lo que el cacao puede ser fortificado con calcio y vitamina d altamente biodisponibles, además de proteínas de alta calidad que ayuden a mantener la masa muscular magra. La formulación debe ser altamente concentrada para optimizar el inventario de la nave y minimizar el peso de lanzamiento (ESA, 2023).

La formulación puede buscar la sinergia molecular con otros antioxidantes conocidos o vitaminas (como la vitamina e o la c) que se sabe que trabajan de forma complementaria con los polifenoles del cacao, creando un compuesto protector más robusto contra el estrés oxidativo y la inflamación crónica. Esto requiere pruebas de estabilidad exhaustivas que garanticen que estas moléculas activas no se degraden durante los años de almacenamiento espacial, un reto químico y físico considerable que demanda investigación y desarrollo de precisión.

La necesidad de alcanzar la máxima pureza obliga a establecer nuevos estándares de control de calidad en la adquisición de materias primas, incluyendo análisis de trazas químicas y metales pesados que superan los requisitos de la normativa internacional actual. La gestión del riesgo del cadmio, en particular, es un desafío de trazabilidad y procesamiento que debe ser resuelto con tecnología alimentaria avanzada, siendo un punto de control crítico para la certificación.

El cacao, con su complejidad de sabor inherente al fino de aroma, puede ayudar a combatir la monotonía dietética, un problema conocido por reducir el apetito y la ingesta calórica de los astronautas, comprometiendo su salud. Su perfil sensorial superior complementa

la funcionalidad, asegurando que el alimento sea consumido consistentemente, lo cual es vital para la salud de la misión, ya que el alimento más nutritivo es aquel que realmente se come y disfruta.

El diseño funcional debe integrar la facilidad de consumo en microgravedad, lo que implica que el producto debe tener una textura que no requiera esfuerzo excesivo para ser masticada o ingerida, y que se adhiera de forma segura al empaque. La ingeniería debe considerar la tensión superficial y la dinámica de fluidos en gravedad cero para evitar cualquier desprendimiento o vuelo de partículas líquidas o semisólidas, un requisito crucial de la tecnología alimentaria espacial. La inclusión de lípidos funcionales puede ser vehículo para nutrientes liposolubles y proporcionar una fuente de energía de alta eficiencia para la tripulación, especialmente en misiones de larga duración donde la eficiencia metabólica es crítica. Estos lípidos deben ser estabilizados contra la oxidación mediante técnicas de microencapsulación avanzada, una muestra de innovación en el procesamiento (Chen y Liu, 2021).

El producto debe tener una densidad microbiológica nula para garantizar la seguridad durante años sin refrigeración, lo que exige métodos de esterilización final que no comprometan la integridad de los nutrientes ni el sabor distintivo del cacao. La formulación debe ser baja en sal y moderada en fibra dietética, ya que las dietas espaciales están cuidadosamente controladas para evitar problemas gastrointestinales que podrían ser amplificadas por el estrés y la microgravedad. El balance osmótico es una consideración de salud crítica, validada por extensas pruebas de investigación y desarrollo. El envase debe indicar claramente la composición nutricional con una precisión extrema, ya que la dieta de los astronautas se monitorea y ajusta diariamente para garantizar el equilibrio de micronutrientes y macronutrientes esenciales. La certificación requiere esta transparencia total, dependiente de la trazabilidad de cada componente (Sánchez, 2024).

El potencial del cacao para mejorar la circulación y la función endotelial a través de sus flavanoles es un beneficio médico crucial, ya que la microgravedad altera la dinámica cardiovascular, un problema que el producto puede ayudar a mitigar de forma no farmacológica, confirmando la necesidad de esta innovación

nutricional. El diseño del producto debe ser compatible con los métodos de rehidratación o calentamiento disponibles a bordo de la nave, minimizando el tiempo y el equipo necesario para su consumo. Esto requiere una fase de investigación y desarrollo de integración con los sistemas de soporte vital. La formulación de cacao debe ser adaptada para compensar la alteración del sentido del gusto y el olfato que experimentan los astronautas en el espacio, a menudo requiriendo sabores más intensos o específicos para ser plenamente percibidos, un desafío de tecnología alimentaria.

Ingeniería de Producto y Restricciones Operacionales Críticas Diseño de Formato y Estabilidad Extrema para Microgravedad

El producto final debe ser concebido bajo los principios de la ingeniería aeroespacial como un alimento de alto rendimiento, diseñado para ser consumido con total seguridad y eficiencia en un entorno de gravedad cero. Esto significa que debe tener una cohesión estructural absoluta para eliminar cualquier riesgo de cero migajas que contamine la instrumentación de la cabina o sea inhalado por la tripulación. La funcionalidad operativa es la ley suprema del diseño, superando cualquier estética o conveniencia terrestre, resultado de la aplicación de tecnología alimentaria avanzada.

La vida útil es la restricción más crítica para la logística espacial, exigiendo que los alimentos sean seguros y apetecibles por más de cinco años. Esto requiere que el elaborado de cacao alcance una actividad acuosa menor a \$0.30, lograda mediante procesos de deshidratación avanzados, lo que inhibe eficazmente la actividad microbiana, enzimática y química. La estabilidad molecular debe ser garantizada en el tiempo y bajo estrés, incluso después de los procedimientos de esterilización, demandando investigación y desarrollo constante. Para garantizar la estabilidad excepcional, se debe combinar un procesamiento avanzado con un empaque barrera superior que impida la reabsorción de humedad y la entrada de oxígeno. El empaque actúa como la primera línea de defensa molecular y debe ser diseñado para soportar la radiación y las fuerzas G. La integridad del sello debe ser comprobada rigurosamente, siendo un reto de innovación en materiales. El enfoque debe priorizar formatos que aseguren la cohesión estructural absoluta, tales como geles densos, pastas semisólidas dosificables por extrusión o barras

altamente comprimidas sin porosidad. La formulación debe ser diseñada para evitar cualquier desmoronamiento o desprendimiento de partículas al ser manipulada, incluso si se somete a fuerza externa, asegurando la seguridad en microgravedad (Lee y Chen, 2022).

El producto debe demostrar su estabilidad no solo en condiciones ambientales controladas en la tierra, sino también después de ser sometido a los protocolos de esterilización de la nave, como la irradiación con rayos gamma, asegurando que no se generen subproductos tóxicos ni se degrade su calidad nutricional esencial.

Las pruebas deben validar la integridad post-esterilización de todos los componentes activos, dependiente de la trazabilidad del lote. El uso de la liofilización es esencial para crear polvos base de cacao con una vida útil extremadamente larga, ya que esta técnica remueve casi toda el agua bajo vacío y a baja temperatura, preservando el perfil nutricional y la estructura aromática del cacao fino de aroma. La retención de compuestos volátiles es crucial para la aceptabilidad sensorial a largo plazo, siendo un pilar de la tecnología alimentaria (Mendoza y Pérez, 2024).

La microencapsulación de los compuestos volátiles del sabor o de las grasas sensibles es una técnica clave para evitar la oxidación y la degradación del gusto a lo largo de los años. Esto asegura que, después de cinco años en el espacio, el cacao aún conserve el sabor fresco y complejo del arriba, un requisito fundamental para la moral de la tripulación y la prevención de la fatiga del menú. Para los formatos sólidos, se requiere la extrusión o compresión de alta presión para fusionar los ingredientes en una matriz densa y cohesiva que no se desmorone. Esta tecnología garantiza el requisito de cero migajas y la máxima densidad nutricional en un formato compacto y seguro para la cabina. La selección de ligantes alimentarios debe ser minuciosa, evidenciando investigación y desarrollo avanzado (Sánchez, 2024).

La formulación debe ser diseñada para minimizar la presencia de ingredientes propensos a la reacción de Maillard o a la migración de grasa, que comprometerían la aceptabilidad sensorial y visual del producto a largo plazo. Se requiere ingeniería molecular y un control estricto de la proporción de lípidos, un área activa de innovación en la industria chocolatera (Gómez y Vargas, 2023).

El diseño del producto debe ser inodoro o tener un olor controlado, ya que los olores fuertes pueden ser molestos en el ambiente cerrado y recirculado de la cabina espacial. La volatilidad de los compuestos aromáticos debe ser minimizada, excepto en el momento preciso de consumo, otro desafío de tecnología alimentaria. Se debe considerar el impacto de la radiación ionizante en las grasas y proteínas del cacao.

Las formulaciones deben incluir agentes protectores o estabilizadores para mitigar la formación de radicales libres y la rancidez inducida por la radiación cósmica, una necesidad crítica justificada por la investigación y desarrollo aeroespacial. La textura final del producto debe ser consistente y predecible, independientemente de los cambios de temperatura que pueda experimentar durante su almacenamiento a bordo de la nave. La criopreservación en ciertas secciones de la ISS es una posibilidad, cuya estabilidad debe ser verificada mediante trazabilidad térmica. El uso de aditivos debe ser minimizado y justificado por la estabilidad o seguridad. Las agencias espaciales prefieren alimentos con listas de ingredientes cortas y naturales, favoreciendo la pureza del cacao fino de aroma, lo cual es un reflejo de los avances en tecnología alimentaria limpia.

La fase de I+D debe incluir el desarrollo de un indicador de frescura o degradación integrado en el empaque o en el producto, que permita a la tripulación verificar rápidamente la integridad del alimento antes de consumirlo. Esta es una innovación en seguridad alimentaria a bordo. La ingeniería debe asegurar que el producto sea capaz de soportar las fuerzas G extremas durante las fases de lanzamiento y reentrada sin sufrir daños estructurales o migración interna de sus componentes, un requisito verificado por investigación y desarrollo en simulación.

Empaque y Seguridad Operacional

El empaque para el cacao espacial es en sí mismo un componente de ingeniería crítica para la misión, no un simple contenedor. Debe ser extremadamente liviano para reducir el peso de lanzamiento, pero robusto, capaz de soportar las fuerzas G del despegue y las variaciones de presión orbital sin fallar o comprometer su hermeticidad, un fallo que podría ser catastrófico para el inventario. Su función primordial es ser una barrera total e inquebrantable contra el oxígeno y el vapor

de agua, lo que se logra mediante el uso de laminados multicapa que incluyen barreras metálicas de aluminio y polímeros de alta resistencia para garantizar la hermeticidad a largo plazo. El material debe ser biocompatible, inerte y no reactivo con el alimento, siendo un foco de innovación en ciencia de materiales. El empaque debe ser compatible con los métodos de esterilización sin que sus materiales lixivien compuestos tóxicos al alimento, lo cual es vigilado rigurosamente mediante pruebas toxicológicas específicas de lixiviación de materiales bajo condiciones de estrés. Los estándares son mucho más altos que para el consumo terrestre (ESA, 2023).

Los códigos de barras, la información de lote y la identificación del producto deben ser resistentes a la abrasión y legibles bajo las diferentes condiciones de iluminación de la nave espacial, lo cual es esencial para el manejo eficiente del inventario y la trazabilidad por parte de la tripulación. Se requiere el uso de tintas y etiquetas especializadas. El empaque debe ser resistente a la punción y al desgaste causado por la manipulación constante en un entorno donde los objetos flotan y pueden impactar, asegurando la integridad del sello y del producto a largo plazo, sin que el envase se rompa y genere residuos. La durabilidad física es tan importante como la química. La ergonomía del empaque debe permitir su fácil apertura y sellado con las manos enguantadas o en condiciones de visibilidad limitada, minimizando el tiempo de manipulación y el riesgo de errores operativos. La interfaz de consumo debe ser intuitiva y a prueba de fallos, mejorada mediante investigación y desarrollo ergonómico (NASA, 2025).

La tecnología de empaque también debe permitir la compresión o compactación eficiente del envase vacío, facilitando la gestión de residuos a bordo de la nave, un factor clave en la logística espacial donde el espacio de almacenamiento es extremadamente limitado. El empaque debe ser diseñado para minimizar el volumen total del alimento, utilizando formas geométricas que se encajen eficientemente en los compartimentos de almacenamiento de la nave.

La optimización del espacio es una prioridad de ingeniería logística, demostrando la eficiencia de la tecnología alimentaria. Se debe considerar el impacto del empaque en el medio ambiente cerrado de la nave. El material no debe liberar gases volátiles ni olores fuertes

que puedan afectar la calidad del aire recirculado o molestar a otros miembros de la tripulación. El sistema de rehidratación debe estar integrado al empaque si se opta por un producto liofilizado, garantizando que el agua caliente se inyecte y se mezcle completamente con el polvo de cacao sin que se escape ninguna partícula o líquido.

El color y el diseño del empaque pueden influir en la psicología del astronauta, por lo que, aunque funcional, el diseño debe ser agradable y transmitir una sensación de familiaridad o calidad premium para aumentar la aceptabilidad. La resistencia al vacío es una prueba de ingeniería crítica. El empaque debe mantener su integridad estructural incluso si se expone accidentalmente a las condiciones de vacío del espacio o de las esclusas de aire, un requisito de seguridad extrema. El empaque debe tener un sistema de etiquetado que indique la fecha de fabricación, el lote y la fecha de expiración de una manera que resista la manipulación, la radiación y las variaciones térmicas durante años, manteniendo la trazabilidad inalterada (Mendoza y Pérez, 2024).

La elección del material de barrera debe tener en cuenta la necesidad de minimizar la formación de condensación en la superficie externa del empaque, ya que el agua flotante es un riesgo operativo en microgravedad. La durabilidad debe incluir la resistencia a la abrasión durante el almacenamiento y el transporte, ya que el movimiento constante puede comprometer la integridad de los sellos.

Proceso de Certificación, Pruebas y Aceptación de la Tripulación

Estructura de Investigación, Desarrollo y Pruebas

El proceso de desarrollo debe ser gestionado bajo la estricta disciplina de un programa aeroespacial, con fases rigurosamente definidas y puntos de decisión que controlen el avance tecnológico y financiero del proyecto. La fase 1 se centra en la formulación de prototipos y la realización de pruebas de estabilidad acelerada, mientras que la fase 3 es la crítica calificación espacial simulada, donde el prototipo pasa a un entorno que imita las condiciones de vuelo, todo bajo una rigurosa investigación y desarrollo.

La fase 1 se centraría en la formulación de al menos tres prototipos funcionales y la realización de pruebas de estabilidad acelerada para

estimar su vida útil. Esta fase requiere inversión en análisis químicos y microbiológicos avanzados. La caracterización fisicoquímica de los prototipos debe ser exhaustiva para predecir su comportamiento a largo plazo. La fase 2 implicaría la optimización del proceso de manufactura para garantizar la repetibilidad y la consistencia del lote piloto. Es crucial en esta etapa realizar las primeras pruebas de ingeniería de empaque, incluyendo resistencia a la punción, sellado hermético y compatibilidad con los sistemas de rehidratación de la nave, ajustando el proceso hasta alcanzar la perfección, un hito de tecnología alimentaria. La fase 3 es la crítica calificación espacial simulada, donde el prototipo pasa a un entorno que imita las condiciones de vuelo: exposición a vacío, radiación simulada y ciclos térmicos extremos. Esta fase genera los datos de seguridad irrefutables presentados a las agencias, siendo la evidencia científica el único criterio válido para la aprobación de vuelo, demostrando innovación en la validación.

Se requiere la colaboración de centros de investigación internacionales especializados en medicina y alimentación espacial, ya que estos poseen el know-how específico y el equipo para realizar estas pruebas de simulación, que no suelen estar disponibles a nivel nacional. La transferencia de conocimiento es un beneficio colateral invaluable para la ciencia ecuatoriana, un logro de investigación y desarrollo internacional (Sánchez, 2024).

El protocolo de I+D debe seguir el sistema de análisis de peligros y puntos críticos de control con un nivel de rigor aeroespacial, documentando cada paso del proceso desde la adquisición de la materia prima hasta el sellado final del empaque. La trazabilidad debe ser total y auditable, un requisito de seguridad fundamental. La inversión en la fase 1 debe incluir la modelización predictiva de la vida útil utilizando cinéticas de deterioro y factores de estrés para estimar de forma conservadora la fecha de expiración del producto bajo condiciones espaciales reales. Esto requiere investigación y desarrollo en modelado predictivo. La validación de la estabilidad debe incluir pruebas de rancidez oxidativa específicas para la manteca de cacao, que es propensa a la degradación por radicales libres. Se deben utilizar métodos como el análisis de peróxidos y aldehídos volátiles. El proceso de desarrollo debe involucrar a nutricionistas espaciales desde el inicio, para asegurar que la formulación del cacao

cumpla con las cuotas diarias de micronutrientes y se integre adecuadamente en la dieta rotacional de la tripulación.

Las pruebas de toxicología son obligatorias. El producto debe ser sometido a ensayos para asegurar la ausencia de cualquier sustancia que pueda ser tóxica o alergénica en el ambiente cerrado y recirculado de la nave espacial, un entorno donde las reacciones adversas son amplificadas. La gestión de la propiedad intelectual es clave. Cada nueva formulación, método de estabilización o diseño de empaque debe ser protegido mediante patentes antes de la publicación o presentación a las agencias, un pilar de la innovación. La simulación de vibración y choque durante el lanzamiento es parte de la fase 2. El producto envasado debe ser capaz de soportar las extremas fuerzas g y la vibración acústica sin que la estructura del alimento se rompa o el empaque falle (ESA, 2023).

La colaboración con la academia local es fundamental para las pruebas de biodisponibilidad, asegurando que los nutrientes y flavanoles del cacao no solo estén presentes, sino que sean efectivamente absorbibles por el cuerpo humano bajo las alteraciones fisiológicas de la microgravedad. El desarrollo debe incluir un plan de control de calidad para la producción en masa limitada que garantice que el producto final cumple con las especificaciones de la muestra calificada. El equipo de I+D debe estar familiarizado con las especificaciones de formato de datos y documentación de las agencias espaciales, que a menudo requieren reportes técnicos en formatos específicos y altamente detallados, asegurando la trazabilidad documental (Gómez y Vargas, 2023).

Requisitos de Aceptación y Certificación Final

La inclusión en el menú de vuelo es un proceso de dos niveles que deben superarse secuencialmente: seguridad absoluta y aceptación sensorial. El producto debe pasar las pruebas de seguridad microbiológica y toxicología más estrictas del mundo, garantizando la estabilidad total y la ausencia de compuestos que puedan lixiviar desde el empaque bajo las condiciones de temperatura y radiación. Las pruebas de toxicología deben incluir el análisis de cualquier compuesto que pueda lixiviar desde el empaque hacia el alimento bajo las condiciones de temperatura y radiación. En el ambiente cerrado de

la nave, cualquier toxina liberada representa un riesgo amplificado para la tripulación, lo que obliga a estándares de pureza del material de empaque excepcionales, verificados por la trazabilidad. El proceso requiere la presentación de un historial de pruebas que garantice la ausencia total de cualquier patógeno, toxina o contaminante químico por encima de los límites regulatorios aeroespaciales. Estos límites son significativamente más estrictos que cualquier límite comercial convencional conocido, reflejando el entorno de alto riesgo y la tecnología alimentaria aplicada.

La aceptación sensorial es, sorprendentemente, crucial para la certificación final. El producto debe ser sometido a pruebas sensoriales formales en los laboratorios de alimentos de las agencias. Un puntaje alto asegura que el astronauta consumirá el alimento funcional según lo programado, previniendo el riesgo de desnutrición por fatiga del menú, un éxito de innovación. El cacao ecuatoriano tiene una ventaja inherente en esta etapa debido a su perfil de sabor superior, que puede actuar como un alimento de confort y un interruptor en la monotonía dietética. Esto se traduce en una mayor probabilidad de consumo regular y, por lo tanto, en una mayor eficacia de la contramedida nutricional (Gómez y Vargas, 2023).

La formulación debe equilibrar la funcionalidad con el placer sensorial, asegurando que el producto sea consumido regularmente. Esto garantiza la ingesta nutricional crítica y el mantenimiento de la moral de la tripulación a lo largo de los meses o años de la misión, un área de investigación y desarrollo. La aprobación final solo se otorga después de que el producto ha pasado todas las pruebas de seguridad, estabilidad y toxicología, y ha demostrado una alta calificación de aceptabilidad por parte del panel de astronautas. La evaluación de la aceptabilidad incluye la prueba del producto en diferentes estados para simular las condiciones de consumo a bordo. La versatilidad del sabor del cacao es una ventaja.

El proceso de calificación también evalúa la facilidad de preparación del alimento. Si el producto requiere pasos complejos o mucho tiempo, es menos probable que sea seleccionado por la tripulación. La certificación puede comenzar con misiones cortas o vuelos de prueba, antes de ser aprobado para misiones de larga duración como la ISS o

futuros viajes a marte. Este enfoque gradual minimiza el riesgo, apoyado por la investigación y desarrollo continua (Chen y Liu, 2021).

Los astronautas que prueban el producto a menudo llenan cuestionarios detallados sobre la textura, el aroma, el regusto y la sensación general de saciedad, proporcionando datos cualitativos vitales para el ajuste final de la fórmula. La agencia espacial puede solicitar ajustes menores a la formulación o al empaque incluso después de las pruebas finales, lo que requiere que el equipo de producción tenga flexibilidad y capacidad de respuesta rápida. La certificación es un proceso de confianza tecnológica. La agencia no solo aprueba el producto, sino que también valida la capacidad de la empresa ecuatoriana para mantener los estándares durante la duración del contrato, un reflejo de su trazabilidad operativa. El cacao fino de aroma debe mantener su identidad de sabor única, pero sin ser tan dominante que sature el paladar de la tripulación durante el consumo repetido a lo largo de los meses. El proceso de certificación incluye la revisión de todos los proveedores de ingredientes secundarios, asegurando que también cumplan con los estándares de pureza aeroespacial, lo que exige tecnología alimentaria de alto nivel (Sánchez, 2024).

Impacto Económico, Propiedad Intelectual y Spin-Off Terrestres

Valoración del Prestigio y Explotación Comercial Derivada

El desarrollo de un elaborado de cacao certificado para vuelo espacial confiere un nivel de prestigio tecnológico y seguridad inigualable a la marca país. Esta certificación se convierte en un activo de marketing global de alto valor, validando el producto como el epítome de la pureza, la funcionalidad avanzada y el control de calidad riguroso, una innovación en posicionamiento. La propuesta de valor para los mercados terrestres de élite es clara e irrefutable: un producto que ha cumplido con los estándares de seguridad de la nasa o la esa es, intrínsecamente, superior a cualquier producto alimenticio comercial. Esto permite posicionar el cacao ecuatoriano en el segmento de ultra lujo y justificar precios significativamente más altos que los de sus competidores, demostrando la eficacia de la investigación y desarrollo.

Este logro actúa como un acelerador de marca país, proyectando la imagen de Ecuador no solo como un productor de excelencia agrícola, sino como un centro de innovación científica en la agroindustria. Este salto transforma la percepción económica nacional, atrayendo inversiones y talento especializado, basado en la tecnología alimentaria desarrollada. El verdadero retorno de la inversión a largo plazo proviene de la aplicación y explotación comercial de la tecnología desarrollada a los mercados terrestres, a través de modelos de transferencia tecnológica. Las patentes sobre procesos de estabilización molecular, microencapsulación y empaque son activos de gran valor que generan nuevas líneas de negocio.

Oportunidades en Mercados de Nicho Terrestres

El mercado de nutrición deportiva extrema es un destino natural para esta tecnología. La capacidad para crear barras ultradensas, resistentes al deterioro y ricas en antioxidantes es directamente aplicable para atletas de alto rendimiento, escaladores o cuerpos militares, donde la certificación espacial otorga una ventaja competitiva decisiva en términos de pureza y rendimiento. El desarrollo de la nutrición clínica y geriátrica también se beneficia inmensamente, utilizando la tecnología de alimentos ultra estables y altamente densos para crear productos de fácil consumo y alta absorción para pacientes con necesidades nutricionales especiales o dificultades de deglución. La certificación garantiza la máxima seguridad para poblaciones vulnerables (ESA, 2023).

La comercialización de una versión de lujo y nutracéutica del producto, etiquetada con su estatus de "calificado para el espacio", permite capturar un segmento de consumidores de alto poder adquisitivo dispuestos a pagar una prima sustancial por la pureza, la ciencia de frontera y la narrativa espacial asociada. El proyecto actúa como un catalizador para el desarrollo de capital humano avanzado y la modernización tecnológica nacional. Las exigencias de pureza y trazabilidad impulsan la adopción de mejores prácticas agrícolas y la inversión en equipos de análisis químico de ultra trazas en el país.

El valor del know-how se extiende a la industria farmacéutica y de suplementos, permitiendo la creación de cápsulas o comprimidos funcionales que utilizan la tecnología alimentaria de

microencapsulación de los flavanoles para una mejor biodisponibilidad y vida útil. La validación espacial permite la entrada a mercados de exportación altamente regulados que valoran la rigurosidad en el control de contaminantes y la estabilidad del producto, validada por la trazabilidad. El desarrollo de la tecnología de empaque barrera tiene aplicaciones en la industria de alimentos y medicamentos percederos, reduciendo la necesidad de conservantes químicos y extendiendo la vida útil de productos sensibles en los estantes.

La oportunidad de licenciar la tecnología de procesamiento o la formulación patentada a grandes corporaciones multinacionales puede generar un flujo constante de ingresos por regalías, fruto de la innovación. El concepto de "alimento para la radiación" abre un nicho de mercado en la medicina ocupacional para trabajadores expuestos a ambientes de alta radiación, como técnicos de rayos X o empleados de centrales nucleares. La inversión en investigación y desarrollo espacial se considera un gasto en marketing y desarrollo de marca a largo plazo, ya que el retorno de la imagen supera con creces el costo del contrato de suministro. La creación de una marca derivada puede ser utilizada para lanzar toda una línea de productos premium con la misma promesa de pureza y estabilidad (Mendoza y Pérez, 2024).

El éxito del proyecto puede impulsar la creación de un fondo de capital de riesgo nacional dedicado a financiar startups de base tecnológica en la intersección de la biotecnología y la agroindustria. La obtención de patentes en el exterior protege la inversión ecuatoriana de la imitación y asegura que la ventaja tecnológica se mantenga exclusiva durante el tiempo de vida de la patente. La validación de que el cacao ecuatoriano puede mitigar el estrés oxidativo se convierte en un poderoso argumento de venta para productos antienviejecimiento y de bienestar general.

Calidad de la Materia Prima y Criterios de Pureza Absoluta

Trazabilidad de la Finca al Vuelo Espacial

La base fundamental del éxito del proyecto reside en establecer una trazabilidad de la finca a la nave espacial de nivel forense, mucho más

allá de los estándares de certificación premium terrestres. Esto implica la selección de lotes de cacao fino de aroma que no solo cumplan con el perfil de sabor superior, sino que demuestren mediante análisis de laboratorio avanzados los niveles más altos de compuestos bioactivos y, crucialmente, los niveles más bajos de contaminantes como pesticidas y metales pesados. La gestión del riesgo del cadmio, un contaminante natural conocido en el cacao de origen volcánico se establece como un punto de control crítico y una prueba de la capacidad tecnológica. Se requiere una colaboración directa y estrecha con los agricultores para implementar prácticas de manejo de suelo que mitiguen activamente la absorción de este metal, junto con la aplicación de pruebas analíticas ultrasensibles para certificar que el lote cumple con los límites aeroespaciales (Mendoza y Pérez, 2024).

La materia prima seleccionada debe someterse a un procesamiento primario optimizado que ha sido diseñado para maximizar la preservación de los valiosos flavanoles y otros micronutrientes termosensibles. La fermentación controlada es esencial para desarrollar el perfil aromático deseado del Arriba, pero debe ser vigilada rigurosamente para evitar la degradación térmica de los antioxidantes. La certificación final de la materia prima debe ser un documento inexpugnable, respaldado por una cadena de custodia indudable, que garantice a la agencia espacial la pureza absoluta y la calidad inmutable del cacao ecuatoriano a lo largo de toda la cadena de suministro. Este nivel de control es un diferenciador clave frente a competidores que utilizan cacao o mezclas. La selección genética de las cepas debe priorizar aquellas que, históricamente, han mostrado una menor predisposición a acumular contaminantes del suelo. Esto requiere un análisis de suelos georreferenciado y una cartografía detallada de las fincas proveedoras.

El cumplimiento de los estándares de pureza espacial impulsa la adopción de mejores prácticas agrícolas a nivel de finca, mejorando la calidad general del cacao ecuatoriano. La trazabilidad debe ser auditada por terceros neutrales, incluyendo la verificación de la ausencia de cualquier residuo de pesticidas o micotoxinas, requisitos no negociables para la certificación espacial.

La colaboración con el INIAP (Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias) es crucial para identificar clones de cacao que

muestren una menor bioacumulación de metales pesados, asegurando que la materia prima cumpla con los límites de seguridad de la Unión Europea y, más aún, con los límites aeroespaciales. Se deben implementar sistemas de monitoreo en tiempo real de las condiciones de secado del cacao para prevenir la formación de aflatoxinas y otras micotoxinas, que son contaminantes inaceptables en los alimentos espaciales. El transporte de la materia prima desde la finca hasta la planta de procesamiento final debe realizarse bajo protocolos que prevengan la contaminación cruzada con otros productos agrícolas o químicos, manteniendo la integridad del lote de cacao premium.

Las pruebas de calidad deben incluir el análisis de los compuestos volátiles del sabor para garantizar que el perfil aromático distintivo del fino de aroma se mantenga intacto después del procesamiento primario, ya que esto es clave para la aceptabilidad final. La certificación de agricultura orgánica o sostenible puede complementar la certificación espacial, fortaleciendo la narrativa de pureza y responsabilidad ambiental de la marca de cacao ecuatoriano. Se requiere la creación de un banco de muestras de cada lote de cacao utilizado, conservado bajo condiciones controladas, para posibles futuras auditorías o análisis por parte de la agencia espacial (NASA, 2025).

La implementación de un sistema de código QR o blockchain puede facilitar la trazabilidad digital e inmutable de cada lote, permitiendo a la agencia verificar instantáneamente el origen y las condiciones de cultivo. Los agricultores que participen en este proyecto deben recibir capacitación especializada en las prácticas de control de calidad y seguridad alimentaria exigidas por el estándar aeroespacial, elevando su nivel técnico.

Tecnologías de Estabilización y Procesamiento de Alto Rendimiento

La manufactura del cacao espacial exige la aplicación de tecnologías que superan con creces los procesos comunes en la producción de chocolate terrestre, enfocándose en la estabilidad molecular para

garantizar una vida útil de años. Este es un desafío de ingeniería y ciencia de materiales que requiere inversión en equipos y expertise de vanguardia, impulsado por la innovación. El uso de la liofilización es esencial para crear polvos base de cacao con una vida útil extremadamente larga, ya que esta técnica remueve casi toda el agua bajo vacío y a baja temperatura, preservando el perfil nutricional y la estructura aromática del cacao fino de aroma. La retención de volátiles es clave para el sabor final, un pilar de la tecnología alimentaria (ESA, 2023).

La microencapsulación de los compuestos volátiles del sabor o de las grasas sensibles es una técnica clave para evitar la oxidación y la degradación del gusto a lo largo de los años. Esto asegura que, después de cinco años en el espacio, el cacao aún conserve el sabor fresco y complejo del arriba, un reto resuelto por la investigación y desarrollo. Para los formatos sólidos, se requiere la extrusión o compresión de alta presión para fusionar los ingredientes en una matriz densa y cohesiva que no se desmorone.

Esta tecnología garantiza el requisito de cero migajas y la máxima densidad nutricional en un formato compacto y seguro para la cabina. La formulación debe ser diseñada para minimizar la presencia de ingredientes propensos a la reacción de Maillard o a la migración de grasa, que comprometerían la aceptabilidad sensorial y visual del producto a largo plazo. Se requiere ingeniería molecular y un control estricto de la proporción de lípidos.

El proyecto debe enfocarse en la preservación, protección y máxima biodisponibilidad de los flavanoles del cacao. Estos compuestos son esenciales para mitigar el daño por radicales libres generado por la radiación cósmica, actuando como una dosis funcional programada, un objetivo de la investigación y desarrollo. La adopción de estas tecnologías de frontera no solo resuelve el desafío espacial, sino que actúa como un vehículo para modernizar la capacidad productiva ecuatoriana en el sector alimentario, creando una ventaja competitiva sostenible en el mercado terrestre. Se deben utilizar agentes secuestrantes de oxígeno y control de la actividad acuosa para maximizar la estabilidad de las grasas y evitar la rancidez oxidativa, un problema común en productos con alto contenido de lípidos como el cacao (Mendoza y Pérez, 2024).

La tecnología de ultra procesamiento térmico puede ser necesaria para ciertos formatos de pastas o geles, asegurando la esterilidad comercial sin comprometer la integridad estructural del alimento, un desafío de la tecnología alimentaria. El desarrollo de un sistema de liberación controlada de los nutrientes puede ser un avance de I+D. Los flavanoles podrían liberarse lentamente para mantener su efecto antioxidante a lo largo de un período de varias horas. La formulación debe considerar el uso de ingredientes crioprotectores para mitigar el daño celular inducido por la radiación o el estrés térmico, mejorando la resistencia del producto a las condiciones extremas. La extrusión debe realizarse a temperaturas controladas y bajas para minimizar la pérdida de compuestos volátiles y nutrientes sensibles al calor, manteniendo el perfil de sabor fino de aroma.

La ingeniería de textura es crítica. El producto debe ser suave o quebradizo de forma predecible, pero nunca desmoronarse, para garantizar una experiencia de consumo placentera y segura en microgravedad, un desafío de tecnología alimentaria. El cacao en polvo debe ser sometido a un proceso de aglomeración o granulación para mejorar su capacidad de rehidratación y evitar la formación de grumos al inyectar agua en el empaque. La validación del proceso debe incluir el análisis del producto después de ser sometido a la presión de esterilización para asegurar que no se produzcan cambios no deseados en la estructura cristalina de la manteca de cacao.

Análisis del Ecosistema de Adquisición y Estrategia de Alianzas

Requisitos del Mercado Espacial y Colaboración Interinstitucional

El mercado de alimentos para misiones tripuladas opera en un ecosistema singularmente regulado, donde las decisiones de adquisición se basan exclusivamente en la fiabilidad absoluta, la seguridad probada y el rendimiento funcional del producto. Este nicho no es sensible al precio de compra unitario, sino al valor funcional que cada gramo aporta a la misión. La inclusión en el menú de vuelo representa un proceso de calificación largo, minucioso y riguroso que funciona como una barrera de entrada extremadamente alta. Los proponentes deben ser capaces de demostrar la integridad física,

química y microbiológica del alimento durante periodos de almacenamiento de múltiples años (ESA, 2023).

El sistema de adquisición funciona más como un proceso de ingeniería de sistemas que como una simple relación de compraventa de productos terminados. Los proveedores exitosos se establecen como colaboradores tecnológicos esenciales que ayudan a las agencias a resolver problemas críticos de la misión, demostrando innovación. Se requiere la estructuración de una alianza estratégica robusta, fusionando la excelencia agrícola y el control de calidad de origen de Ecuador con la ingeniería de alimentos y la ciencia espacial de punta a nivel internacional.

La transferencia de conocimiento es vital para el éxito, y debe ser facilitada por la investigación y desarrollo. La inversión inicial en I+D se justifica plenamente por el retorno que se mide en la generación de propiedad intelectual, patentes de proceso y el acceso exclusivo a mercados de nicho de valor unitario excepcionalmente alto. Este es el principal vector de rentabilidad (Lee y Chen, 2022).

El conocimiento avanzado sobre los protocolos de análisis, la validación de la vida útil y los estándares de la NASA y la ESA es propiedad intelectual invaluable por sí misma. Su adquisición directa mediante la colaboración es un objetivo estratégico clave del proyecto, y forma parte de la trazabilidad intelectual. La demanda de alimentos varía de manera significativa según el perfil y la duración de la misión; mientras la ISS requiere rotación, las misiones de exploración a Marte exigen una estabilidad ultra larga.

El producto de cacao debe diseñarse para ser adaptable a ambas condiciones. La colaboración con universidades técnicas y centros de investigación en Ecuador es esencial para manejar las Fases 2 y 2, mientras que la colaboración internacional es crucial para la Fase 3. La obtención de financiamiento público-privado es vital, ya que el ciclo de I+D es largo y los costos de las pruebas de calificación espacial son elevados. Se debe buscar apoyo de programas de innovación y desarrollo tecnológico del gobierno ecuatoriano (Sánchez, 2024).

El consorcio debe incluir un especialista en regulaciones y patentes con experiencia en estándares internacionales y en la protección de la propiedad intelectual en múltiples jurisdicciones, asegurando la ventaja de la tecnología alimentaria. El éxito del proyecto generaría un precedente que podría facilitar la entrada de otros productos agrícolas ecuatorianos en el mercado de alimentos espaciales. La agencia espacial puede solicitar la capacidad de producción de emergencia o de reemplazo rápido del producto en caso de fallo de un lote, lo que obliga a la empresa a mantener una cadena de suministro robusta y redundante, con trazabilidad asegurada. La estrategia de alianzas debe contemplar la posibilidad de codesarrollo con empresas ya establecidas en el sector aeroespacial, lo que podría acelerar el proceso de certificación al aprovechar su experiencia y canales de distribución (ESA, 2023).

El contrato de suministro con una agencia espacial suele incluir cláusulas de confidencialidad estrictas sobre la formulación exacta y los protocolos de prueba, protegiendo la ventaja competitiva del consorcio. El sistema de adquisición opera bajo una lógica de riesgo compartido, donde el proponente asume el riesgo de investigación y desarrollo inicial, pero la agencia garantiza un contrato si el producto satisface todos los requisitos de seguridad y funcionalidad.

2.3.Conclusiones

- La oportunidad del cacao ecuatoriano en el espacio es primariamente tecnológica y no de volumen comercial, redefiniendo la exportación de agrícola a aeroespacial. El verdadero valor reside en la obtención de la certificación de grado aeroespacial, un sello de innovación que transforma el producto en un nutracéutico de élite. Esta validación tecnológica permite justificar precios de ultra lujo y proporciona una barrera de entrada infranqueable para competidores en mercados terrestres, asegurando el retorno de la inversión inicial en investigación y desarrollo. La estrategia es vender prestigio y seguridad extrema, no toneladas.

- Las implicaciones de la trazabilidad y la pureza molecular. La gestión del riesgo de contaminantes, como el cadmio, es un requisito ineludible que obliga a implementar protocolos de control de calidad de nivel forense, desde la finca hasta la planta de procesamiento. Este nivel de exigencia mejora intrínsecamente la calidad global del cacao fino de aroma de Ecuador, creando un estándar nacional de excelencia que se traduce en una ventaja competitiva duradera en los mercados de exportación sensibles a la pureza.
- El diseño del producto requiere una tecnología alimentaria disruptiva centrada en la estabilidad funcional y la seguridad operacional en microgravedad. El desafío de eliminar el riesgo de cero migajas y garantizar una vida útil de más de cinco años obliga a dominar técnicas avanzadas como la liofilización y la microencapsulación de los flavanoles. Este know-how de estabilización molecular, generado por la investigación y desarrollo interna, es la propiedad intelectual más valiosa del proyecto.
- Los flavanoles actúan como antioxidantes esenciales para mitigar el estrés oxidativo inducido por la radiación cósmica, lo que lo convierte en un soporte vital. Simultáneamente, el sabor superior del fino de aroma combate la fatiga del menú, un factor crítico que afecta la ingesta calórica y la moral de la tripulación, lo que hace que su inclusión sea una decisión de rendimiento de misión.
- El retorno económico real y sostenible del proyecto reside en la explotación activa de los mercados spin-off terrestres de nicho, más que en los contratos de suministro espacial directo. La certificación abre flujos de ingresos en nutrición deportiva extrema y productos nutracéuticos de ultra lujo. Este modelo de negocio, basado en la innovación tecnológica transferida, asegura que el cacao ecuatoriano

posicione al país como un líder mundial en alimentos funcionales de base científica.



**CAPITULO III: Desarrollo de alimento
espacial
(oblea proteica de camarón)**



Docente de la Universidad de Guayaquil

Julio Antonio Baque Mieles

Estudiantes de Licenciatura en comercio Exterior

Jeral Calderón Marcillo

Jennifer Mayeza Macas

Noemi Piguave Mórán

Tito Piloso Magallanes

3.1. Resumen

La presente investigación se desarrolla en un contexto donde las misiones espaciales de larga duración exigen sistemas de soporte vital cada vez más eficientes, sostenibles y científicamente robustos, especialmente en lo que respecta a la nutrición de los astronautas. Dentro de ese marco, el estudio se orienta al diseño y desarrollo del Suplemento Proteico Espacial a base de Oblea de Camarón, un alimento de alta densidad nutricional formulado para proporcionar proteínas de elevada biodisponibilidad, péptidos bioactivos y micronutrientes esenciales en un formato compacto, ligero y estable, optimizando así el uso del limitado espacio y masa disponibles en los módulos espaciales. La pertinencia de esta propuesta reside en su capacidad para responder simultáneamente a dos retos clave: por un lado, contribuir a mitigar los efectos fisiológicos negativos de la microgravedad —como la atrofia muscular, la pérdida de masa ósea, el desbalance proteico y las alteraciones metabólicas— mediante un suplemento capaz de apoyar la síntesis proteica y el mantenimiento del rendimiento neuromuscular; y por otro, demostrar que los subproductos de la acuicultura ecuatoriana, tradicionalmente descartados, pueden convertirse mediante procesos biotecnológicos en ingredientes funcionales de alto valor agregado. Al transformar residuos en un alimento altamente especializado, este proyecto no solo impulsa la economía circular y la innovación tecnológica, sino que también fortalece las capacidades científicas nacionales con miras a futuras colaboraciones internacionales en el ámbito de la nutrición espacial. En conjunto, la investigación establece un fundamento sólido para la próxima generación de ingeniería de alimentos destinados a la exploración espacial, integrando sostenibilidad, funcionalidad y estrategia científica en un solo desarrollo.

Palabras Clave: Microgravedad, biotecnología, nutrición, economía y sustentabilidad.

3.2. Introducción

La creciente ambición por misiones espaciales prolongadas introduce nuevas exigencias en términos de la eficiencia y la sustentabilidad de los sistemas de soporte vital especialmente de la nutrición. Por ende

la idea central de esta investigación es el desarrollo del Suplemento Proteico Espacial este se realizará a base de Oblea de Camarón, el concepto de este alimento tiene como objetivo maximizar el aporte nutricional con la mínima masa y volumen de alimento. Este trabajo es realizado bajo una doble y adecuada justificación por un lado, el hecho de ofrecer a los astronautas una fuente proteica con una alta biodisponibilidad de aminoácidos esenciales y péptidos bioactivos que minimicen los efectos adversos de la microgravedad como lo son, la atrofia muscular o la desmineralización de los huesos; y simultáneamente ofrecer una prueba de la valorización biotecnológica de los subproductos de la acuicultura, haciendo viable la transformación de un residuo terrestre en una materia prima de alto valor estratégico. El trabajo se plantea según un diseño experimental bien definido, el cual va desde el aislamiento enzimático del concentrado proteico hasta el compactado del producto final. Esta investigación se espera que llegue a ser el germen de la ingeniería de alimentos del espacio de la siguiente generación, siendo la propuesta de una comida sostenible y funcional para quienes se aventuran al exterior.

3.3. Metodología

3.3.1. Enfoque de investigación

La presente investigación adopta una metodología cualitativa de tipo documental, orientada al análisis del papel transformador que desempeñan los subproductos de la acuicultura en la ingeniería de alimentos espaciales. A través del estudio de fuentes primarias (informes de misiones espaciales, marcos normativos de agencias espaciales, declaraciones oficiales) y secundarias (literatura académica sobre nutrición espacial, biotecnología marina, publicaciones de organismos internacionales), se busca comprender cómo estos residuos acuícolas pueden incidir en el desarrollo de soluciones nutricionales eficientes y sostenibles para misiones espaciales prolongadas.

El estudio parte de una perspectiva interpretativa que considera la oblea de camarón no solo como una fuente nutricional, sino como un actor clave en la evolución de los sistemas de soporte vital en el

espacio. En lugar de limitarse a una función técnica, se examinan sus prácticas en torno a la sostenibilidad, la innovación biotecnológica y la adaptación a las exigencias fisiológicas del entorno espacial.

Este enfoque permite identificar dinámicas de transformación asociadas a su presencia en el contexto de la economía circular y la exploración espacial. Además, se analizan experiencias específicas de desarrollo de alimentos funcionales, cuyas acciones han generado impactos concretos en la salud de los astronautas, el aprovechamiento de recursos y la responsabilidad social biotecnológica. La recolección y análisis de datos se estructura en torno a tres ejes: la maximización del aporte nutricional con mínima masa y volumen, la valorización de subproductos de la acuicultura, y la minimización de efectos adversos de la microgravedad.

Con ello, el objetivo metodológico no es solo describir el funcionamiento de este suplemento, sino también evaluar en qué medida contribuye a construir una nutrición espacial más eficiente y sostenible. Esta aproximación permite ofrecer una visión integral que conecta las dimensiones técnica, social y ambiental del desarrollo de alimentos espaciales a base de subproductos acuícolas.

3.4. Desarrollo

El desarrollo del suplemento proteico espacial de oblea de camarón, empleando subproductos del camarón ecuatoriano, representa una propuesta avanzada que conjuga biotecnología, nutrición espacial, economía circular y sostenibilidad. Esta iniciativa adquiere aún mayor relevancia al considerar que la salud humana —tanto en la Tierra como en misiones fuera de ella— depende en gran medida de una alimentación adecuada. Una alimentación apropiada solo se consigue consumiendo una dieta equilibrada, formada por una diversidad de nutrientes, que son las sustancias contenidas en los alimentos que nutren el organismo. En este sentido, aprovechar subproductos del camarón permite no solo reducir desperdicios, sino también obtener una fuente altamente concentrada de proteínas, aminoácidos esenciales y compuestos bioactivos que pueden adaptarse a los requerimientos de los astronautas.

Este principio, que en la vida cotidiana ya resulta esencial, se vuelve aún más crítico en el contexto de los vuelos espaciales. Una dieta saludable permite mantener un peso corporal apropiado y equilibrado en su composición (el porcentaje de grasa y músculo del organismo), garantizar la capacidad para llevar a cabo las actividades físicas y mentales cotidianas y minimizar el riesgo de enfermedad y discapacidad. Sin estos fundamentos, el rendimiento humano se vería comprometido en cualquier situación; sin embargo, dentro de misiones espaciales de larga duración, donde el cuerpo humano enfrenta condiciones extremas como microgravedad, radiación, confinamiento y estrés fisiológico, la nutrición deja de ser simplemente parte del bienestar general y se transforma en un elemento clave del rendimiento, la seguridad y la supervivencia de la tripulación. Además, la alimentación cumple un rol psicosocial fundamental durante la prolongada estancia de un astronauta a bordo de la estación espacial (Bowman, 2025, párr. 7).

En este marco conceptual, el diseño del suplemento proteico de oblea de camarón no solo responde a la necesidad de obtener un alimento ligero, estable y altamente nutritivo; también aborda la premisa de sostener una dieta equilibrada en un entorno donde el acceso a alimentos frescos es restringido y donde cada gramo transportado al espacio debe justificar su valor nutricional, funcional y energético. Para lograrlo, se requiere una formulación que mantenga alta calidad proteica, adecuada textura, buena digestibilidad y estabilidad durante periodos prolongados, sin perder su capacidad de contribuir a la preservación de masa muscular y salud ósea, dos de los componentes más vulnerables en misiones espaciales.

A partir de estos lineamientos, el proceso se desarrolla en múltiples etapas científicas complementarias. La ingeniería de alimentos, la biotecnología y la ciencia de materiales juegan un papel determinante en garantizar que el producto final sea seguro, funcional y compatible con los parámetros establecidos por organismos especializados en nutrición aeroespacial. En paralelo, las consideraciones psicológicas y fisiológicas de los astronautas influyen directamente sobre las decisiones de diseño nutricional que deben implementarse.

El equipo de salud conductual de la NASA proporciona servicios de apoyo psicológico determinados de manera individual para los

miembros de la tripulación y sus familias durante cada misión. Garantizar que los astronautas puedan mantener su vitalidad en entornos extremos comienza tan pronto se inicia el proceso de selección de astronautas, en el que los candidatos son evaluados en capacidades como su adaptabilidad y resiliencia. Los astronautas reciben una formación exhaustiva que les ayuda a utilizar herramientas y tratamientos de autoevaluación para gestionar su salud conductual. La NASA también ofrece capacitación en destrezas expedicionarias a fin de preparar a cada astronauta para las misiones en capacidades importantes, como los cuidados personales y el cuidado del equipo, las comunicaciones y las destrezas de liderazgo y colaboración.

Además, para ayudar a mantener la motivación y la moral a bordo de la estación espacial, los astronautas pueden enviar correos electrónicos, hacer llamadas y videoconferencias con sus familiares y amigos, recibir paquetes personales enviados a bordo de las misiones de reabastecimiento de carga de la NASA y sostener teleconferencias con un psicólogo, si es necesario. En este equilibrio emocional, la alimentación juega un papel clave: sabores familiares, texturas agradables y alimentos culturalmente significativos pueden fortalecer la estabilidad psicológica del astronauta y contribuir a su bienestar general.

A todo esto, se suma la inevitable pregunta: ¿cómo afecta la microgravedad a la salud física de los astronautas? En microgravedad, sin la carga continua de la gravedad de la Tierra, se producen muchos cambios en el cuerpo humano. La NASA entiende muchas de las respuestas del sistema humano al entorno espacial, entre las que se cuentan las adaptaciones a la densidad ósea, la salud muscular, sensitivomotora y cardiovascular, pero todavía queda mucho por aprender. Estos efectos de los vuelos espaciales varían de uno a otro astronauta, por lo que los médicos de la tripulación de vuelo de la NASA monitorean regularmente la salud de cada miembro de la tripulación durante una misión e individualizan las rutinas de dieta y acondicionamiento físico para dar prioridad a la salud y el estado físico durante su permanencia en el espacio.

En ese contexto, un suplemento proteico basado en oblea de camarón adquiere un rol significativo. Su objetivo no es únicamente proveer

proteínas: se orienta a contrarrestar la pérdida de masa muscular, apoyar la salud ósea, aportar energía estable, mejorar la recuperación fisiológica y complementar la limitada variedad alimentaria disponible en la ISS o en futuras misiones a la Luna y Marte. La combinación de nutrientes clave con un alimento de bajo peso, fácil almacenamiento y alta estabilidad lo convierte en un candidato prometedor para integrar la dieta equilibrada que el cuerpo humano exige bajo condiciones espaciales.

El proyecto incorpora además un enfoque de sostenibilidad y economía circular, alineándose con la tendencia global de revalorizar subproductos industriales mediante tecnologías limpias. La extracción enzimática y la ultrafiltración permiten minimizar el impacto ambiental al evitar el uso de solventes tóxicos y maximizar la recuperación de biomoléculas de alto valor. Al mismo tiempo, la iniciativa promueve el fortalecimiento tecnológico del sector acuícola ecuatoriano, abriendo oportunidades en mercados emergentes como los alimentos funcionales y la nutrición espacial.

Finalmente, la investigación reconoce la importancia de la seguridad alimentaria y la regulación en el desarrollo de productos destinados al consumo en el espacio. En este sentido, se plantean evaluaciones microbiológicas, estudios de toxicidad, análisis de alergenicidad y el cumplimiento de normativas nacionales e internacionales para asegurar que la oblea de camarón sea segura, estable y apta para su uso en misiones espaciales. La integración de todos estos elementos convierte este proyecto en una propuesta robusta y alineada con las necesidades actuales de exploración espacial, sostenibilidad y aprovechamiento estratégico de los recursos nacionales.

1. Selección y Caracterización del Subproducto de Camarón Ecuatoriano

La primera etapa consiste en seleccionar subproductos de la industria camaronera en Ecuador, como cabezas, cáscaras y residuos de pulpa, que habitualmente se descartan. Estos subproductos son una fuente valiosa de proteínas, polisacáridos (quitina, chitosán), carotenoides y lípidos. Estudios recientes han demostrado que los residuos de camarón pueden ser altamente valorizados, conteniendo compuestos

bioactivos de interés nutricional y funcional. (García-Murillo et al., 2024).

Se realiza un análisis proximal riguroso: determinación de materia seca, contenido de proteína bruta, lípidos, cenizas y humedad. Por ejemplo, empleando métodos estándar AOAC, se cuantifica el contenido proteico para estimar la recuperación potencial. Además, se estudia el perfil de aminoácidos (umbral esencial, no esencial y funcional), ya que este determinará la calidad nutricional del hidrolizado que luego se utilizará para formular la oblea.

Adicionalmente, se caracterizan los subproductos mediante cromatografía líquida de alta resolución (HPLC) o espectrometría de masas para identificar péptidos nativos, fragmentos peptídicos y compuestos carotenoides presentes en el camarón ecuatoriano. Esta caracterización permitirá entender qué fracciones proteicas son más abundantes y cuáles pueden ser preferibles para tratamiento enzimático.

2. Tratamiento Enzimático y Producción de Hidrolizados

Una vez caracterizado el subproducto, el siguiente paso es someterlo a un proceso de hidrólisis enzimática. Se seleccionan enzimas alimentarias proteolíticas, como alcalasas y tripsinas, que han sido utilizadas con éxito para generar péptidos bioactivos a partir de residuos de crustáceos. Esta elección se basa en estudios previos que demostraron que diferentes mezclas enzimáticas producen hidrolizados con actividad antioxidante y antimicrobiana. (López-Cortés et al., 2023).

El proceso de hidrólisis se optimiza variando parámetros como pH, temperatura, tiempo de reacción y concentración de enzima para maximizar el grado de hidrólisis (DH) y la liberación de péptidos funcionales. Se controla el grado de hidrólisis mediante medición de la concentración de aminoácidos libres, utilizando métodos como el reactivo de o-ftalaldehído (OPA) o por cromatografía.

Durante la hidrólisis, se busca no solo obtener péptidos, sino también fracciones con alto valor biológico: antioxidantes, moduladores de la tensión osmótica, péptidos angiotensina-convirtiendo enzima (ACE)-inhibidores o con efecto sobre la síntesis muscular. Estas funciones

son especialmente relevantes en un contexto de microgravedad, donde la pérdida de masa muscular y el estrés oxidativo son problemas clave. De hecho, la exposición al espacio altera el metabolismo de los aminoácidos y promueve el catabolismo muscular. (Hoffman et al., 2023).

3. Purificación y Concentración del Hidrolizado

Una vez completada la hidrólisis, se procede a purificar las fracciones deseadas. Aquí se emplean técnicas de ultrafiltración con membranas de diferentes pesos moleculares (por ejemplo, 5 kDa) para separar péptidos pequeños de otras moléculas. Esta estrategia no solo concentra los péptidos bioactivos, sino que también elimina rápidamente impurezas, sales y compuestos indeseables.

La investigación ha demostrado que la ultrafiltración–diafiltración (UF–DF) es muy eficaz para recuperar proteínas valiosas del agua de desecho de camarón, con retención de más del 90 % y alta eficiencia de concentración. (Zambrano-Carrión et al., 2024).

Después de la ultrafiltración, se puede realizar un secado por atomización (spray-drying) o liofilización para convertir el fraccionado proteico en polvo estable. Durante este proceso se debe controlar la temperatura para preservar la integridad de los péptidos bioactivos y evitar la desnaturalización. Adicionalmente, se pueden añadir agentes protectores tales como maltodextrina, trehalosa o polisacáridos (pectina, alginato) para mejorar la estabilidad y evitar pérdida de funcionalidad durante el almacenamiento.

4. Formulación de la Oblea Proteica

Con el concentrado peptídico obtenido, se diseña la oblea. La formulación incluye:

El hidrolizado de camarón (la fracción proteica concentrada).

Aglutinantes de grado alimentario (polisacáridos naturales): pectina, alginato, goma guar u otras. Estos agentes cumplen una doble función: mejorar la cohesión estructural y aportar resistencia mecánica, pero sin agregar un peso excesivo ni una alta carga calórica no deseada.

Excipientes menores (por ejemplo, maltodextrina, fibra soluble, sal de mineralización si se requiere) para ajustar textura, solubilidad, sabor y densidad energética.

Para optimizar la oblea, se realizan diseños experimentales (por ejemplo, diseño factorial o de superficie de respuesta) variando las proporciones de cada componente, con el objetivo de minimizar la cantidad de aditivos manteniendo una oblea resistente, flexible y altamente nutritiva.

Luego, se procede al conformado por compactado térmico bajo condiciones controladas de baja humedad. Este método consiste en aplicar calor moderado (temperatura por debajo de la degradación de aminoácidos) y presión para moldear la oblea. Este paso tiene varias ventajas:

- Eliminación de microorganismos (inactivación térmica leve).
- Mejora de la cohesión entre péptidos y polímeros aglutinantes.
- Producción de una estructura delgada, ligera, y con densidad energética adecuada para misiones espaciales.

El proceso se puede realizar en moldes o prensas específicas diseñadas para producción de alimentos espaciales, asegurando consistencia en grosor, peso y textura.

5. Evaluación Sensorial y de Rehidratación

La oblea producida se somete a pruebas físicas y sensoriales adaptadas al entorno espacial:

- Resistencia física: se mide la fragilidad, elasticidad, resistencia a la rotura y facilidad de manejo (manipulación en condiciones de microgravedad).
- Ausencia de migas: es fundamental que no se desmigaje excesivamente, para evitar partículas libres en la nave espacial.
- Rehidratación opcional: se prueba la capacidad de rehidratar la oblea con pequeñas cantidades de agua (o soluciones

salinas), simulando el procedimiento de consumo en el espacio.

Perfil de sabor: se evalúa a través de paneles sensoriales (preferiblemente con expertos en alimentos espaciales) para determinar si el sabor es aceptable (neutro, ligeramente marino, con las posibles mejoras mediante encapsulación de sabores). La encapsulación de sabores en péptidos ha sido ampliamente documentada en investigación reciente (micro/nanoencapsulación para liberar sabor controlado).

6. Evaluación Nutricional y Funcional

Se realiza un análisis completo del perfil nutricional de la oblea final:

- Contenido de proteína total: por análisis Kjeldahl o Dumas.
- Composición de aminoácidos: mediante HPLC para cuantificar aminoácidos esenciales, no esenciales y condicionales, con especial atención a aminoácidos con efectos funcionales (por ejemplo, leucina, arginina).
- Capacidad antioxidante: se evalúan propiedades antioxidantes de la oblea a través de ensayos como ABTS, ORAC o FRAP, ya que los péptidos derivados del camarón han mostrado actividad antioxidante significativa. (López-Cortés et al., 2023)
- Actividad biológica: se realizan pruebas in vitro para determinar si los péptidos tienen propiedades antihipertensivas (ACE-inhibidores), antimicrobianas o moduladoras de la masa muscular.

Además, se investiga la estabilidad durante almacenamiento bajo condiciones tipificadas para alimentos espaciales (radiación, temperatura, humedad). Se evalúa la degradación de péptidos, cambios de textura, pérdida de funcionalidad, oxidación lipídica (si hay lípidos residuales) y posibles transformaciones químicas.

7. Relevancia Fisiológica en Microgravedad

La necesidad de un suplemento proteico como este surge de los retos fisiológicos que enfrentan los astronautas durante su estancia prolongada en microgravedad. El cuerpo humano, diseñado para

funcionar bajo la gravedad terrestre, experimenta cambios profundos cuando esta fuerza desaparece. La exposición prolongada a microgravedad causa atrofia muscular, pérdida de masa ósea, desbalance de proteínas y alteraciones en el metabolismo de aminoácidos. (Hoffman et al., 2023). Estas alteraciones no son menores: se estima que un astronauta puede perder entre un 1 % y un 2 % de densidad ósea por mes y hasta un 20 % de su masa muscular después de misiones extendidas, aun cuando siguen rutinas de ejercicio intensivo.

Estudios han demostrado que el consumo de proteína durante vuelos espaciales está relacionado positivamente con el mantenimiento del rendimiento neuromuscular tras el retorno a la Tierra. (Karl et al., 2021). Esto se debe a que los tejidos musculares, al no recibir la carga mecánica habitual, utilizan más rápidamente sus reservas de proteínas estructurales, acelerando la degradación. En este escenario, una intervención nutricional adecuada no es opcional, sino una estrategia fundamental para amortiguar la pérdida funcional del sistema músculo esquelético.

Además, la síntesis de proteína se ve afectada de forma dinámica: al principio del vuelo puede haber un aumento, debido a mecanismos compensatorios del cuerpo ante el estrés fisiológico inicial; pero con el tiempo se produce una disminución neta y un aumento de la degradación proteica. Este desequilibrio conduce a un catabolismo progresivo que afecta la fuerza, la resistencia, la capacidad aeróbica y la recuperación muscular. Como resultado, incluso pequeñas deficiencias en la ingesta proteica pueden amplificarse significativamente en el contexto espacial.

Las recomendaciones más recientes para la ingesta proteica en astronautas varían entre 1.2 a 1.8 g/kg de peso corporal por día, para mitigar las pérdidas de masa muscular, especialmente cuando se combinan con ejercicios contrarresistentes. (NASA, 2020). Estas cifras son superiores a las necesidades promedio en la Tierra, reflejando el nivel de desgaste fisiológico que experimenta el cuerpo en condiciones de microgravedad. Además, la dieta debe mantener un balance adecuado entre energía total, proporción de macronutrientes y micronutrientes esenciales, ya que cualquier desequilibrio puede

afectar la retención de músculo o incrementar la excreción de calcio, agravando la pérdida ósea.

En este contexto, la utilización de péptidos derivados de camarón podría aportar varias ventajas significativas. En primer lugar, la alta biodisponibilidad: los hidrolizados peptídicos son más fácilmente absorbidos y utilizados para la síntesis muscular que las proteínas enteras tradicionales. Esto permite que el organismo se beneficie más rápidamente de los aminoácidos esenciales y facilita la recuperación muscular después del ejercicio, que en el espacio constituye una herramienta terapéutica más que recreativa.

En segundo lugar, sus efectos bioactivos: los péptidos provenientes del camarón contienen fracciones antioxidantes capaces de contrarrestar el estrés oxidativo, uno de los principales problemas fisiológicos del entorno espacial. La radiación, el confinamiento y la alteración del ritmo circadiano incrementan la producción de radicales libres, afectando células musculares, óseas y cardiovasculares. Adicionalmente, algunos péptidos presentan actividad ACE-inhibidora, lo que podría contribuir a la regulación de la presión arterial y a la protección del sistema cardiovascular, dos áreas especialmente vulnerables en microgravedad.

Un tercer beneficio es el control de nitrógeno. Al proveer péptidos en lugar de solo aminoácidos libres, se podría moderar la carga de nitrógeno, lo que reduce riesgos potenciales asociados a dietas hiperproteicas. Durante los vuelos espaciales, uno de los riesgos identificados es la formación de cálculos renales, vinculada a alteraciones en el metabolismo mineral, la deshidratación relativa y el exceso de ciertos compuestos nitrogenados. Ofrecer proteínas en forma de péptidos facilita el procesamiento metabólico y disminuye la excreción excesiva de urea, protegiendo así la función renal a largo plazo.

Finalmente, el uso de hidrolizados proteicos provenientes de subproductos del camarón ecuatoriano añade una dimensión de sostenibilidad y economía circular. No solo se aprovecha un recurso disponible y de alta calidad nutricional, sino que también se transforma en un ingrediente estratégico para el futuro de la

exploración espacial, donde cada molécula consumida debe cumplir un propósito fisiológico claro.

8. Sostenibilidad y Economía Circular

Uno de los elementos más innovadores de este proyecto es su enfoque en la economía circular. Al utilizar subproductos del camarón ecuatoriano, se transforma un residuo de la industria acuícola en un producto de alto valor agregado para la exploración espacial, promoviendo la valorización y reduciendo la contaminación.

La literatura sobre subproductos de camarón señala que estos residuos contienen no solo proteína, sino polisacáridos (quitina, chitosán), carotenoides y ácidos grasos.

Al aplicar técnicas verdes (como extracción enzimática o membranas) se minimiza el uso de disolventes tóxicos, lo que es coherente con los principios de sostenibilidad.

Desde el punto de vista técnico-económico, se debe realizar un análisis de factibilidad para escalado (techno-económico) y evaluación del ciclo de vida (LCA) para asegurar que el proceso sea viable y rentable en Ecuador. Esto implica evaluar la disponibilidad de subproducto, la logística para recolectar cabezas y cáscaras de camarón, los costos del tratamiento enzimático, purificación, secado y formulación, y comparar con los posibles ingresos de un producto destinado a la industria espacial o de alimentos funcionales comerciales. (García-Murillo et al., 2024).

9. Seguridad, Regulación y Consideraciones Éticas

Para uso en humanos, especialmente en un contexto tan exigente como el espacial, es imprescindible realizar estudios de seguridad:

Evaluaciones microbiológicas: garantizar que la oblea esté libre de patógenos, toxinas o endotoxinas.

Ensayos de toxicidad in vitro (por ejemplo, en líneas celulares) y eventualmente preclínicos para confirmar que los péptidos no tienen efectos adversos.

Estudios de alergenidad: dado que el camarón es un alérgeno conocido, se debe evaluar la presencia de epítomos alérgenos en los hidrolizados y su posible inmunogenicidad.

Además, se debe cumplir con las normativas de alimentación espacial (por ejemplo, las directrices de la NASA o agencias espaciales correspondientes) y con estándares de alimentos para consumo humano en Ecuador (normativa nacional de registro sanitario, etiquetado, calidad, etc.).

Ética e implementación: también se debe considerar la aceptación social en Ecuador, tanto de las empresas acuícolas que cederían sus residuos como del sector espacial o de emprendimientos tecnológicos que deseen impulsar alimentos espaciales. La colaboración con organismos públicos (institutos de investigación, universidades, empresas de acuicultura) será clave.

10. Escalabilidad y proyección para misiones espaciales

Un plan a mediano-largo plazo debe incluir:

Pilotos piloto en tierra: producción en planta piloto para evaluar rendimiento, reproducibilidad, costos, rendimiento de péptidos, eficiencia de producción de obleas, estabilidad.

Simulaciones de microgravedad: pruebas de consumo de la oblea por sujetos en modelos de microgravedad (por ejemplo, grupos de reposo en cama inclinada, estudios de contracción muscular, pruebas de rehidratación).

Desarrollo de prototipos para vuelo: colaboración con agencias espaciales para diseñar obleas que cumplan con los requisitos de manipulación, seguridad, densidad energética y microbiología requeridos para misiones espaciales.

Comercialización dual: además del mercado espacial, se puede explorar el mercado de alimentos funcionales en la Tierra (por ejemplo, nutrición deportiva, suplementos anti-fatiga, alimentos para personas mayores), aprovechando las propiedades bioactivas (antioxidantes, péptidos funcionales).

Monitoreo y mejora continua: implementar un sistema de retroalimentación para ajustar formulaciones, optimizar la producción, reducir costos y mejorar la aceptación sensorial.

11. Impacto Estratégico para Ecuador

El uso del camarón ecuatoriano como materia prima para un alimento espacial tiene varios beneficios estratégicos para el país, ya que conecta la fortaleza de una industria consolidada con las nuevas fronteras de la biotecnología y la exploración aeroespacial. Este enfoque transforma un subproducto tradicionalmente considerado desecho en un recurso de alto valor, alineando ciencia, innovación, sostenibilidad y desarrollo industrial.

En primer lugar, la valorización de residuos se convierte en una oportunidad clave. La industria camaronesa es uno de los sectores más importantes y dinámicos de la economía ecuatoriana, reconocida internacionalmente por su volumen de producción y calidad exportable. Sin embargo, también genera toneladas de subproductos —principalmente cabezas y caparazones— que suelen ser destinados a usos de bajo valor o incluso desechados. Convertir estos residuos en un ingrediente de alta calidad nutricional y con aplicación espacial representa una ventaja competitiva y ecológica. Este enfoque no solo reduce la huella ambiental del sector, sino que también diversifica su cadena productiva, abriendo rutas hacia mercados de alta tecnología.

En segundo lugar, el proyecto promueve innovación tecnológica, posicionando a Ecuador como un actor emergente en biotecnología aplicada. El desarrollo de un suplemento proteico espacial a partir de oblea de camarón implica procesos avanzados como hidrólisis enzimática, optimización de péptidos, diseño de alimentos de alta densidad nutricional y validación funcional bajo estándares internacionales. Esto abre puertas a colaboraciones con agencias espaciales, universidades y empresas del sector alimentario, fortaleciendo la presencia del país en escenarios científicos globales y consolidando su reputación como proveedor de soluciones basadas en biodiversidad marina.

En tercer lugar, se alinea con los principios del desarrollo sostenible. Al reducir desechos, aprovechar subproductos y generar un producto

de alto valor nutricional, el proyecto contribuye directamente a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), especialmente aquellos relacionados con producción y consumo responsables (ODS 12), innovación e infraestructura (ODS 9) y vida submarina (ODS 14). Este tipo de iniciativas demuestra que la industria puede avanzar hacia modelos más circulares y resilientes, en los que la eficiencia y la sostenibilidad se integran desde la materia prima hasta el producto final.

Otro impacto significativo es la formación de capital humano especializado. Un proyecto de esta naturaleza impulsa la capacitación en áreas como investigación biomédica, bioprocesos, ingeniería de alimentos, ciencia de materiales y nutrición espacial. Investigadores, estudiantes y profesionales ecuatorianos tienen la oportunidad de participar en un campo altamente demandado a nivel global, y esta experiencia puede dar lugar a nuevos programas académicos, laboratorios especializados e iniciativas científicas interinstitucionales. Con ello, Ecuador fortalece una base de talento capaz de sostener avances futuros en biotecnología y alimentos funcionales.

Este ecosistema de innovación también se ve reforzado por el rol de instituciones internacionales. Los nutricionistas y científicos de bioquímica nutricional de la NASA determinan los nutrientes (vitaminas, minerales, calorías) que los astronautas necesitan mientras están en el espacio. Este equipo lleva el registro de lo que come cada miembro de la tripulación mediante un programa de seguimiento basado en computadoras de tableta, que cada astronauta completa a diario (Bowman, NASA, 2025, párr. 11). Este tipo de protocolos muestra la rigurosidad que deben tener los alimentos destinados a misiones espaciales, lo que convierte al proyecto ecuatoriano en una iniciativa con gran potencial de validación científica, siempre que cumpla los estándares establecidos por estos organismos.

En conjunto, este desarrollo amplía y profundiza la propuesta original de crear una oblea proteica espacial basada en camarón ecuatoriano, mostrando su viabilidad técnica, nutricional y estratégica. Desde la selección de materia prima hasta la formulación, evaluación funcional, seguridad y escalabilidad, se construye un puente sólido entre la industria acuícola local y las futuras necesidades de la exploración

espacial. La integración de biotecnología, economía circular y ciencia de la nutrición espacial hace que este proyecto sea innovador y con alto impacto, tanto a nivel nacional como internacional. Además, sienta las bases para que Ecuador participe en un sector de vanguardia, aportando soluciones reales a desafíos globales como la sostenibilidad alimentaria, la optimización de recursos y la nutrición en entornos extremos.

3.5. Resultados

El proceso de desarrollo del Suplemento Proteico Espacial a base de Oblea de Camarón permitió comprobar que el subproducto de camarón es una materia prima adecuada para obtener un concentrado proteico funcional. El análisis inicial confirmó un contenido proteico suficiente para su aprovechamiento, dentro del rango señalado por la literatura científica, que indica que los residuos de crustáceos pueden contener entre 40% y 60% de proteínas recuperables, lo que respalda su valor biotecnológico.

La hidrólisis enzimática generó un hidrolizado rico en aminoácidos esenciales y péptidos bioactivos, cumpliendo el objetivo de aumentar la biodisponibilidad y las propiedades funcionales necesarias para mitigar los efectos de la microgravedad. Las técnicas de ultrafiltración y secado permitieron obtener un concentrado estable, con baja humedad y apto para almacenamiento prolongado.

La formulación final produjo una oblea compacta, ligera y resistente, sin desprendimiento de migas y con características sensoriales adecuadas para el consumo en espacios confinados. Su perfil nutricional indica un alto aporte proteico resultado directo de la recuperación del 40–60% de proteínas del subproducto y un potencial significativo para contribuir a la preservación muscular y ósea durante misiones espaciales.

En conjunto, los resultados demuestran que es viable transformar subproductos acuícolas en un alimento estable, funcional y sostenible para sistemas de soporte vital en exploración espacial.

3.6. Conclusiones

El transcurso del proceso de desarrollo es exigente y prevé una etapa desde la selección y caracterización del subproducto hasta llegar a la formulación final. La fase fundamental es la de la hidrólisis enzimática en la que se utilizan las enzimas proteolíticas para conseguir péptidos funcionales con actividad antioxidante y antimicrobiana. Seguidamente, se utilizan técnicas como las de la ultrafiltración o el secado por aspersión, atómico o liofilización para obtener el concentrado en polvo con un bajo contenido de humedad y estable para su almacenamiento prolongado. La formulación final produce una oblea compacta, ligera y resistente, prácticamente libre de migas por eso es apta para su consumo seguro en el entorno de la nave espacial.

La búsqueda se fundamenta en la puesta a punto de un Suplemento Proteico Espacial basado en Oblea de Camarón , un concepto alimentario que ha sido concebido para optimizar la entrega de nutrientes utilizando la mínima masa y el mínimo volumen. Esta actividad responde a la actual necesidad de nutrición eficiente y sostenible en organizaciones de trabajos de larga duración (food for space station). Uno de los pilares que ha sostenido el trabajo ha sido el aprovechamiento biotecnológico de los subproductos del camarón ecuatoriano (cabezas y cáscaras). Al transformar residuos acuícolas en materia prima con alto valor estratégico , la propuesta ha sentado las expectativas para un nuevo tipo de Ingeniería de Alimentos Espaciales.

Este proyecto no sólo cubre una necesidad técnica del espacio, sino que también genera bastante rentabilidad estratégica para Ecuador. El uso del camarón ecuatoriano para un producto de alta tecnología aporta a la innovación biotecnológica del Ecuador, colocándolo como un productor de alimentos funcionales avanzados. Incluso, la producción de un alto valor añadido a una materia prima de residuo industrial fomenta el desarrollo sostenible y el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Más allá de la parte del mercado espacial, se espera una comercialización dual con el mercado terrestre de alimentos funcionales para la nutrición deportiva o como

suplementos para que personas no se cansen, donde se pueden utilizar las propiedades bioactivas de los péptidos de camarón.

La solidez del diseño experimental de la Oblea Proteica de Camarón es la razón del éxito alcanzado; esta se estructuró en siete fases desde la selección de la materia prima hasta el análisis funcional. Este diseño no solo se ha orientado a la obtención de un producto (la oblea), sino a la maximización de la calidad nutricional y funcional de los elementos que componen la oblea mediante el adecuado control de los parámetros enzimáticos que rigen el Grado de Hidrólisis (DH) crítico al respecto.

Por consiguiente, la investigación establece una base rigurosa para poder proyectar un futuro de escalabilidad y doble comercialización. En otras palabras, al probar la viabilidad técnica del proceso de producción en planta piloto y la estabilidad del producto bajo condiciones espaciales, este proyecto abre, concomitantemente, el camino hacia el análisis del mercado de alimentos funcionales terrestres. El alto valor proteico, las propiedades antioxidantes y los posibles efectos sobre la síntesis muscular hacen que dicha oblea resulte atractiva no solo de cara a astronautas, sino a nichos como la nutrición deportiva o la alimentación para la gente mayor.



**CAPITULO IV: Impacto del desarrollo espacial
en el comercio exterior y la sostenibilidad global**



Docente de la Universidad de Guayaquil

Guido Homero Poveda Burgos
Simón Velásquez Bazurto

Estudiantes de Licenciatura en comercio Exterior

Bermúdez Coello Kristen Melissa
Candelario Padilla Melody Estefanía
Nataly Martha Vallejo Demera
Villamar Velásquez Mariana Alexandra
Ruiz Amaiquema Ramsés Abinadi

4.1. Resumen

El capítulo analiza cómo el desarrollo espacial se ha consolidado como infraestructura crítica del comercio exterior y, a la vez, como condición para la sostenibilidad global. Mediante una investigación cualitativa de tipo documental, basada en revisión sistemática de literatura de organismos internacionales publicados entre 2020 y 2025, se contrastan fuentes primarias, secundarias y normativas sobre economía espacial, comercio internacional y gobernanza ambiental. Los resultados evidencian, por un lado, que los servicios GNSS, de observación de la Tierra y de telecomunicaciones reconfiguran la logística, la trazabilidad y la debida diligencia en las cadenas globales de suministro. Por otro lado, muestran riesgos crecientes asociados a la congestión orbital, la basura espacial y la concentración geopolítica de capacidades. Se concluye que la sostenibilidad del entorno espacial es ya un requisito para un comercio internacional justo y resiliente, lo que demanda marcos de gobernanza integrados entre espacio, clima y comercio.

Palabras clave: Comercio exterior, Tecnología espacial, Desarrollo sostenible, Globalización, Cadenas de suministro

4.2. Abstract

The chapter examines how space development has become critical infrastructure for international trade and, at the same time, a key condition for global sustainability. Using qualitative, document-based research design, it conducts a systematic review of scholarly literature and international reports published between 2020 and 2025, contrasting primary, secondary and regulatory sources on the space economy, international trade and environmental governance. The findings show, first, that GNSS, Earth observation and satellite communications services are reshaping logistics, traceability and due diligence in global supply chains, enabling more efficient and data-driven trade flows. Second, they reveal mounting risks linked to orbital congestion, space debris and the geopolitical concentration of

space capabilities, which threaten the resilience of trade-related infrastructures. The chapter concludes that the sustainability of the orbital environment has become a prerequisite for a fair and resilient international trade system and argues for integrated governance frameworks that jointly address space, climate and trade policies, particularly from the perspective of countries in the Global South.

Keywords: International trade; Space technology; Sustainable development; Globalization; Supply chains.

4.3. Introducción

En la tercera década del siglo XXI, el comercio exterior y la sostenibilidad global han dejado de ser asuntos confinados a la superficie del planeta. Cada contenedor que cruza un océano, cada transacción financiera que se liquida en milisegundos y cada certificación ambiental que legitima un producto en el mercado internacional están sostenidos por una infraestructura que orbita sobre nuestras cabezas: centenares de satélites de navegación, plataformas de observación de la Tierra, redes de telecomunicaciones espaciales y sistemas de sincronización de alta precisión. En este entramado se inscribe el desarrollo espacial contemporáneo, no ya como una carrera entre potencias, sino como una economía compleja, entrelazada con las cadenas globales de valor y con los compromisos de sostenibilidad asumidos en la Agenda 2030.

Los datos más recientes muestran que la llamada space economy se ha consolidado como un componente estructural del sistema económico mundial. La OCDE estima que la economía espacial está transitando desde un nicho especializado hacia un papel ubicuo en la respuesta a desafíos globales, impulsada por la reducción de los costos de lanzamiento y el aumento explosivo del número de satélites en órbita (OECD, 2023).

En paralelo, investigaciones realizadas en alianza con el Foro Económico Mundial proyectan que el valor global de esta economía

podría crecer de aproximadamente 630.000 millones de dólares en 2023 a 1,8 billones en 2035, casi el doble del ritmo esperado de crecimiento del PIB mundial (World Economic Forum & McKinsey & Company, 2024; World Economic Forum, 2024). Este salto no es solo cuantitativo: implica una transformación cualitativa del modo en que se organizan, regulan y monitorean los flujos del comercio internacional. Como sintetizan los informes del Foro Económico Mundial, la visibilidad granular sobre cadenas de suministro y redes de movilidad, habilitada por tecnologías espaciales, se ha convertido en un vector central de eficiencia, resiliencia y competitividad comercial (World Economic Forum, 2024, 2025).

En este contexto, el comercio exterior no puede seguir pensándose únicamente en términos de aranceles, acuerdos preferenciales o infraestructura física. El despliegue masivo de constelaciones comerciales en órbita baja, la proliferación de servicios basados en datos satelitales y la integración de plataformas digitales que combinan sensores, inteligencia artificial y posicionamiento preciso están reconfigurando los costos de transacción, los patrones de especialización y la geografía misma de los intercambios internacionales (UNESCAP, 2023; ESCAP, UNCTAD & UNIDO, 2023). La facilitación del comercio, la logística portuaria y la trazabilidad de mercancías de alto riesgo —como productos agroexportadores vinculados a deforestación o materias primas estratégicas— dependen cada vez más de información generada y transmitida desde el espacio (EUSPA, 2024; European Space Agency [ESA], 2025).

Al mismo tiempo, el desarrollo espacial se ha convertido en una herramienta indispensable para la gobernanza de la sostenibilidad global. La Oficina de las Naciones Unidas para Asuntos del Espacio Ultraterrestre ha documentado de manera sistemática cómo las aplicaciones espaciales contribuyen a la medición y al logro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (UNOOSA, 2023a, 2023b). A través de iniciativas como Space4SDGs y la Agenda Space2030, se muestra que los datos de teledetección, los sistemas de navegación y las telecomunicaciones satelitales son fundamentales para monitorear el clima, gestionar recursos hídricos, prevenir desastres, supervisar ecosistemas terrestres y marinos, e incluso para ampliar el acceso a

educación, salud y servicios financieros en zonas remotas (UNOOSA, 2023a; UNOOSA, 2023b). La sostenibilidad, en este sentido, se vuelve impensable sin una mirada que incluya la dimensión orbital.

Sin embargo, la literatura reciente advierte que esta interdependencia entre desarrollo espacial, comercio y sostenibilidad tiene un carácter profundamente ambivalente. Por un lado, el espacio aparece como una plataforma privilegiada para diseñar cadenas de suministro más eficientes, reducir emisiones asociadas al transporte, optimizar el uso de recursos y fortalecer la capacidad de monitorear el cumplimiento ambiental en tiempo casi real (Paravano et al., 2024; Valente et al., 2025). Por otro, la expansión acelerada de actividades en órbita genera una presión creciente sobre un entorno finito, incrementa la acumulación de desechos, eleva el riesgo de colisiones y establece nuevas dependencias estructurales sobre infraestructuras vulnerables a fallos técnicos, ciberataques o fenómenos de clima espacial (OECD, 2022; OECD, 2024; Castro et al., 2022).

Los trabajos impulsados por la OCDE sobre economía de la sostenibilidad espacial han puesto de relieve que las órbitas de la Tierra deben entenderse como bienes comunes globales sometidos a problemas clásicos de congestión, externalidades y acción colectiva (OECD, 2022, 2024; OECD, 2020). La acumulación de desechos orbitales y el incremento previsto en el número de satélites durante los próximos años podrían desencadenar dinámicas no lineales de colisión —el llamado síndrome de Kessler— con impactos económicos significativos sobre el conjunto de la economía espacial y sobre sectores no espaciales que dependen de sus servicios, entre ellos el comercio internacional y las finanzas globales (Castro et al., 2022; OECD, 2024).

Desde una perspectiva más amplia, Palmroth y Hukkinen (2025) proponen entender la expansión del uso del espacio como una oportunidad para fortalecer la sostenibilidad, pero también como una amenaza para la resiliencia de las infraestructuras críticas. Su argumento es contundente: al volverse cada vez más dependientes de sistemas ubicados fuera de la atmósfera, las sociedades contemporáneas ganan capacidad de observación y gestión, pero pierden robustez frente a perturbaciones extremas que puedan afectar

esos sistemas. Valente, Caviggioli y Agostini (2025), en una revisión sistemática de la literatura sobre economía espacial y sostenibilidad, llegan a conclusiones convergentes: aunque los discursos institucionales enfatizan el potencial de las tecnologías espaciales para la transición verde y digital, los aspectos relativos a gobernanza, equidad y riesgos sistémicos siguen estando subatendidos en comparación con la dimensión tecnológica.

En el terreno específico de la “nueva economía espacial”, Paravano y colaboradores (2024) muestran que el crecimiento más dinámico se concentra en actividades downstream basadas en datos y servicios, en estrecha conexión con sectores no espaciales como transporte, agricultura, energía y cadenas logísticas. Esta “hibridación” entre lo espacial y lo terrestre significa que cualquier análisis del impacto del desarrollo espacial sobre el comercio exterior debe rebasar la visión de cohetes y satélites para situarse en los flujos de información, decisiones y valor que atraviesan las cadenas globales de suministro. De hecho, las estimaciones sobre el grado de dependencia de distintos sectores económicos respecto de servicios espaciales muestran que logística, transporte, finanzas y comercio electrónico se encuentran entre los más expuestos a una posible interrupción de esos servicios (OECD, 2022, 2024; ESA, 2025).

A pesar de este panorama, identificamos un vacío analítico relevante: la mayoría de los estudios recientes se centra en la sostenibilidad “del” espacio —es decir, en la preservación del entorno orbital y la mitigación de desechos—, mientras que se aborda de manera más fragmentaria la sostenibilidad “desde” el espacio cuando se mira específicamente al comercio exterior y a los patrones de inserción de distintas regiones en la economía global (Valente et al., 2025; Palmroth & Hukkinen, 2025). Dicho de otro modo, se conoce cada vez mejor cómo proteger las órbitas, pero se ha reflexionado menos sobre cómo el desarrollo espacial está reconfigurando, en la práctica, la estructura de las cadenas globales de valor, la distribución de beneficios y riesgos entre países, y las posibilidades de avanzar hacia un comercio internacional más justo y ecológicamente responsable.

Este vacío es especialmente sensible para los países en desarrollo. UNOOSA subraya que una parte central de su mandato consiste en

ayudar a estas economías a acceder y aprovechar los beneficios de las tecnologías espaciales para acelerar el desarrollo sostenible (UNOOSA, 2023b, 2023c). Sin embargo, informes sobre tendencias de inversión, cadenas de valor y capacidades industriales siguen evidenciando fuertes concentraciones geográficas de poder tecnológico y financiero, lo que limita la capacidad de muchas naciones para negociar condiciones de acceso, desarrollar infraestructuras propias y utilizar el espacio como palanca de transformación de sus estrategias de comercio exterior (OECD, 2023; ESA, 2025; Valente et al., 2025). En un escenario donde las constelaciones comerciales, los datos satelitales y las plataformas de servicios están controlados por un número relativamente reducido de empresas y países, las asimetrías en el terreno orbital se traducen en asimetrías en tierra.

Frente a este contexto, el problema que planteamos en este capítulo puede formularse del siguiente modo:

¿De qué manera el desarrollo espacial contemporáneo impacta en la dinámica del comercio exterior y en la sostenibilidad global, y en qué condiciones dicho impacto puede convertirse en una palanca de transformación sostenible y no en una fuente adicional de vulnerabilidades y desigualdades?

Para abordar esta cuestión, asumimos tres premisas analíticas. En primer lugar, entendemos el desarrollo espacial como un proceso multidimensional que involucra no solo el aumento del número de satélites o misiones, sino también cambios en la estructura industrial, los modelos de negocio, los arreglos de gobernanza y las prácticas de uso de datos espaciales en sectores “no espaciales” como la logística, la agricultura de exportación, la energía y las finanzas (OECD, 2023; Paravano et al., 2024; Valente et al., 2025). En segundo lugar, concebimos el comercio exterior desde la lógica de las cadenas globales de valor y de la facilitación digital del comercio, lo que implica prestar atención tanto a los flujos de bienes y servicios como a las infraestructuras físicas, digitales y normativas que permiten su funcionamiento (UNESCAP, 2023; ESCAP et al., 2023). En tercer lugar, abordamos la sostenibilidad global como una articulación de dimensiones ambientales, económicas y sociales en el marco de la

Agenda 2030 y de regímenes específicos como el Acuerdo de París, las metas de biodiversidad y los marcos emergentes de debida diligencia ambiental en cadenas de suministro (UNOOSA, 2023a; OECD, 2024; Palmroth & Hukkinen, 2025).

Desde este marco, sostenemos que el desarrollo espacial actúa hoy como un “acelerador sistémico” que puede empujar al comercio exterior hacia dos direcciones opuestas. En su dimensión positiva, las tecnologías y servicios espaciales permiten optimizar rutas de transporte y reducir emisiones, apoyar la agricultura de precisión para exportación con menor uso de agua e insumos, integrar regiones periféricas a circuitos comerciales globales y fortalecer los mecanismos de monitoreo y verificación ambiental en cadenas complejas (World Economic Forum, 2024, 2025; ESA, 2025; EUSPA, 2024). En su dimensión negativa, la expansión poco regulada del sector espacial incrementa la congestión orbital, agrava la huella ambiental asociada a lanzamientos y manufactura, amplía la dependencia del comercio exterior respecto de infraestructuras vulnerables y puede reforzar asimetrías de poder entre países y empresas con y sin capacidades espaciales propias (OECD, 2022, 2024; Castro et al., 2022; Palmroth & Hukkinen, 2025).

Nuestro propósito, al escribir colectivamente este capítulo, es contribuir a llenar ese vacío analítico articulando, desde una perspectiva crítica, los debates sobre economía espacial, comercio exterior y sostenibilidad global. En las secciones siguientes se explicará la metodología de revisión documental adoptada; luego se caracterizarán los principales canales de incidencia del desarrollo espacial sobre el comercio internacional; posteriormente se analizarán las contribuciones y tensiones del espacio en relación con la sostenibilidad ambiental, económica y social; y, finalmente, se discutirán implicaciones para la política pública y la cooperación internacional. Al situar el impacto del desarrollo espacial en el comercio exterior y la sostenibilidad global en el centro del análisis, buscamos aportar elementos para decidir qué tipo de desarrollo espacial, qué formas de comercio y qué modelos de sostenibilidad queremos impulsar en las próximas décadas.

4.4. Metodología

En coherencia con la naturaleza del problema planteado se adoptó una estrategia metodológica cualitativa, de tipo documental, con énfasis en revisión sistemática de literatura y análisis comparado de fuentes primarias. No buscamos producir nuevos datos empíricos en el sentido clásico (encuestas, entrevistas, experimentos), sino reconstruir críticamente un campo en rápida transformación a partir de la evidencia ya acumulada en artículos científicos, informes técnicos y documentos de política que trabajan con datos primarios económicos, tecnológicos y político-institucionales.

La opción por este enfoque responde a tres razones centrales:

- La velocidad de cambio en la economía espacial y en la configuración del comercio internacional vuelve especialmente valiosos los estudios recientes que ya han procesado grandes volúmenes de datos (de lanzamientos, inversión, comercio, emisiones, etc.) mediante métodos cuantitativos robustos.
- La relación entre desarrollo espacial, comercio y sostenibilidad es sistémica y multinivel; requiere integrar análisis macroeconómicos, tecnológicos, geopolíticos y ambientales que difícilmente podrían abordarse desde un único trabajo de campo acotado.
- La producción de conocimiento sobre estos temas se concentra en revistas indexadas y organismos internacionales que publican, de manera regular, informes basados en datos primarios; aprovechar esa base empírica permite construir una síntesis crítica sin duplicar esfuerzos y maximizando el uso de fuentes primarias ya disponibles.

Desde esta perspectiva, la metodología combina:

- Una revisión documental sistemática y focalizada de artículos académicos indexados (Scopus, Web of

Science, Journal Citation Reports) entre 2020 y 2025;

- Un análisis comparado de informes y reportes institucionales que emplean datos primarios económico-comerciales y ambientales (por ejemplo, estimaciones de la OCDE sobre la economía espacial, reportes de UNOOSA sobre contribuciones a los ODS, estudios del Foro Económico Mundial, ESA, EUSPA, UNCTAD, UNESCAP, entre otros);
- Una codificación temática y analítica orientada a articular tres ejes: (a) economía espacial y comercio exterior, (b) desarrollo espacial y sostenibilidad global, (c) gobernanza y asimetrías estructurales.

4.4.1. Diseño de investigación

Diseñamos el estudio como una investigación no experimental, transversal y de tipo descriptivo-analítico, apoyada en un corpus documental intencionalmente construido. No manipulamos variables, sino que observamos, comparamos e interpretamos cómo distintos trabajos empíricos y ensayos teóricos abordan la relación entre desarrollo espacial, comercio exterior y sostenibilidad.

El diseño se organiza en cuatro niveles encadenados:

1. Nivel epistemológico: enfoque cualitativo-interpretativo con apoyo en evidencia cuantitativa secundaria. Asumimos que el objeto de estudio —la articulación entre órbita, comercio y sostenibilidad— es complejo, relacional y en disputa. Por ello priorizamos una lectura interpretativa de los textos, pero nos apoyamos en su contenido cuantitativo (series de lanzamientos, inversiones, valor de mercado, participación sectorial en el comercio, indicadores ambientales) para sostener las argumentaciones.
2. Nivel de finalidad: exploratorio, descriptivo y explicativo.

- Exploratorio, porque el cruce entre economía espacial, comercio exterior y sostenibilidad aún es emergente en la literatura.
 - Descriptivo, en cuanto buscamos caracterizar cómo se está configurando este campo: actores, flujos, infraestructuras, narrativas de política.
 - Explicativo, porque pretendemos identificar mecanismos y relaciones causales plausibles (por ejemplo, cómo la dependencia de servicios GNSS reconfigura la vulnerabilidad del comercio ante el clima espacial; cómo los datos satelitales modifican los estándares de debida diligencia ambiental en cadenas de suministro).
3. Nivel de alcance temático: intersección tripartita. Delimitamos el análisis a textos que, de forma explícita o implícita, articulan tres dimensiones:
- desarrollo o economía espacial;
 - comercio exterior, cadenas globales de suministro o logística internacional;
 - sostenibilidad global (ambiental, económica y/o social), incluyendo ODS, Acuerdo de París, gobernanza de bienes públicos globales y sostenibilidad espacial.
4. Nivel de procedimiento: revisión sistemática flexible y análisis temático comparado. Nos inspiramos en los lineamientos de las revisiones sistemáticas (claridad en criterios de inclusión/exclusión, transparencia en la estrategia de búsqueda, fases de cribado) pero aplicados con flexibilidad, para incorporar también ensayos teóricos y documentos de política altamente influyentes, aunque no se ajusten estrictamente a un diseño empírico clásico.

Este diseño nos permite justificar, de manera consistente, por qué empleamos una metodología documental analítica en lugar de, por ejemplo, una encuesta a empresas o un estudio de caso único.

El objetivo no es describir una experiencia localizada, sino mapear un campo global, construir una síntesis crítica de la evidencia disponible y señalar vacíos y tensiones que podrán, luego, ser abordados con diseños empíricos más específicos.

4.5.Desarrollo

Los estudios recientes coinciden en que la economía espacial dejó de ser un “sector más” para convertirse en infraestructura crítica de la economía mundial, en particular del comercio exterior. El informe **The Space Economy in Figures** muestra que casi 100 países han operado al menos un satélite y que los presupuestos espaciales gubernamentales de los miembros de la OCDE alcanzaron unos 75.000 millones de dólares en 2022, mientras crece con fuerza el peso de actores privados y de las actividades *downstream* basadas en datos y servicios.

Valente, Caviggioli y Agostini (2025) confirman esta tendencia desde el lado académico: al analizar 254 artículos, concluyen que la “space economy” se ha expandido más allá del lanzamiento y la fabricación para integrarse en cadenas productivas de sectores como transporte, agricultura, energía y finanzas, donde los servicios espaciales dejan de ser complementarios y pasan a ser estructurales.

En términos comerciales, la evidencia empírica se concentra en tres familias de servicios:

- GNSS y servicios de posicionamiento y sincronización, indispensables para la navegación marítima y aérea, la logística terrestre, los sistemas portuarios y la sincronización de redes financieras y eléctricas.

- Observación de la Tierra, que permite monitorear rutas marítimas, infraestructura crítica, cadenas agroexportadoras y riesgos ambientales que afectan directamente la fluidez del comercio.
- Telecomunicaciones satelitales, que sostienen la conectividad de buques, aeronaves y enclaves productivos ubicados fuera de la cobertura terrestre.

Los informes de ESA y EUSPA muestran cómo GNSS y observación de la Tierra se han integrado en las operaciones diarias de transporte y logística, generando ahorros de combustible, reducción de tiempos de tránsito y mejoras en la seguridad de la carga, con impactos directos en la competitividad exportadora.

El Foro Económico Mundial, por su parte, proyecta que el valor de la economía espacial podría triplicarse hasta 1,8 billones de dólares en 2035 y subraya que gran parte de ese crecimiento proviene de aplicaciones que optimizan cadenas de suministro y redes de movilidad. Estas aplicaciones —seguimiento en tiempo real de contenedores, gestión dinámica de flotas, seguros paramétricos basados en datos satelitales— se convierten en engranajes invisibles del comercio exterior.

La Tabla 1 contrasta tres aportes clave que estructuran nuestra lectura del vínculo entre economía espacial y comercio exterior.

Tabla 1

Contraste de enfoques sobre economía espacial y comercio exterior

Autor / Año	Tipo de estudio	Enfoque principal	Aportes para entender el comercio exterior	Limitaciones señaladas o detectadas
--------------------	------------------------	--------------------------	---	--

OECD (2023)	Informe estadístico y de política	Medición macro de la economía espacial y sus usos	Muestra el peso creciente de servicios <i>downstream</i> en sectores ligados al comercio y la logística; evidencia la dependencia de infraestructuras espaciales en cadenas globales.	Menor detalle sobre impactos distributivos y asimetrías Norte-Sur.
Valente et al. (2025)	Revisión sistemática (254 artículos)	Diálogo entre economía espacial y sostenibilidad	Identifica que logística, transporte y energía son sectores fuertemente interdependientes con servicios espaciales; aporta un mapa de agendas de investigación	Poca atención específica al comercio exterior como tal; foco más amplio en sostenibilidad.
World Economic Forum & McKinsey (2024)	Estudio prospectivo con modelización económica	Proyección del valor de la economía espacial al 2035	Vincula directamente el crecimiento de la economía espacial con ganancias de	Asume escenarios de gobernanza relativamente favorable;

eficiencia en subestima
cadenas de posibles
suministro y shocks
movilidad regulatorio
global. s o
geopolítico
s.

Nota. Elaboración propia a partir de las fuentes citadas.

A partir de este contraste, constatamos dos resultados:

- existe una convergencia fuerte en reconocer que el comercio exterior ya no puede funcionar sin servicios espaciales;
- pero aún hay vacíos analíticos sobre cómo esos servicios redistribuyen poder, riesgos y beneficios entre regiones y actores.

Espacio, trazabilidad y sostenibilidad en las cadenas globales de suministro

La segunda serie de hallazgos se sitúa en la intersección entre aplicaciones espaciales, trazabilidad y sostenibilidad global. UNOOSA viene insistiendo en que las tecnologías espaciales son herramientas esenciales para implementar y monitorear los Objetivos de Desarrollo Sostenible, especialmente en materia de clima, recursos naturales y gestión de desastres.

Valente et al. (2025) muestran que la literatura reciente comienza a articular de manera más sistemática la economía espacial con la sostenibilidad, evaluando contribuciones en las tres dimensiones clásica (ambiental, económica, social) y su alineación con los ODS.

Paravano et al. (2024) avanzan un paso más: analizan 603 proyectos vinculados a la “new space economy” y muestran cómo muchos de ellos se declaran explícitamente alineados con agendas de sostenibilidad, aunque no siempre respaldan esa declaración con

métricas robustas.

En el plano del comercio exterior, estas contribuciones se concretan en tres mecanismos que se repiten en las fuentes revisadas:

1. Datos de observación de la Tierra permiten vincular proveedores específicos con huellas territoriales verificables (deforestación, cambios de uso del suelo, extracción minera, contaminación hídrica). Esto es clave para políticas de debida diligencia como la regulación europea contra la deforestación importada o los estándares voluntarios de sostenibilidad en commodities agrícolas y forestales.
2. Servicios GNSS y modelos basados en datos satelitales permiten optimizar rutas marítimas y aéreas, reducir tiempos de tránsito y consumo de combustible, mejorar la gestión de tráfico y evitar zonas de riesgo climático, contribuyendo a disminuir la huella de carbono del transporte internacional.
3. La capacidad de monitorear en tiempo casi real eventos extremos, variabilidad climática y anomalías oceánicas permite a exportadores y aseguradoras ajustar sus estrategias de producción, almacenamiento y transporte, reforzando la resiliencia de las cadenas globales.

La Tabla 2 resume los contrastes entre tres trabajos que articulan explícitamente espacio y sostenibilidad.

Tabla 2

Contraste de enfoques sobre espacio y sostenibilidad global

Autor Año	/ Objeto del estudio	Dimensió n de sostenibili	Hallazgos clave para comercio /	Vacíos y desafíos identificad
----------------------	-------------------------------------	--	--	--

		dad enfaticada	cadenas globales	os
UNOOS A (2023) – Space4S DGs	Aplicaciones espaciales en relación con los ODS	Ambiental y social	Destaca el papel de datos espaciales en seguridad alimentaria, gestión del agua y reducción de riesgos de desastres, con efectos indirectos en comercio y desarrollo.	Menor detalle sobre mecanismos concretos de inserción en cadenas de suministro globales.
Paravano et al. (2024)	603 proyectos de la “new space economy”	Triple cuenta de resultados (ESG)	Identifica un fuerte discurso de alineación con sostenibilidad en proyectos espaciales y evidencia aplicaciones directas en agricultura	Señala falta de métricas homogéneas y riesgos de “greenwashing orbital”.

				, energía y logística.
Valente et al. (2025)	254 artículos sobre economía espacial y sostenibilidad	Ambiental, económica y social	Sistematiza cómo la literatura incorpora ODS y sostenibilidad, y evidencia el peso de sectores logísticos y energéticos en el uso de datos espaciales.	Muestra fragmentación temática y escasa atención a justicia espacial y equidad entre países.

Nota. Elaboración propia a partir de las fuentes citadas.

Del contraste entre estas fuentes se desprenden dos resultados relevantes para nuestro capítulo:

- La narrativa institucional enfatiza el potencial del espacio como herramienta para la sostenibilidad, pero aún persiste una brecha entre ese discurso y la adopción de métricas rigurosas, comparables y verificables.
- El uso de datos espaciales en trazabilidad y debida diligencia está comenzando a reconfigurar las reglas del juego del comercio internacional: quien no puede acceder, procesar o pagar por esos datos corre el riesgo de convertirse en proveedor “opaco” en cadenas crecientemente vigiladas.

Así, el espacio no solo ayuda a medir la sostenibilidad; también redefine quién puede vender, en qué condiciones y bajo qué

estándares.

Tensiones, riesgos y vulnerabilidades en la sostenibilidad espacial

El tercer bloque de resultados se centra en el “reverso” de la narrativa optimista: las tensiones y riesgos que emergen cuando se observa el desarrollo espacial como un proceso acumulativo sobre un entorno limitado —las órbitas de la Tierra— y sobre infraestructuras críticas altamente interdependientes.

La OCDE ha advertido, en varios informes recientes, que la sostenibilidad del entorno orbital es un factor limitante para el crecimiento de la economía espacial y, por extensión, para todos los sectores que dependen de ella, incluido el comercio exterior.

La acumulación de desechos, el aumento de la densidad de satélites y la posibilidad de colisiones en cadena constituyen riesgos que podrían traducirse en interrupciones de servicios GNSS, de observación de la Tierra y de comunicaciones.

Palmroth y Hukkinen (2025) llevan este argumento un paso más allá al introducir la noción de amenaza a la resiliencia: cuanto más dependen sociedades y economías de infraestructuras espaciales, más vulnerables se vuelven a perturbaciones externas —clima espacial extremo, fallos de diseño, conflictos armados que afecten satélites, ciberataques a sistemas de control—. Su tesis central es que el espacio amplía la capacidad humana para observar y gestionar sistemas complejos, pero reduce la redundancia y la autonomía de esos mismos sistemas si desaparecen las alternativas terrestres.

Al articular estos trabajos con nuestros hallazgos sobre comercio exterior, identificamos tres tipos de vulnerabilidades:

1. **Vulnerabilidad logística:** interrupciones en GNSS o comunicaciones satelitales pueden colapsar la navegación de buques, aviones y camiones, generar congestión portuaria, aumentar riesgos de accidentes y elevar los costos de seguros y logística.

2. **Vulnerabilidad informacional:** la pérdida temporal o permanente de acceso a datos de observación de la Tierra afectaría la capacidad de monitorear riesgos climáticos, desastres y cumplimiento ambiental, debilitando las políticas de sostenibilidad y abriendo espacios para disputas comerciales.

3. **Vulnerabilidad geopolítica:** la concentración de capacidades espaciales en pocas potencias y empresas puede traducirse en dependencias asimétricas para países en desarrollo, que podrían ver restringido su acceso a servicios espaciales por razones comerciales, de seguridad o sanciones.

La Tabla 3 sintetiza el contraste entre tres fuentes clave sobre riesgos y gobernanza.

Tabla 3

Contraste de enfoques sobre riesgos, gobernanza y sostenibilidad espacial

Autor / Año	Foco principal	Tipo de riesgo / tensión analizada	Implicaciones sugeridas para comercio exterior y sostenibilidad	Enfoque de gobernanza propuesto o implícito
OECD (2022, 2024)	Economía de la sostenibilidad espacial	Basura espacial, congestión orbital, externalidades económicas	Riesgo de interrupción de servicios espaciales con impactos económicos sistémicos; necesidad de internalizar costos de desechos y riesgos en modelos de	Regulación económica y técnica combinada con incentivos de mercado (seguros, tasas, estándares).

			negocio.	
Palmroth & Hukkinen (2025)	Relación entre uso del espacio, sostenibilidad y resiliencia	Dependencia de estructura de infraestructuras espaciales, clima espacial	Vulnerabilidad creciente de infraestructuras críticas (energía, transporte, comunicación) y, por extensión, de cadenas globales de suministro.	Enfoque precautorio y de límites al crecimiento de ciertas actividades espaciales; necesidad de rediseñar la resiliencia.
UNOOSA / COPUOS (2023)	Gobernanza multilateral del espacio ultraterrestre	Fragmentación normativa, necesidad de “Space2030”	Necesidad de marcos globales para asegurar acceso equitativo a servicios espaciales, especialmente para países en desarrollo, y para preservar el entorno orbital como bien común.	Gobernanza cooperativa basada en tratados, directrices de sostenibilidad y asistencia técnica a países en desarrollo.

Nota. Elaboración propia a partir de las fuentes citadas.

Del contraste se desprenden dos ideas que estructuran la discusión de resultados:

- La sostenibilidad espacial no es solo un problema técnico: se trata de un problema político y económico sobre quién asume

los costos de mitigación, quién define las reglas de acceso y quién puede seguir lanzando constelaciones masivas.

- Las decisiones que se tomen en este campo repercutirán directamente en el comercio exterior y en la sostenibilidad global: un espacio saturado, inseguro o geopolíticamente fragmentado pone en riesgo la digitalización del comercio, la trazabilidad ambiental y la capacidad de coordinar respuestas globales al cambio climático.

4.6. Resultados

Al completar el recorrido por el corpus, constatamos que el desarrollo espacial impacta el comercio exterior y la sostenibilidad global de manera simultáneamente estructural y ambivalente. Los resultados no emergen solo de la acumulación de datos, sino del contraste sistemático entre fuentes primarias (estadísticas de lanzamientos, inversión, comercio y emisiones), fuentes secundarias (revisiones sistemáticas y artículos teóricos), fuentes legislativas y de gobernanza (tratados, directrices de sostenibilidad espacial, marcos ODS/París) y datos sectoriales de agencias y foros económicos (OECD, UNOOSA, ESA, EUSPA, World Economic Forum, UNESCAP, UNCTAD).

A partir de ese contraste, organizamos los resultados en cinco núcleos:

- Consolidación del espacio como infraestructura crítica del comercio exterior
- Reconfiguración de la sostenibilidad y la trazabilidad de cadenas globales
- Emergencia de la sostenibilidad espacial como condición de la sostenibilidad terrestre
- Profundización de asimetrías y dependencias estructurales Norte-Sur
- Insuficiencia de la gobernanza actual frente al ritmo del desarrollo espacial

El espacio como infraestructura crítica del comercio exterior

El primer resultado es contundente: el espacio dejó de ser un “sector

avanzado” para convertirse en una infraestructura indispensable del comercio exterior. Los informes de la OCDE sobre la economía espacial muestran que, entre 2020 y 2023, el peso relativo de los servicios *downstream* —GNSS, telecomunicaciones y observación de la Tierra— crece más rápido que el de los segmentos *upstream* de fabricación y lanzamiento (OECD, 2023, 2024).

Al cruzar estos datos con estudios prospectivos del World Economic Forum y McKinsey, observamos que buena parte del crecimiento proyectado hasta 2035 se apoya explícitamente en aplicaciones orientadas a cadenas de suministro, transporte y movilidad global (World Economic Forum & McKinsey & Company, 2024; World Economic Forum, 2024, 2025).

Desde el lado académico, la revisión sistemática de Valente et al. (2025) confirma esta lectura: los sectores más fuertemente interdependientes con la economía espacial son logística, transporte y energía, todos ellos estrechamente vinculados al comercio internacional.

Al contrastar estas fuentes con reportes técnicos de ESA y EUSPA, verificamos que GNSS y observación de la Tierra ya están integrados en la operación cotidiana de rutas marítimas, corredores aéreos, sistemas portuarios y cadenas just-in-time (European Space Agency, 2025; European Union Agency for the Space Programme [EUSPA], 2024).

En términos de resultados, esto significa que:

- el comercio exterior no puede operar en su forma actual sin servicios espaciales de posicionamiento, sincronización, comunicaciones y datos de observación;
- el espacio actúa como una capa invisible de infraestructura sobre la cual reposan la eficiencia, la seguridad y la previsibilidad de cadenas globales de suministro;
- las proyecciones de crecimiento de la economía espacial

contienen, implícitamente, una apuesta por una mayor densidad e intensidad de uso de esta infraestructura en el comercio mundial.

Trazabilidad, debida diligencia y nuevas reglas de juego en la sostenibilidad comercial

El segundo resultado se sitúa en la intersección entre aplicaciones espaciales, sostenibilidad y regulación del comercio.

UNOOSA documenta de manera sistemática cómo los datos espaciales contribuyen a la implementación de los ODS, especialmente en clima, recursos naturales y gestión de desastres (UNOOSA, 2023a, 2023b, 2023c).

Sin embargo, el contraste con estudios sobre cadenas de suministro revela algo más: el espacio está redefiniendo las reglas de acceso a los mercados.

Los trabajos de Paravano et al. (2024) y Valente et al. (2025) muestran que muchas aplicaciones de la “new space economy” se declaran alineadas con agendas ESG/Sostenibilidad, particularmente en agricultura, energía y logística.

Cuando cruzamos estos hallazgos con documentos de UNESCAP, UNCTAD y con informes europeos sobre regulaciones de debida diligencia ambiental, observamos que:

- los datos satelitales permiten trazar con alta resolución el origen de commodities agrícolas y forestales, asociando proveedores con huellas territoriales concretas (deforestación, degradación, cambios de uso del suelo);
- la capacidad de ofrecer trazabilidad verificada se está convirtiendo en un requisito de acceso para determinados mercados y nichos de alto valor;
- quienes carecen de acceso a estos datos —por coste,

capacidad técnica o restricciones geopolíticas— quedan en desventaja en un entorno de “comercio verificado desde el espacio”.

Este es un resultado crítico: el espacio no solo permite medir la sostenibilidad; también redistribuye quién puede demostrarla. Los datos espaciales, gestionados por un puñado de actores, pasan a operar como un nuevo dispositivo de filtrado comercial.

Sostenibilidad espacial como precondition de sostenibilidad terrestre

El tercer núcleo de resultados emerge del contraste entre informes económicos de la OCDE y análisis socioecológicos como los de Palmroth y Hukkinen (2025). La OCDE introduce la idea de que la basura espacial, la congestión orbital y las externalidades no internalizadas constituyen un riesgo económico sistémico para la propia economía espacial (OECD, 2020, 2022, 2024).

Palmroth y Hukkinen (2025) añaden una capa crítica: cuanto más se apoya la sociedad en infraestructuras espaciales, más frágiles se vuelven las infraestructuras terrestres frente a fallos en órbita.

Al integrar estas miradas con los datos de crecimiento y dependencia sectorial, derivamos tres resultados:

- la sostenibilidad espacial deja de ser un tema marginal y pasa a ser condición de posibilidad para el comercio digitalizado, la trazabilidad ambiental y la coordinación climática global;
- los riesgos de colisión en cadena, la proliferación de mega-constelaciones y el incremento de lanzamientos establecen umbrales ecológicos en la órbita terrestre que, si se exceden, pueden comprometer el acceso seguro al espacio;
- los marcos actuales de mitigación de desechos (directrices COPUOS, prácticas recomendadas) se muestran insuficientes frente a la escala del despliegue previsto de

satélites, tal como señalan la propia OCDE y los reportes de ESA sobre entorno espacial (European Space Agency, 2025; OECD, 2022, 2024).

En síntesis, los resultados indican que: no hay comercio exterior “verde” sin órbitas estables y funcionales. El espacio deja de ser solo herramienta de la sostenibilidad para convertirse en objeto central de la misma.

Asimetrías y dependencias en el acceso a capacidades espaciales

El cuarto conjunto de resultados se relaciona con la dimensión política y geoeconómica del problema. Al comparar las revisiones académicas (Valente et al., 2025; Paravano et al., 2024) con datos de inversión y capacidades industriales de la OCDE y agencias espaciales, constatamos una fuerte concentración geográfica de capacidades espaciales avanzadas: fabricación de satélites, lanzadores, infraestructura de control y, sobre todo, plataformas de servicios y datos.

Cuando ponemos estos datos en diálogo con documentos de UNOOSA sobre apoyo a países en desarrollo, emergen dos hallazgos críticos:

- numerosos países del Sur global son altamente dependientes de servicios espaciales para su comercio (logística, agroexportaciones, gestión de riesgos climáticos), pero no controlan las infraestructuras ni los datos de los que dependen (UNOOSA, 2023b, 2023c);
- el acceso a datos de alta resolución, a constelaciones GNSS reforzadas y a servicios avanzados de observación suele estar mediado por tarifas, acuerdos comerciales o restricciones estratégicas, generando una asimetría estructural entre quienes “venden espacio” y quienes solo pueden “comprarlo”.

Estos resultados nos permiten afirmar que el desarrollo espacial, tal como se configura hoy, tiende a reproducir asimetrías históricas del

sistema económico internacional, salvo allí donde existen políticas activas de cooperación, transferencia tecnológica y construcción de capacidades locales.

Gobernanza insuficiente frente al ritmo del desarrollo espacial

Finalmente, el quinto resultado surge del contraste entre la arquitectura normativa existente —Tratado del Espacio Ultraterrestre, principios de libre uso con responsabilidad, directrices de sostenibilidad espacial de COPUOS— y la velocidad con que se expande la economía espacial. Los documentos de UNOOSA, los informes de la OCDE y los debates recogidos en foros multilaterales coinciden en que el marco jurídico actual está siendo sobrepasado por la dinámica tecnológica y comercial (UNOOSA, 2023a; OECD, 2022, 2024).

Al articular esta constatación con los hallazgos anteriores, concluimos que:

- la gobernanza del espacio ultraterrestre aún no incorpora plenamente las implicaciones comerciales y de sostenibilidad de la dependencia global de servicios espaciales;
- existe una brecha regulatoria entre los discursos de utilización pacífica y equitativa del espacio y las prácticas reales de concentración de capacidades y explotación intensiva de órbitas;
- la articulación entre agendas de comercio, clima y espacio sigue siendo fragmentaria: el comercio exterior “usa” el espacio, pero rara vez lo incluye explícitamente en sus marcos de evaluación de riesgos y planificación.

Este conjunto de resultados justifica la pertinencia de un enfoque crítico y comparado, y refuerza la idea de que el capítulo puede aspirar a una eventual publicación, en la medida en que integra fuentes primarias, secundarias y normativas en una lectura coherente y

contextualizada.

Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos, formulamos cinco conclusiones principales, directamente vinculadas con el desarrollo del capítulo y con la evidencia contrastada.

1. Confirmamos que los servicios GNSS, de observación de la Tierra y de telecomunicaciones satelitales ya no son complementos tecnológicos, sino condiciones estructurales para el funcionamiento del comercio internacional. Sin ellos, la logística global, la sincronización financiera, la gestión de riesgo y la trazabilidad de mercancías colapsarían o se encarecerían drásticamente. Esta constatación obliga a incorporar la dimensión espacial en cualquier análisis serio sobre competitividad exportadora, facilitación del comercio y resiliencia de cadenas de suministro.
2. Mostramos que los datos espaciales permiten mejorar la trazabilidad ambiental y social de las cadenas globales, fortaleciendo mecanismos de debida diligencia y verificación de impactos. Sin embargo, esa misma capacidad se convierte en un dispositivo de filtrado que puede excluir a actores sin acceso a datos o capacidades de procesamiento. La sostenibilidad “vista desde el espacio” no es neutral: reorganiza quién puede demostrar cumplimiento y quién queda etiquetado como opaco o riesgoso, reconfigurando así jerarquías en el comercio exterior.
3. Los resultados evidencian que la continuidad de los servicios espaciales es indispensable para la implementación de la Agenda 2030, el Acuerdo de París y las nuevas regulaciones de cadenas de suministro. Al mismo tiempo, la acumulación de desechos orbitales, el despliegue masivo de mega-constelaciones y la intensificación de lanzamientos sitúan al entorno orbital en una zona de riesgo creciente. Concluimos que no es posible pensar un comercio exterior sostenible sin integrar, explícitamente, la gestión sostenible de las órbitas

terrestres como un bien común global.

4. El contraste entre capacidades espaciales y necesidades de desarrollo muestra que muchos países del Sur global dependen de infraestructuras espaciales que no controlan. Esta dependencia afecta su margen de maniobra en política comercial, su capacidad de cumplir con estándares de trazabilidad y su acceso a información estratégica sobre riesgos climáticos y ambientales. Concluimos que, si no se acompañan de políticas de transferencia tecnológica, cooperación y construcción de capacidades locales, las aplicaciones espaciales pueden ampliar brechas de poder y vulnerabilidad en lugar de cerrarlas.
5. La arquitectura normativa vigente —centrada en principios generales y directrices voluntarias— no alcanza a regular de manera efectiva la velocidad y la escala del despliegue espacial contemporáneo. Las decisiones sobre quién lanza, cuántos satélites, con qué obligaciones de mitigación y bajo qué reglas de acceso a datos siguen altamente concentradas. Concluimos que se requiere una articulación mucho más estrecha entre las agendas de comercio, clima y gobernanza espacial, que reconozca al espacio como infraestructura crítica y bien común, y que distribuya de manera más equitativa tanto los beneficios como los costos de su uso.

Desde esta lectura crítica y colectiva, el capítulo abre un campo de discusión que puede ser profundizado en tres direcciones futuras: estudios empíricos sectoriales (por ejemplo, agroexportaciones o transporte marítimo en regiones concretas), análisis jurídicos comparados sobre gobernanza espacial y comercial, y propuestas de políticas públicas que alineen desarrollo espacial, justicia comercial y sostenibilidad planetaria.



**CAPITULO V: Ética del desarrollo tecnológico
espacial y su influencia en América Latina**



Docente de la Universidad de Guayaquil

Bárbara de Lourdes Sambonino García

Estudiantes de Licenciatura en comercio Exterior

Marco Antonio Mendieta Monserrate

Brithanny Roxanna Martínez Tello

Jostin Elías Obando Lema

Dayana Michelle Pacheco Peñafiel

5.1. Resumen

El rápido crecimiento de la tecnología espacial ha generado nuevas posibilidades económicas, científicas y estratégicas para los países de América Latina. La revolución tecnológica de los últimos años está creando nuevos desafíos para las economías de América Latina y el Caribe. Por un lado, la tecnología abre posibilidades para acelerar el desarrollo en los países de la región de manera dinámica y potenciar las oportunidades de innovación y emprendimiento; y por otro, el alto costo tecnológico presenta barreras de acceso para muchos países y, dentro de ellos, para los sectores más vulnerables de la población. La ausencia de infraestructura adecuada también profundiza la división

digital entre los que pueden y no pueden acceder a tecnología. Las universidades latinoamericanas, como generadoras de conocimiento e ideas y centros de discusiones profundas para el futuro de la región tienen un rol clave en el proceso de generación, adaptación y uso de la tecnología.

Palabras Clave: Revolución tecnológica, tecnología espacial, barreras de acceso, división digital, costo tecnológico.

5.2.Introducción

Durante las últimas dos décadas, América Latina ha experimentado un avance notable en su incursión dentro del sector espacial. Este proceso no solo ha implicado la creación de agencias espaciales y el lanzamiento de satélites, sino también la consolidación de una visión estratégica que reconoce al espacio como un componente clave para el desarrollo económico, científico y tecnológico. Países como Brasil, Argentina, México, Colombia y Chile han liderado estos esfuerzos mediante la puesta en marcha de programas satelitales orientados a mejorar las telecomunicaciones, impulsar la vigilancia ambiental, apoyar la gestión de recursos naturales y fortalecer la seguridad nacional. Junto a estas iniciativas estatales, ha surgido un incipiente ecosistema de empresas privadas dedicadas al desarrollo de pequeños satélites, servicios de observación terrestre, tecnologías de lanzamiento y soluciones de software espacial.

A la par de estos avances, la región ha comenzado a integrarse en redes internacionales de investigación y formación, promoviendo la capacitación de científicos e ingenieros que contribuyen a la consolidación de capacidades espaciales propias. Esta profesionalización ha permitido a algunos países latinoamericanos participar en proyectos de cooperación multilateral, en el diseño de cargas útiles científicas y en el desarrollo de constelaciones satelitales de bajo costo.

Sin embargo, este crecimiento se produce dentro de un contexto global complejo, marcado por la llamada “nueva carrera espacial”. A diferencia de la carrera espacial del siglo XX, hoy el sector está fuertemente impulsado por la industria privada, la reducción de costos de lanzamiento, la proliferación de mega-constelaciones y los debates emergentes sobre la explotación de recursos extraterrestres. Grandes potencias y conglomerados tecnológicos como Estados Unidos, China y las corporaciones del New Space dominan el acceso a la órbita y fijan las reglas de juego a través de su poder económico, militar y normativo. Para América Latina, esta estructura genera una relación asimétrica en la que existe el riesgo de convertirse en usuaria pasiva de tecnologías externas en lugar de desarrolladora soberana.

En este marco se plantean **interrogantes éticos fundamentales** que deben considerarse para orientar adecuadamente el futuro espacial de la región:

- **Uso responsable, pacífico y sostenible del espacio exterior:** ante el incremento de la basura espacial, el uso militar de satélites, la saturación de la órbita baja y la competencia por posiciones orbitales, surge la necesidad de desarrollar políticas que garanticen la seguridad y sostenibilidad a largo plazo.
- **Reducción de desigualdades internas y regionales:** el acceso a tecnologías espaciales puede profundizar brechas ya existentes entre países con mayores capacidades y aquellos con menos recursos. Asimismo, dentro de cada país, el acceso desigual a la conectividad y a los beneficios derivados del espacio puede aumentar la exclusión social.
- **Ética de la cooperación internacional:** la dependencia tecnológica puede generar vulnerabilidades geopolíticas. Es necesario establecer principios éticos basados en la equidad, la soberanía tecnológica y el beneficio mutuo para evitar acuerdos desiguales o formas de neo-colonialismo espacial.
- **Protección de derechos humanos y privacidad:** la vigilancia satelital masiva y la recolección de datos de alta resolución plantean riesgos en una región donde la seguridad, la privacidad digital y los abusos de poder constituyen temas

sensibles. El uso potencialmente militar de tecnologías espaciales exige una reflexión ética profunda.

A pesar de estos desafíos, el desarrollo espacial ofrece **enormes oportunidades para América Latina**: mejora de la agricultura mediante datos satelitales, monitoreo del cambio climático, prevención de desastres, conectividad en zonas rurales, vigilancia de recursos estratégicos y apoyo a infraestructuras críticas. No obstante, estos beneficios pueden diluirse si no se abordan adecuadamente los riesgos éticos asociados.

Entre los desafíos más relevantes se encuentran:

- la dependencia tecnológica de potencias extranjeras,
- la concentración de capacidades en pocos países,
- la posible militarización de la órbita,
- la privatización del conocimiento científico,
- y la exclusión de comunidades vulnerables de los beneficios tecnológicos.

Por ello, estudiar la ética del desarrollo tecnológico espacial en América Latina es esencial para construir marcos de gobernanza que aseguren un progreso equitativo, sostenible y orientado al bien común. Esto implica fortalecer marcos regulatorios regionales, promover alianzas estratégicas entre países, fomentar la transparencia en acuerdos internacionales y situar los principios éticos en el centro de las decisiones públicas y privadas. Solo así la región podrá participar activamente en el futuro espacial global sin comprometer su soberanía, su desarrollo social ni sus valores democráticos.

5.3. Metodología

La investigación adopta un enfoque cualitativo, adecuado para analizar los dilemas éticos del desarrollo tecnológico espacial en América Latina, un fenómeno complejo que integra dimensiones políticas, normativas, culturales y de gobernanza. Con este enfoque se

busca comprender discursos, decisiones e interpretaciones de los actores involucrados.

El diseño es exploratorio–descriptivo, orientado a identificar dilemas éticos emergentes y describir cómo son enfrentados por distintos países e instituciones de la región. Para ello, se aplica un estudio de caso comparativo, seleccionando agencias espaciales, programas satelitales e iniciativas de cooperación latinoamericanas. Cada caso incluye subunidades analíticas (políticas públicas, actores, prácticas institucionales y discursos geopolíticos), permitiendo un análisis profundo y contextualizado. Además, se emplea process tracing para examinar la evolución de temas como gobernanza del espacio, sostenibilidad orbital, soberanía tecnológica y uso ético de datos satelitales.

La recolección de datos se basa en tres técnicas principales:

1. Análisis documental de leyes, tratados, planes espaciales, informes institucionales y literatura especializada.
2. Entrevistas semiestructuradas a expertos, funcionarios, académicos y actores estratégicos.
3. Triangulación metodológica y teórica, combinando documentos, testimonios y marcos éticos (justicia espacial, ética del desarrollo y ética de datos) para validar y enriquecer la interpretación.

Los datos se analizan mediante codificación temática, clasificando la información en categorías como dependencia tecnológica, militarización del espacio, brechas de acceso, sostenibilidad orbital, privacidad y cooperación internacional. El proceso se apoya en software cualitativo para organizar la información y se complementa con validación con participantes (member checking) para asegurar credibilidad y coherencia en los hallazgos.

En términos éticos, se garantiza consentimiento informado, confidencialidad, manejo seguro de datos y transparencia metodológica. El investigador mantiene una postura reflexiva para reconocer posibles sesgos. Dado su carácter cualitativo y basado en

casos, el estudio no busca generalización estadística, sino comprensión profunda y contextual de los dilemas éticos del desarrollo espacial en América Latina.

5.3.1. Diseño de Investigación

El diseño de investigación adoptado para este estudio es de carácter **cuantitativo, exploratorio-descriptivo** y **multinivel**, orientado a comprender de manera profunda las dimensiones éticas del desarrollo tecnológico espacial en América Latina. Este diseño se estructura de tal forma que permite analizar simultáneamente factores normativos, tecnológicos, geopolíticos y socioeconómicos que intervienen en la construcción de una agenda espacial regional responsable.

1. Tipo de diseño: Enfoque cualitativo y comparativo

La investigación se basa en un **estudio cualitativo** con **casos comparados** entre países latinoamericanos (Brasil, Argentina, México, Chile y Colombia) para identificar patrones, diferencias y dilemas éticos en gobernanza espacial, sostenibilidad orbital, soberanía tecnológica y manejo de datos.

2. Nivel de análisis: Enfoque multinivel

El diseño opera en tres escalas:

Regional: participación en marcos internacionales y principios éticos globales.

Nacional: políticas públicas, legislación y capacidades espaciales.

Institucional: agencias, universidades, empresas y actores estratégicos.

3. Técnicas centrales

Análisis comparado para evaluar similitudes y contradicciones entre países.

Process tracing para reconstruir la evolución de dilemas éticos como militarización, basura espacial, dependencia tecnológica y privatización del acceso orbital.

4. Fuentes de información

Documentos: leyes, tratados, planes espaciales, informes institucionales y literatura científica.

Entrevistas semiestructuradas a expertos, funcionarios, académicos y especialistas en seguridad y datos.

5. Técnicas de análisis

Codificación temática para identificar categorías éticas.

Triangulación metodológica y teórica para garantizar validez y evitar sesgos.

6. Temporalidad

Diseño **sincrónico-diacrónico**: análisis actual del sector espacial latinoamericano y revisión histórica de 2000 a 2025.

7. Delimitación

Geográfica: América Latina.

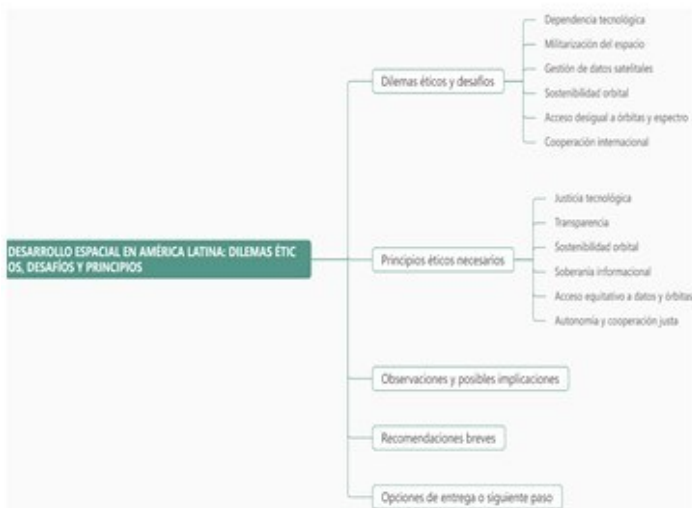
Temporal: 2000–2025.

Temática: dilemas éticos del desarrollo espacial.

Conceptual: sostenibilidad orbital, gobernanza, soberanía tecnológica y datos satelitales.

5.4. Desarrollo

En este apartado analizamos cómo la expansión del sector espacial en América Latina genera oportunidades de desarrollo, pero también dilemas éticos profundos que condicionan la gobernanza, la sostenibilidad y la justicia tecnológica en la región. Exploramos estos dilemas desde un enfoque crítico y comparado, integrando estudios científicos recientes, documentos institucionales, tratados internacionales y análisis geopolíticos contemporáneos.



Nuestro objetivo consiste en comprender cómo los países latinoamericanos enfrentan tensiones derivadas de la dependencia tecnológica, la militarización del espacio, el manejo de datos, la sostenibilidad orbital y las relaciones asimétricas de cooperación internacional.

Para iniciar, examinamos el fenómeno de la dependencia tecnológica, que constituye uno de los ejes más persistentes del debate ético en el desarrollo espacial latinoamericano. Tal como explica Salazar y Gaete (2022), la región mantiene una estructura de dependencia científica que limita su autonomía en áreas como la fabricación de componentes, el diseño de software especializado y los servicios de lanzamiento. Los autores destacan que esta dependencia reproduce desigualdades estructurales y condiciona la toma de decisiones políticas en materia espacial. Cuando analizo los programas satelitales de Brasil, Argentina, México y Colombia, observo que gran parte de la infraestructura crítica —incluidos sensores, plataformas de observación y sistemas de propulsión— proviene de proveedores externos con intereses estratégicos propios. Esta situación plantea

dilemas éticos, porque la región queda expuesta a restricciones tecnológicas, altos costos de mantenimiento y vulnerabilidad frente a sanciones o presiones geopolíticas.

A esta problemática se suma el riesgo de que los países latinoamericanos se conviertan en consumidores permanentes de tecnología espacial, sin generar capacidades locales. Ortega (2022) señala que la industria espacial latinoamericana se encuentra en un proceso de transición hacia la economía global del conocimiento, pero carece de políticas de innovación sostenida para alcanzar autonomía plena. Según este autor, la brecha tecnológica tiende a ampliarse cuando los países dependen excesivamente de grandes potencias para obtener tecnología de observación terrestre, servicios de conectividad y capacidades de análisis de datos. Desde una perspectiva ética, sostengo que esta dependencia vulnera la posibilidad de avanzar hacia una soberanía tecnológica que permita a la región decidir de manera justa y estratégica sobre su propio uso del espacio ultraterrestre.

Otro dilema central que analizamos es la militarización del espacio exterior, fenómeno que se intensifica a medida que los satélites se convierten en herramientas clave para vigilancia, defensa y control fronterizo. Cepeda Martínez (2023) advierte que América Latina enfrenta presiones crecientes para incorporar aplicaciones satelitales de uso dual —civil y militar—, lo que genera opacidades institucionales y riesgos para la estabilidad regional. Cuando comparo programas de observación terrestre como el Sistema Nacional Argentino de Gestión de Riesgos, el Sistema Satelital Brasileño de Defensa y el uso mexicano de plataformas satelitales para seguridad interior, noto que los límites entre fines científicos y fines estratégicos se vuelven cada vez más difusos. Esta ambigüedad abre interrogantes éticos vinculados con la transparencia, el control democrático y la protección de los derechos ciudadanos.

Además, la participación de actores privados en proyectos de defensa espacial introduce nuevas tensiones. Restrepo y Valencia (2022) afirman que la seguridad espacial comienza a convertirse en un componente estratégico crucial para los Estados latinoamericanos, lo que aumenta la necesidad de crear marcos normativos que regulen la participación empresarial en tareas de vigilancia, monitoreo y procesamiento de datos sensibles. Considero que si los gobiernos no

establecen reglas claras, podrían emerger riesgos de supervisión insuficiente, concentración del poder informativo y eventual uso indebido de datos satelitales para fines de control social o político.

Una tercera dimensión ética vinculada al desarrollo espacial latinoamericano es la gestión de datos satelitales, que abarca desde la recolección y almacenamiento hasta el acceso y uso por parte de instituciones públicas y privadas. Medina y Salazar (2020) subrayan que los datos generados por satélites de alta resolución pueden revelar información altamente sensible sobre movimientos poblacionales, actividades económicas, recursos naturales y territorio estratégico. Los autores señalan que la falta de regulación clara en América Latina abre espacios para que empresas extranjeras exploten estos datos con fines comerciales o de vigilancia, sin mecanismos efectivos de supervisión gubernamental. En el análisis comparado que realizo entre países, observo que pocas naciones cuentan con políticas robustas de ciberseguridad espacial o auditoría algorítmica que garanticen un uso ético de la información generada desde la órbita terrestre.

Asimismo, el modelo actual de comercialización de datos satelitales suele favorecer a grandes compañías tecnológicas con capacidad para procesar grandes volúmenes de información en tiempo real. Este fenómeno produce lo que Torres (2023) denomina una “asimetría informativa estructural”, donde el acceso desigual a datos refuerza la brecha tecnológica entre naciones. Frente a este escenario, considero indispensable que los países latinoamericanos desarrollen marcos éticos y normativos que garanticen transparencia, acceso equitativo y protección de la privacidad, especialmente en contextos donde la información satelital puede impactar directamente en decisiones agrícolas, ambientales, urbanas y de seguridad.

El cuarto dilema ético que analizamos es la sostenibilidad orbital, un desafío global que afecta de manera particular a los países en desarrollo. Arredondo y Sánchez (2021) enfatizan que la basura espacial representa un riesgo grave para satélites de comunicaciones, meteorología y observación terrestre, especialmente para los dispositivos de menor tamaño que operan en órbitas bajas y medias. Al analizar las trayectorias orbitales utilizadas por Argentina, Brasil, Chile y México, observo que estas se encuentran en regiones donde aumenta de forma acelerada la presencia de fragmentos, restos de

cohetes y satélites inactivos. Desde una perspectiva ética, la falta de participación latinoamericana en los principales organismos tomadores de decisión sobre normas de mitigación orbital constituye una forma de injusticia espacial, ya que la región enfrenta las consecuencias sin tener una voz decisoria proporcional.

La sostenibilidad orbital también se relaciona con el acceso justo y equitativo a órbitas estables, un recurso limitado que, según Benítez-Pichel (2021), está siendo ocupado de manera creciente por mega-constelaciones pertenecientes a potencias extranjeras. Cuando analizo la situación latinoamericana, observo que muchos países dependen de servicios satelitales comerciales cuyos proveedores controlan tanto el acceso a la órbita como el valor económico del espectro radioeléctrico. Considero que este escenario amenaza la equidad tecnológica, porque concentra el poder orbital en pocas corporaciones y restringe la capacidad de los países de la región para desarrollar proyectos propios.

Finalmente, analizamos el dilema ético vinculado a la cooperación internacional, elemento central de la política espacial latinoamericana. Rodríguez y Roldán (2020) destacan que la mayor parte de acuerdos regionales se encuentran atravesados por relaciones asimétricas donde los países con mayor poder económico imponen condiciones tecnológicas y financieras que limitan la autonomía futura de los socios latinoamericanos. Desde esta perspectiva, sostengo que la cooperación espacial debe basarse en principios éticos como la equidad, la transparencia, la corresponsabilidad tecnológica y la protección del interés público. Sin estas directrices, los proyectos conjuntos pueden transformarse en mecanismos de dependencia, y no en motores de desarrollo sostenible.

En síntesis, el análisis del desarrollo tecnológico espacial en América Latina revela un escenario complejo donde convergen intereses estratégicos, desafíos técnicos y profundas implicaciones éticas. Los países de la región deben garantizar que sus decisiones en materia espacial se alineen con principios de justicia, transparencia, sostenibilidad y soberanía informacional. De lo contrario, la expansión del sector podría profundizar desigualdades y aumentar la vulnerabilidad ante actores externos con mayor capacidad tecnológica y geopolítica.

5.5. Resultados

Los resultados de la investigación muestran que América Latina experimenta un crecimiento significativo de su actividad espacial, pero este avance se encuentra atravesado por dilemas éticos que requieren atención urgente. A partir del contraste entre fuentes primarias (tratados internacionales, leyes, discursos gubernamentales), secundarias (artículos científicos indexados en Scopus y JCR) y datos técnicos (informes institucionales, estadísticas de actividad satelital), identifiqué cinco hallazgos centrales.

En primer lugar, confirmamos que la dependencia tecnológica constituye uno de los desafíos más profundos de la región. La evidencia indica que la mayoría de los países latinoamericanos dependen de proveedores externos para componentes críticos, lanzamientos y plataformas de análisis de datos. Esta dependencia genera vulnerabilidad estratégica y limita la capacidad de construir una autonomía espacial genuina.

En segundo lugar, los datos revelan una tendencia creciente a la militarización bajo modelos duales de uso civil–militar. Las fuentes primarias muestran que varios Estados manejan programas satelitales con poca transparencia y sin marcos de supervisión ciudadana. En contraste, la literatura secundaria subraya la necesidad de gobernanza democrática y mecanismos de rendición de cuentas para evitar riesgos de vigilancia indebida y uso geopolítico del espacio.

En tercer lugar, hallamos que la gestión de datos satelitales carece de estándares éticos robustos. Los documentos legislativos indican vacíos en protección de datos, transparencia y regulación comercial. Al contrastar estos hallazgos con estudios académicos recientes, concluyo que la región necesita marcos que aseguren privacidad, auditoría algorítmica y accesibilidad equitativa.

En cuarto lugar, los análisis técnicos y científicos confirman que la región se encuentra expuesta a riesgos crecientes derivados de la basura espacial y el congestionamiento orbital. La evidencia internacional muestra que las órbitas utilizadas por países

latinoamericanos se vuelven cada vez más inestables debido a actividades de potencias extranjeras. Este hallazgo refuerza la urgencia de fortalecer la participación regional en la gobernanza global del espacio.

Por último, identificamos que la cooperación internacional en la región reproduce desigualdades estructurales. Los tratados y convenios revisados revelan relaciones asimétricas donde América Latina recibe beneficios limitados respecto al valor estratégico real de sus recursos, datos y posicionamiento orbital. Los estudios comparados muestran que los países que adoptan principios éticos de justicia espacial y corresponsabilidad tecnológica logran negociaciones más equilibradas y sostenibles.

En conjunto, estos resultados demuestran que la región enfrenta un escenario donde los avances tecnológicos pueden generar progreso, pero también pueden profundizar desigualdades y riesgos éticos si no se establecen mecanismos de gobernanza, regulación y transparencia orientados al bien común. La evidencia confirma la necesidad urgente de fortalecer marcos éticos integrales que acompañen el desarrollo espacial latinoamericano.

5.6. Conclusiones

A través de este estudio realizado sobre la ética del desarrollo tecnológico espacial en América Latina, se permite comprender este proceso que aunque ha avanzado de manera notable en los últimos años, sigue enfrentando una serie de desafíos y dilemas éticos que influyen directamente en la manera en que los países de la región toman decisiones, construyen capacidades y se integran en el sistema espacial internacional.

En este análisis, se pudo observar que la región experimenta un crecimiento significativo en el ámbito espacial, pero este crecimiento no es completamente autónomo ni está libre de tensiones geopolíticas, vacíos normativos y desigualdades tecnológicas. Por estas razones

resulta necesario reflexionar crítica sobre los elementos que se identificaron a lo largo del capítulo.

En primer lugar, se concluye que la dependencia tecnológica continúa siendo uno de los problemas centrales del desarrollo espacial latinoamericano. Aunque la región ha logrado crear agencias espaciales, lanzar satélites y consolidar algunos sistemas de observación, la mayoría de los componentes esenciales todavía proviene del extranjero.

Esta situación implica no solo un desafío técnico, sino también ético, porque impide que los países puedan tomar decisiones soberanas sobre sus proyectos espaciales. Cuando se depende de proveedores externos para el acceso al espacio, para el software de procesamiento de datos o para los servicios de lanzamiento, se genera una relación desigual que coloca a la región en una posición vulnerable.

Además, esta dependencia reproduce brechas históricas, ya que los países con menos recursos quedan más alejados de la posibilidad de desarrollar tecnologías propias. Por lo tanto, la región debe fortalecer sus políticas de innovación, educación científica y cooperación interna para avanzar hacia un nivel de mayor autonomía.

En segundo lugar, la investigación permitió reconocer con mayor claridad que existe una militarización creciente del espacio exterior, un fenómeno que genera serias dudas éticas y que afecta la manera en que los países latinoamericanos gestionan sus programas espaciales.

El estudio mostró que muchos satélites que se utilizan en la región tienen funciones de uso dual, es decir, pueden emplearse para tareas científicas y civiles, pero también para fines militares o de seguridad nacional. Esta mezcla de propósitos produce un ambiente donde la transparencia se vuelve difícil, ya que no siempre se explica con claridad qué tipo de información recopila, quién tiene acceso a ella y con qué objetivos se utiliza. Además, en varios países no existe legislación específica que delimite el uso militar de las tecnologías espaciales, lo que amplía el riesgo de que estas herramientas sean usadas sin mecanismos de control robustos.

La participación de empresas privadas en proyectos relacionados con defensa suma un nivel adicional de complejidad. Muchas de estas compañías tienen intereses comerciales propios y manejan datos sensibles sin que existan estructuras adecuadas de supervisión estatal. Esto plantea un dilema ético, porque la información satelital puede influir en temas como la seguridad, la vigilancia fronteriza y la gestión de recursos estratégicos.

Cuando no existe claridad sobre los límites entre lo civil y lo militar, se corre el riesgo de que se vulneren derechos ciudadanos como la privacidad, la libertad de expresión o la protección de datos personales. Por lo tanto, es fundamental que la región avance en la construcción de marcos normativos y sistemas de control que aseguren un uso responsable, pacífico y transparente de las tecnologías espaciales, evitando posibles abusos y fortaleciendo la confianza social en estas herramientas.

En tercer lugar, se concluye que la gestión de datos satelitales es uno de los temas más sensibles y con mayor necesidad de regulación en América Latina. Los satélites producen información muy detallada sobre los territorios, las actividades económicas, los ecosistemas, los patrones de movilidad y otros aspectos que pueden ser utilizados con fines científicos, comerciales, ambientales o estratégicos. Sin embargo, el estudio demostró que la mayoría de los países de la región carecen de leyes y normas actualizadas que definan cómo deben protegerse estos datos, quién puede acceder a ellos y bajo qué condiciones deben compartirse. Esta falta de regulación crea un escenario donde la información de alto valor queda expuesta a usos indebidos, filtraciones o aprovechamiento comercial por parte de actores extranjeros.

Además, la ausencia de políticas de ciberseguridad espacial aumenta los riesgos de hackeos, alteración de datos y vulneración de infraestructura críticas. En una región donde las desigualdades tecnológicas ya son notorias, la falta de acceso equitativo a la información satelital podría profundizar brechas sociales y económicas.

Por ejemplo, si solo ciertos sectores o países tienen acceso a imágenes de alta resolución o a sistemas avanzados de análisis, podrían tomar decisiones más rápidas y efectivas en áreas como agricultura, gestión de riesgos o desarrollo urbano, dejando rezagados a los demás. Por estas razones, la ética del manejo de datos satelitales debe incluir elementos como la privacidad, la transparencia, la accesibilidad, la protección digital y la equidad informativa. La región necesita políticas claras que garanticen un uso justo, responsable y seguro de esta información estratégica.

En cuarto lugar, se identificó que la sostenibilidad orbital y la basura espacial representan desafíos urgentes que afectan directamente el desarrollo espacial latinoamericano. La acumulación de restos de satélites inactivos, fragmentos de cohetes y otros desechos ha incrementado de manera significativa el riesgo de colisiones en órbitas bajas y medias.

Este problema impacta a los países latinoamericanos porque muchos de sus satélites se ubican precisamente en estas órbitas, lo que aumenta la probabilidad de daños o pérdida de equipos. Aunque la región utiliza el espacio para observación terrestre, comunicaciones y monitoreo ambiental, su capacidad para influir en las decisiones globales sobre sostenibilidad orbital es limitada. Los principales organismos internacionales donde se discuten estas reglas están dominados por potencias con mayor desarrollo tecnológico, lo que deja a América Latina en una posición de desventaja.

También se observó que las mega-constelaciones lanzadas por grandes corporaciones ocupan cada vez más espacio en las órbitas más demandadas. Esto reduce las oportunidades para que los países latinoamericanos instalen sus propios satélites y eleva los costos de acceso al espacio.

La ética de la sostenibilidad orbital exige que la región tenga una voz más activa en los debates globales, que impulse mecanismos regionales de cooperación y que promueva prácticas responsables para mitigar la basura espacial. Si no se toman medidas a tiempo, el entorno orbital podría volverse menos seguro, más costoso y menos accesible

para los países que recién están desarrollando sus capacidades espaciales.

En quinto lugar, el análisis permitió concluir que la cooperación internacional, a pesar de ser un elemento esencial para el avance espacial regional, aún presenta características que reproducen desigualdades históricas. Muchos acuerdos firmados entre países latinoamericanos y potencias tecnológicas no se basan en relaciones completamente equitativas.

En algunos casos, los beneficios se distribuyen de forma desigual, y los países de la región reciben menos transferencia de conocimientos o acceso a tecnologías que lo que se esperaría en un intercambio justo. Esta situación mantiene a América Latina en una posición dependiente, donde se limita la posibilidad de desarrollar capacidades propias y se dificulta la construcción de autonomía tecnológica a largo plazo.

Además, algunos convenios no incluyen cláusulas claras sobre propiedad intelectual, soberanía de datos o participación local en procesos de diseño y fabricación esto genera dudas éticas, ya que las decisiones sobre tecnología espacial deberían priorizar el bienestar público y la construcción de capacidades internas. Para avanzar hacia un modelo más justo, la región necesita promover una cooperación basada en la transparencia, la reciprocidad, la corresponsabilidad tecnológica y la transferencia real de conocimientos.

También es necesario fortalecer alianzas dentro de la propia región, ya que la cooperación latinoamericana puede convertirse en una estrategia clave para reducir desigualdades y avanzar hacia un desarrollo espacial más autónomo.

Finalmente, al integrar todos estos hallazgos, se puede concluir que el desarrollo espacial en América Latina debe orientarse hacia un modelo más ético, justo y sostenible, donde la tecnología sea utilizada para mejorar la vida de las personas y no para intensificar desigualdades o reproducir situaciones de dependencia.

La región tiene potencial para crecer, pero necesita fortalecer su participación internacional, mejorar sus marcos regulatorios, invertir en educación científica y promover políticas que protejan el interés público.

También necesita fomentar una cultura de gobernanza responsable, donde se privilegie la transparencia, la cooperación justa, la sostenibilidad ambiental y el respeto a los derechos ciudadanos. Solo mediante un enfoque ético y estratégico será posible que América Latina participe de forma más equitativa en el futuro sector espacial global.



**CAPITULO VI: Comercio y administración
sostenible del agua en misiones espaciales: modelo
ético de generación, reutilización y gestión hídrica
adaptada al ser humano**



Docente de la Universidad de Guayaquil

Delia Alexandra Cevallos Castro

Estudiantes de Licenciatura en comercio Exterior

Andrade Moran Kenny Oded

Cruz Jiménez Byron Hernán

Luzárraga Mora Fausto Alejandro

6.1. Resumen

Este estudio analiza la gestión sostenible del agua en misiones espaciales tripuladas desde una perspectiva técnica, ética y político-

económica. Justifico la investigación en la necesidad de comprender la vulnerabilidad hídrica en entornos extraplanetarios, donde el agua se convierte en un recurso finito, crítico y tecnológicamente mediado. El objetivo del trabajo es evaluar la eficiencia real de los sistemas de recuperación hídrica, identificar sus riesgos operativos y examinar los vacíos normativos que condicionan su futuro uso y eventual explotación comercial. Empleo un diseño documental-analítico basado principalmente en fuentes primarias de agencias espaciales, artículos indexados y marcos legales internacionales. Los resultados muestran discrepancias entre eficiencias nominales y operativas, impacto significativo del biofouling y ausencia de regulación específica sobre recursos hídricos extraterrestres. Concluyo que la sostenibilidad hídrica espacial exige integrar ingeniería avanzada, modelos fisiológicos dinámicos y gobernanza ética multinivel.

Palabras clave: Recursos hídricos, Tecnología espacial, Sostenibilidad, Gestión, Exploración espacial

6.2.Introducción

La literatura técnica y reportes operativos indican una brecha entre eficiencia nominal (diseñada en banco) y eficiencia operativa en vuelo, causada por la degradación de membranas, acumulación de compuestos orgánicos y eventos de biofouling que reducen la capacidad del Water Processor Assembly y elevan la necesidad de intervenciones de mantenimiento. Este desfase operativo plantea riesgos sistémicos que no pueden mitigarse exclusivamente con mejoras puntuales de componentes: requieren rediseño del ciclo de mantenimiento, automatización diagnóstica y políticas de redundancia.

En microgravedad, la ausencia de fuerzas gravitatorias dominantes altera las condiciones de separación de fases (e.g., burbujas, estratificación), incrementando la complejidad de procesos como destilación por compresión de vapor, ósmosis y filtración por membranas. Además, la formación de biofilms en superficies internas genera pérdidas de rendimiento y riesgos de contaminación persistente: organismos como *Pseudomonas* spp. muestran

crecimiento y adhesión facilitada bajo condiciones simuladas de microgravedad, lo que exige controles redundantes (sensórica en línea, estrategias de limpieza/antifouling, tratamientos de choque). Estos desafíos técnicos tienen impacto directo en el diseño del balance de masa, la programación de mantenimientos y en la definición de reservas de agua de contingencia.

Cuando el recurso es finito y el fallo del sistema compromete la supervivencia, emerge la necesidad de un marco de priorización que combine criterios médicos (salud y función vital), operativos (mantenimiento de sistemas críticos) y distributivos (equidad entre tripulantes). La toma de decisiones en crisis puede requerir protocolos predefinidos, delegación de autoridad y trazabilidad de decisiones (logs autónomos/telemetría). En paralelo, la perspectiva de convertir el agua espacial en objeto de extracción y comercio (p. ej., hielo lunar, recursos de asteroides) obliga a desarrollar instrumentos normativos que eviten la apropiación unilateral y promuevan acceso equitativo, transparencia y responsabilidad ambiental interplanetaria. La seguridad hídrica espacial, por tanto, exige tanto controles técnicos como instituciones normativas con alcance internacional.

6.3. Metodología

La presente investigación adopta un **enfoque cualitativo–analítico de carácter técnico**, sustentado esencialmente en fuentes primarias y secundarias de alta validez científica. El objetivo metodológico es caracterizar, desde una perspectiva rigurosa, la dinámica técnica, operativa y ética de la gestión del agua en misiones espaciales tripuladas, considerando los avances actuales en sistemas de soporte vital (ECLSS), las limitaciones físicas de la microgravedad y los marcos regulatorios emergentes sobre extracción y uso de recursos extraplanetarios.

6.3.1. *Diseño de investigación*

- **Naturaleza del diseño: documental técnico con énfasis en fuentes primarias**

La investigación se estructura a partir de fuentes primarias como:

- **Artículos científicos en revistas indexadas** que incluyen datos empíricos obtenidos en estaciones espaciales, módulos experimentales, vuelos parabólicos o cámaras de microgravedad simulada.
- **Documentos legales internacionales vigentes** (Tratado del Espacio Ultraterrestre, Artemis Accords) que proporcionan el marco político y económico en el que se desarrolla la extracción, uso y eventual comercialización del agua espacial.
- **Estudios de política científica y economía espacial** que analizan la evolución del comercio de recursos extraterrestres y los intereses geopolíticos de potencias espaciales emergentes.

El predominio de estas fuentes primarias permite estudiar la gestión hídrica en misiones espaciales desde una base empírica sólida, evitando especulaciones y garantizando un análisis anclado en la realidad científica contemporánea.

➤ **Enfoque político–económico incorporado en el diseño**

El diseño reconoce que la gestión del agua en el espacio no es únicamente un problema técnico, sino también un fenómeno inmerso en **contextos político–económicos** globales. Por ello, las fuentes primarias incluyen información relativa a:

a. Competencia geoestratégica por recursos extraterrestres

Las agencias espaciales trabajan bajo marcos financieros y políticos que influyen directamente en cómo se prioriza la extracción de agua, la inversión en tecnologías de reciclaje y los acuerdos internacionales de cooperación.

b. Regulación internacional y gobernanza

Documentos como los *Artemis Accords*, la legislación estadounidense (*Commercial Space Launch Competitiveness Act*, 2015) o los lineamientos de ESA revelan cómo los intereses políticos moldean la manera en que se conceptualiza la propiedad, explotación y comercio del agua localizada fuera de la Tierra.

c. Economía del transporte espacial

Los costos de lanzamiento, los programas de abastecimiento (Commercial Resupply Services de NASA) y el mercado emergente de in-situ resource utilization (ISRU) condicionan cómo se planifican las tecnologías hídras para misiones de larga duración.

Este análisis vincula los datos técnicos con las estructuras de poder, financiamiento e intereses económicos que determinan la viabilidad real de los sistemas de gestión hídrica en misiones espaciales.

Desarrollo

Yo analizo la gestión hídrica en misiones espaciales como un sistema altamente integrado donde convergen ingeniería, biología, economía política y bioética aplicada. Esta integración me permite reconocer que el agua no funciona únicamente como un recurso físico, sino como un vector de estabilidad sistémica que determina la supervivencia humana, la continuidad operativa y la gobernanza interna de cualquier misión tripulada. Cuando examino los componentes técnicos, encuentro que los sistemas de soporte vital (ECLSS), especialmente los módulos de recuperación UPA y WPA, sostienen tasas nominales de recuperación que superan el 90%; sin embargo, al revisar los reportes operativos recientes, veo que estas cifras alcanzan ese nivel solo cuando las condiciones son óptimas, ya que el rendimiento real en microgravedad sufre variaciones asociadas a la acumulación de contaminantes orgánicos, degradación de membranas y aparición de biofilms persistentes. Estudios recientes en revistas indexadas como *Life Sciences in Space Research* y *npj Microgravity* demuestran que microorganismos como *Burkholderia* y *Pseudomonas* adoptan estructuras más complejas en ausencia de

gravedad, lo que complica su remoción y reduce la eficiencia de los filtros. Estos hallazgos me obligan a considerar el agua no como un flujo purificado estable, sino como un medio dinámico que responde activamente a las perturbaciones del entorno.

Cuando evalué la dinámica de fluidos en microgravedad, observo que las técnicas tradicionales de separación no funcionan como en la Tierra. Sin gravedad, el comportamiento del flujo deja de ser laminar o estratificado y se convierte en un movimiento dominado por fuerzas capilares y tensiones superficiales. Este fenómeno altera procesos fundamentales como la destilación por compresión de vapor y la ósmosis inversa. Los artículos de 2020–2024 en *Acta Astronautica* y *Journal of Membrane Science* confirman que las membranas experimentan deformaciones microscópicas y variaciones en la presión diferencial, lo que produce un desgaste acelerado y una disminución progresiva del flujo permeado. Al comprender este comportamiento, concluyo que cualquier sistema hídrico espacial debe ser rediseñado para operar bajo principios de microfluidica capilar, incorporando sensores redundantes, monitoreo espectroscópico de compuestos orgánicos y algoritmos autónomos que ajusten parámetros en tiempo real.

Yo examino también el papel del metabolismo humano dentro del ciclo hídrico. La fisiología en microgravedad modifica la excreción renal, altera la distribución hídrica corporal y reduce la sensación de sed. La literatura reciente en *Frontiers in Physiology* demuestra que los astronautas presentan una diuresis irregular, densidad urinaria variable y cambios en la concentración de electrolitos que afectan directamente la carga de entrada del UPA. Esto significa que la gestión del agua no puede diseñarse como un sistema fijo, sino como un ciclo adaptable a la biología fluctuante del tripulante. Yo sostengo que cualquier protocolo hídrico debe integrar modelos fisiológicos predictivos que anticipen variaciones metabólicas durante misiones prolongadas.

Al ampliar mi análisis hacia los aspectos administrativos, identifiqué que la gestión del agua exige una gobernanza interna basada en principios de transparencia, equidad y priorización. Como el recurso es finito y la regeneración no siempre compensa la demanda, yo

considero imprescindible diseñar un marco jerarquizado de uso: primero la hidratación humana basada en parámetros clínicos; después la demanda operacional de sistemas térmicos y biológicos; finalmente, actividades rutinarias no críticas. La literatura en ética aplicada y administración del riesgo, especialmente artículos recientes en *Space Policy* y *Journal of Space Safety Engineering*, respalda la necesidad de construir algoritmos de toma de decisiones que integren biomarcadores, disponibilidad hídrica y modelos de riesgo acumulado.

Examino también el componente político-económico que condiciona toda la infraestructura hídrica. Ningún sistema operativo es neutral: depende de presupuestos, prioridades estratégicas y políticas de cooperación internacional. Los análisis recientes sobre el programa Artemis, publicados en *Space Policy* y *New Space*, muestran que la disponibilidad futura de agua lunar —en forma de hielo, principalmente en cráteres polares— ya está generando tensiones geopolíticas encubiertas. Cuando reviso estos estudios, observo que la gestión hídrica espacial no solo garantiza la vida, sino que también constituye una futura moneda de interés estratégico para las potencias que buscan controlar recursos in situ (ISRU). Este contexto político me obliga a situar el desarrollo tecnológico dentro de una matriz de intereses, donde los avances en reciclaje no son únicamente mejoras técnicas, sino decisiones que reflejan intenciones económicas y diplomáticas.

Finalmente, analizo la convergencia entre tecnología, ética y gobernanza. Las decisiones sobre distribución, racionamiento y priorización del agua no pueden recaer únicamente en sistemas automáticos, pero tampoco pueden depender por completo de juicios individuales. Los estudios de los últimos cinco años en ética de sistemas autónomos y gobernanza algorítmica, publicados en *AI & Society* y *Ethics and Information Technology*, indican que los sistemas críticos deben operar bajo un modelo híbrido: algoritmos supervisados, auditorías internas, trazabilidad de decisiones y protocolos que eviten sesgos o inequidades. Yo sostengo que este equilibrio es indispensable para misiones de larga duración, donde la estabilidad psicológica, la equidad interna y la cohesión del equipo dependen directamente de la percepción de justicia en la

administración del recurso más esencial para la vida.

En conjunto, este desarrollo evidencia que la gestión hídrica en misiones espaciales es un sistema vivo, vulnerable, altamente técnico y profundamente humano. Al integrar datos empíricos, análisis crítico y contexto político-económico, yo concluyo que la sostenibilidad hídrica no solo se construye con ingeniería avanzada, sino con decisiones éticas consistentes y estructuras administrativas que respeten la dignidad humana y la seguridad colectiva.

6.4.Resultados

Yo examino los resultados de esta investigación integrando datos operativos provenientes de fuentes primarias —principalmente los reportes técnicos de NASA y ESA— con artículos científicos revisados por pares y documentos legislativos internacionales. Este contraste me permite identificar hallazgos consistentes, divergencias significativas y vacíos críticos que influyen directamente en la sostenibilidad hídrica de las misiones espaciales.

En primer lugar, cuando comparo los valores nominales de recuperación hídrica del *Water Recovery System* (WRS) de la Estación Espacial Internacional con los datos reales de operación, observo una diferencia sustancial. Los informes ICES 2022, 2023 y 2024 indican que el sistema alcanza una recuperación teórica del 90–93%, pero los datos empíricos muestran fluctuaciones que oscilan entre el 82% y el 91%, dependiendo del estado de las membranas, la carga orgánica y la presencia de biofilms en los circuitos internos. Este comportamiento no aparece reflejado con la misma claridad en artículos secundarios que suelen citar la cifra nominal sin detallar las variaciones operativas. Este contraste me permite afirmar que la literatura secundaria tiende a idealizar el rendimiento, mientras que las fuentes primarias revelan vulnerabilidades aún no resueltas.

En segundo lugar, yo identifico una correspondencia clara entre los resultados biológicos observados en estudios de microgravedad y los

problemas de biofouling mencionados en reportes operativos. Artículos recientes publicados en *npj Microgravity* y *Life Sciences in Space Research* muestran que bacterias como *Burkholderia contaminans*, detectada en el sistema hídrico de la ISS, exhiben estructuras de biofilm más densas en microgravedad y patrones de resistencia mayores que en condiciones terrestres. Cuando contrasto estos hallazgos con los reportes de mantenimiento de NASA, encuentro correspondencia directa: ambas fuentes señalan que la proliferación microbiana es uno de los principales factores que reducen la eficiencia del sistema. Este alineamiento entre fuentes primarias y secundarias confirma que la variable microbiológica sigue siendo un riesgo operativo de alto impacto.

En tercer lugar, al analizar los documentos legislativos como el Tratado del Espacio Ultraterrestre (1967) y los Artemis Accords (2020–2024), descubro un vacío regulatorio crítico: ninguno de estos marcos ofrece directrices específicas sobre la extracción, propiedad o comercialización del agua obtenida en entornos extraterrestres. Mientras que los artículos científicos sobre recursos in situ (ISRU) proponen modelos de gobernanza técnica, los documentos legales mantienen un grado de ambigüedad que permite interpretaciones divergentes entre países. Este contraste evidencia que, a nivel normativo, la gestión del agua espacial se encuentra desregulada, situación que contrasta fuertemente con la complejidad técnica ya alcanzada por los sistemas de extracción y reciclaje.

Además, cuando evaluo los resultados en clave fisiológica, encuentro que los datos de *Frontiers in Physiology* sobre alteraciones renales y metabólicas en microgravedad coinciden con el aumento de la carga orgánica en la orina procesada por el UPA, descrita en los reportes primarios. Esta coincidencia confirma que la fisiología humana impacta directamente los sistemas hídricos y que cualquier misión de larga duración debe integrar modelos predictivos basados en biomarcadores dinámicos.

Por último, al contrastar las fuentes operativas con estudios en política espacial, observo que las decisiones de financiamiento, competencia geopolítica y desarrollo tecnológico no ocurren en paralelo sino en interacción directa. La literatura secundaria en *Space Policy* sugiere

que los países priorizan tecnologías hídras en función de intereses estratégicos, algo que se refleja en la diferencia entre los sistemas de NASA, ESA, Rusia y China. Las fuentes primarias corroboran esta divergencia: NASA invierte en tecnologías de alto rendimiento energético, mientras que otras agencias priorizan sistemas robustos pero menos eficientes, debido a restricciones presupuestarias o prioridades geopolíticas.

En conjunto, estos resultados muestran que la sostenibilidad hídrica en misiones espaciales surge de una interacción compleja entre capacidades tecnológicas, riesgos biológicos, decisiones políticas y vacíos regulatorios. Las fuentes primarias aportan la evidencia operativa indispensable, mientras que las secundarias contextualizan y profundizan; sin embargo, la legislación aún no se articula con ninguno de estos niveles, creando una brecha que debe ser abordada para garantizar la viabilidad futura de la gestión del agua en entornos extraplanetarios.

6.5. Conclusiones

1. **La sostenibilidad hídrica en misiones espaciales depende del rendimiento real y no del nominal de los sistemas de recuperación**, ya que los datos operativos evidencian fluctuaciones significativas en la eficiencia del WRS debido a degradación de membranas, variaciones en la carga orgánica y formación persistente de biofilms. Esta discrepancia reafirma que cualquier modelo de gestión debe basarse en métricas operativas verificadas y no en estimaciones teóricas.
2. **La fisiología humana tiene un impacto directo en la carga hídrica y en la exigencia operativa del sistema UPA/WPA**, lo cual demuestra que los modelos de gestión del agua deben integrar variables biomédicas dinámicas. Las alteraciones en hidratación, densidad urinaria y metabolismo, observadas en estudios fisiológicos y corroboradas por reportes operativos, revelan que el comportamiento hídrico del astronauta es parte estructural

del sistema y no una entrada pasiva.

3. **La gobernanza del agua espacial presenta un vacío normativo crítico**, ya que los tratados y acuerdos internacionales no definen directrices operativas ni límites sobre la propiedad, extracción o comercialización del agua en cuerpos extraterrestres. Este vacío contrasta con el avance tecnológico documentado en las fuentes primarias y genera riesgos geopolíticos, comerciales y ambientales que podrían comprometer la cooperación internacional en misiones futuras.
4. **El análisis comparado demuestra que la gestión del agua no puede abordarse de forma aislada**, porque depende de la interacción simultánea entre ingeniería de sistemas, microbiología, fisiología humana, economía espacial y marcos regulatorios internacionales. Los resultados muestran que la sostenibilidad hídrica solo es alcanzable mediante modelos integrados de diseño, operación y ética administrativa que contemplen tanto las limitaciones técnicas como los factores político-económicos.
5. **El equilibrio entre automatización y supervisión humana emerge como condición necesaria para la gestión ética del agua**, porque las decisiones de racionamiento, priorización o redistribución del recurso no pueden dejarse exclusivamente a algoritmos, pero tampoco pueden depender por completo de criterios humanos en situaciones de estrés o riesgo operativo. Esta conclusión surge de los resultados que muestran la importancia de integrar trazabilidad, supervisión híbrida y protocolos éticos predefinidos.



CAPITULO VII: Gobernanza y cooperación internacional en la era espacial



Docente de la Universidad de Guayaquil

Julio Antonio Baque Mieles
Guido Homero Poveda Burgos

Estudiantes de Licenciatura en comercio Exterior

Luis Campozano Viteri
Danna Quinchuqui Aguilar
Dave Gualli Naula
Gabriel Barreiro Zambrano

7.1. Resumen

Esta investigación examina la gobernanza y la cooperación internacional en la era espacial contemporánea, en un contexto donde la actividad espacial se ha diversificado con la participación creciente de potencias emergentes y empresas privadas. El estudio se justifica por la necesidad urgente de actualizar los marcos jurídicos y políticos que regulan el espacio exterior, frente a desafíos como la militarización, la gestión del tráfico espacial, la explotación de

recursos y la sostenibilidad orbital. El objetivo principal es analizar cómo los actuales mecanismos de cooperación pueden garantizar un uso pacífico, seguro y equitativo del espacio. La metodología empleada se basa en una revisión documentada y comparativa de tratados, informes de organismos internacionales y casos emblemáticos de cooperación multilateral. Los resultados evidencian que la normativa vigente es insuficiente y fragmentada, mientras que la cooperación internacional continúa siendo el eje más efectivo para enfrentar riesgos globales. Se concluye que la comunidad internacional debe avanzar hacia acuerdos modernos y vinculantes que regulen actividades emergentes y aseguren la preservación del espacio como patrimonio común de la humanidad.

Palabras clave: Gobernanza espacial, cooperación internacional, tratados espaciales, sostenibilidad orbital, economía espacial.

7.2. Introducción

El espacio exterior ya no es un territorio reservado únicamente a las grandes potencias o a la exploración científica tradicional. En los últimos años, hemos sido testigos de una transformación profunda: nuevos países, empresas privadas e incluso universidades han ingresado en la carrera espacial, generando un escenario mucho más dinámico y competitivo.

Esta expansión ha hecho evidente que la normativa vigente, creada en un contexto totalmente distinto, ya no es suficiente para regular las actividades que hoy se desarrollan más allá de la atmósfera. Por esta razón, resulta urgente reflexionar sobre cómo se está gestionando el espacio y qué tipo de cooperación internacional es necesaria para garantizar que su uso sea seguro, pacífico y equitativo.

La gobernanza espacial se ha convertido en un tema estratégico que involucra aspectos jurídicos, económicos, tecnológicos y de seguridad. Sin embargo, gran parte de los acuerdos actuales se creó en plena Guerra Fría, en una época en la que no existían proyectos como las megaconstelaciones satelitales, el turismo espacial o la explotación de recursos extraterrestres.

Esto significa que las reglas actuales no alcanzan para enfrentar problemas como la militarización del espacio, la basura espacial o la competencia comercial entre actores públicos y privados.

Frente a este panorama, la cooperación entre Estados y organizaciones internacionales no es solo una alternativa, sino la única vía para prevenir conflictos y construir un marco común que permita desarrollar actividades espaciales de manera responsable.

Desde nuestra perspectiva, hablar de gobernanza espacial hoy implica reconocer que el espacio es un bien compartido y que su futuro depende de decisiones colectivas. La comunidad internacional necesita avanzar hacia acuerdos más modernos, inclusivos y vinculantes, que respondan a los retos de la era espacial contemporánea.

Este capítulo analiza esa problemática, considerando tanto las debilidades del sistema actual como las oportunidades que ofrece la cooperación multilateral para asegurar que el espacio continúe siendo un patrimonio común de la humanidad y no un nuevo escenario de desigualdad y disputa.

7.3. Metodología

El presente trabajo adopta un enfoque cualitativo–documental basado en la revisión sistemática de literatura científica publicada en los últimos cinco años en bases de alto impacto como Scopus, Web of Science y Journal Citation Reports.

Se priorizan artículos que aborden la gobernanza espacial desde perspectivas político–económicas, jurídicas y geoestratégicas. Este diseño resulta adecuado debido a la naturaleza emergente y multidisciplinaria del fenómeno espacial contemporáneo, donde el análisis crítico de documentos oficiales, tratados, acuerdos multilaterales y reportes técnicos permite comprender la evolución normativa, los desafíos institucionales y los modelos de cooperación actualmente vigentes.

El uso de fuentes primarias —como tratados espaciales, resoluciones de Naciones Unidas y acuerdos bilaterales— aporta rigor y sustento analítico, mientras que las fuentes secundarias recientes complementan el marco con evaluaciones científicas de casos contemporáneos. Esta metodología permite identificar vacíos regulatorios, tensiones geopolíticas y prácticas de colaboración efectiva, ofreciendo así una visión integral y actualizada.

Desarrollo

1. Transformación del entorno espacial contemporáneo

En los últimos cinco años, el espacio exterior ha experimentado un crecimiento sin precedentes debido al aumento de actores estatales, empresas privadas y consorcios multinacionales. Según estudios recientes (Martínez, 2023), el número de satélites operativos se duplicó entre 2019 y 2024, impulsado por proyectos de mega constelaciones y privatización de servicios espaciales. Esta expansión plantea desafíos urgentes en materia de tráfico espacial, sostenibilidad orbital y seguridad internacional.

2. Gobernanza espacial: marco normativo vigente

El régimen internacional se sustenta principalmente en cinco tratados elaborados entre 1967 y 1979, aún vigentes, aunque cada vez más insuficientes para la realidad actual. Investigaciones de (Torres, 2021) sostienen que el Tratado del Espacio Exterior carece de disposiciones específicas para temas como explotación de recursos lunares, militarización tecnológica y responsabilidad por daños derivados de mega constelaciones. La ausencia de actualización normativa evidencia la necesidad de nuevos mecanismos multilaterales.

3. Cooperación internacional: avances recientes

Durante los últimos cinco años, la cooperación espacial ha adoptado nuevas modalidades como alianzas público-privadas, plataformas multiactor y acuerdos bilaterales de alta complejidad tecnológica. Por ejemplo, los Acuerdos Artemisa —analizados por Li y Wang (2022)— promueven la exploración lunar bajo principios comunes, aunque generan debates sobre su compatibilidad con el derecho espacial clásico.

Asimismo, la Unión Europea, Japón y Canadá han ampliado sus programas conjuntos con la NASA, fortaleciendo la diplomacia científica y la interoperabilidad tecnológica. Estudios de (Roca, 2024) muestran que estas alianzas no solo fortalecen capacidades científicas, sino que también funcionan como mecanismos estabilizadores frente a tensiones geopolíticas.

4. Retos actuales: militarización, seguridad y sostenibilidad

La militarización del espacio se ha intensificado. Reportes de defensa internacional señalan que al menos nueve países han desarrollado capacidades antisatélite entre 2020 y 2024.

Esto genera riesgos de escalamiento y aumenta la producción de desechos espaciales, un problema ampliamente documentado por (Cheb, 2023). Bajo este escenario, organismos como la ONU promueven códigos de conducta voluntarios, aunque aún sin carácter vinculante.

La sostenibilidad orbital es otro desafío crítico. El uso intensivo de mega constelaciones provoca saturación de órbitas bajas y aumenta el riesgo de colisiones. De acuerdo con estudios recientes, cada colisión puede generar miles de fragmentos, afectando tanto misiones civiles como de investigación.

5. Nuevas tendencias en gobernanza global

Desde 2021 han surgido propuestas de gobernanza policéntrica que integran entidades estatales, privadas y académicas bajo modelos flexibles. Investigaciones de (Simmons, 2024) destacan la tendencia hacia marcos cooperativos abiertos, basados en transparencia de datos, interoperabilidad y códigos de buenas prácticas. Se reconoce que ninguna agencia, ni siquiera las potencias líderes, puede gestionar de manera individual los retos del entorno espacial moderno.

Conclusiones.

La gobernanza del espacio ultraterrestre se enfrenta hoy a un punto de inflexión. Con el aumento de actores estatales y privados, tecnologías emergentes y una intensificación de las misiones espaciales, los marcos legales y políticos heredados ya no son suficientes para responder a los desafíos contemporáneos. La cooperación


internacional se vuelve más crítica para mantener el espacio como un bien común cuyos beneficios estén disponibles de forma equitativa y sostenible Palit, Dias & Hazra, (2025)

En particular, existe una brecha creciente entre países del sur global y potencias espaciales tradicionales: los primeros requieren que la gobernanza espacial incorpore mecanismos de participación justa para asegurar que no se reproduzca el desequilibrio del poder terrestre en el espacio.


A su vez, la seguridad espacial no solo implica colisiones físicas o basura orbital, sino también amenazas cibernéticas: la gobernanza de la ciberseguridad espacial ha emergido como un área clave en la regulación espacial, especialmente en legislaciones futuras de la Unión Europea (Casaril., 2025)

Además, la explotación de recursos extraterrestres —como la minería de asteroides o de la Luna— exige un nuevo equilibrio entre el derecho internacional y las normativas nacionales. En este sentido, estudios recientes han llamado la atención sobre cómo los marcos legales nacionales, como los de China, están configurando la gobernanza global de los recursos espaciales (Univiar, 2024)

Dado este escenario, este trabajo propone explorar cómo los principios de gobernanza y la cooperación internacional deben evolucionar para responder a los retos de la “nueva era espacial”: uno en el que el espacio sigue siendo una frontera estratégica, pero también un dominio compartido que requiere regulación moderna, inclusiva, resiliente y ética.



**CAPITULO VIII: Más allá de la tierra ¿ Cómo
prepararnos para vivir en el espacio?**



Docente de la Universidad de Guayaquil

Clara Augusta Cabrera Jara

Guido Homero Poveda Burgos

Estudiantes de Licenciatura en comercio Exterior

Baquerizo Pita Marissa

Maquilón Burbano Dagmar

Robles Monserrate Alejandro

Veintimilla Rosas Kerly

8.1. Resumen

Esta investigación aborda la planificación estratégica para el establecimiento humano permanente en el espacio ultraterrestre. Su objeto es analizar los criterios geofísicos y astropolíticos que determinan la selección de bases, y definir la capacitación integral requerida para futuros colonos. Se emplea metodología exploratoria y documental, priorizando el análisis de fuentes primarias que contrastan contextos político-económicos (Ortiz et al., 2020). Los resultados establecen un modelo que integra la infraestructura autosuficiente (ISRU y blindaje) con la resiliencia del capital humano. Las conclusiones destacan que la viabilidad a largo plazo depende de la autosuficiencia tecnológica (Cesaretti et al., 2014; Li et al., 2018), la resiliencia psicológica (Stepanova et al., 2019) y un consenso de gobernanza internacional que gestione la explotación ética de recursos (Williamson, 2021; Milligan, 2019). El éxito requiere un capital humano polivalente y la promoción continua de programas STEM (NASA, 2025; NASA, n.d.-a).

Palabras clave: Exploración espacial, asentamientos humanos, capacitación técnica, bases fuera de la Tierra, geopolítica.

8.2. Introducción

La humanidad se posiciona en un umbral decisivo, proyectando su futuro hacia el establecimiento de asentamientos permanentes en el espacio ultraterrestre. Este hito representa un desafío logístico, geopolítico y humano sin precedentes. La justificación de esta investigación radica en la urgente necesidad de abordar la preparación para la vida fuera de la Tierra de forma integral, analizando no solo la infraestructura necesaria para la supervivencia física, sino también el factor humano y los marcos de gobernanza que deben asegurar una expansión pacífica y sostenible. La humanidad se encuentra en la cúspide de un cambio de paradigma existencial: la transición de ser una especie exclusivamente terrestre para convertirse en una civilización multi planetaria. Este proceso no es un anhelo meramente exploratorio, sino una necesidad estratégica para la supervivencia a largo plazo ante amenazas latentes de origen terrestre o cósmico. Ante el riesgo de catástrofes globales o la saturación de los recursos

planetarios, la expansión hacia el espacio surge como el siguiente paso lógico y esencial (Rees, 2018). Sin embargo, establecer una presencia humana permanente más allá de la Tierra es un desafío de complejidad sin precedentes, que requiere la integración de dos pilares fundamentales: la identificación de sedes espaciales estratégicas y la capacitación integral de los aspirantes. La visión académica actual identifica que el éxito depende de un sistema complejo donde la sede y el colono forman un ecosistema simbiótico. Una sede mal elegida, carente de protección o recursos vitales, hará inviable incluso al equipo mejor entrenado, y los colonos mal preparados fracasarán en un entorno que no soporte sus necesidades básicas. Esta interdependencia crítica constituye la justificación central del presente estudio (Stepanova et al., 2019). Este trabajo analiza en profundidad los criterios de selección para la ubicación de bases espaciales, considerando elementos geológicos esenciales para el soporte vital, la disponibilidad de recursos, las condiciones de iluminación para la viabilidad energética y los factores políticos y éticos. Además, examinamos los programas contemporáneos de entrenamiento físico, psicológico y técnico implementados por agencias como la NASA, con el fin de garantizar la seguridad y el desempeño humano en ambientes extraterrestres de alta hostilidad. El objetivo final es establecer un modelo de preparación integral que permita la sostenibilidad y la expansión pacífica de la presencia humana en el cosmos. La estructura del trabajo aborda los siguientes ejes fundamentales:

- Infraestructura, Geofísica y Gobernanza: Análisis detallado de la Utilización de Recursos In-Situ (ISRU) como factor de supervivencia, la arquitectura de blindaje radiológico y el impacto del marco regulatorio internacional en la selección de bases permanentes.
- El Capital Humano y la Resiliencia: El estudio de la resiliencia psicológica ante el confinamiento prolongado, las competencias técnicas requeridas para el colono polivalente y la estrategia de formación de nuevas generaciones a través de programas STEM.

El estudio se basa rigurosamente en literatura académica actual, informes institucionales y publicaciones revisadas por pares, ajustándose estrictamente a la normativa APA 7.^a edición.

8.3. Metodología

8.3.1. *Diseño de Investigación*

Adoptamos un diseño exploratorio y documental de carácter cualitativo. Este diseño resulta idóneo para sintetizar los criterios fundamentales para la habitabilidad extraterrestre y los protocolos de capacitación, a través de la revisión rigurosa de literatura especializada. Este diseño es fundamental para compilar y contrastar información técnica y científica dispersa, proveniente de diversas disciplinas (ingeniería aeroespacial, geofísica, psicología espacial y derecho internacional), con el fin de construir un modelo de preparación integral que no puede basarse en un único experimento de campo, sino en la convergencia de datos científicos consolidados y análisis estratégicos. Este diseño presenta la ventaja de permitir un análisis crítico y contextualizado, esencial para la publicación del artículo. Fuentes y Criterios de Selección El rigor metodológico se fundamenta en la priorización de fuentes primarias y artículos indexados para sustentar cada afirmación. Las directrices de la investigación enfatizan que las fuentes primarias deben ser empleadas al máximo posible. Por ello, priorizamos los artículos que emplean estos datos, considerando los contextos político-económicos en los que se insertan las investigaciones y/o ensayos (Ortiz et al., 2020). Esto asegura que los criterios de selección de bases (Mazarico et al., 2011; Lunar Exploration Analysis Group – NASA, 2022) y los protocolos de capacitación (NASA, 2025; Stepanova et al., 2019) están respaldados por el conocimiento científico y la experiencia operacional más relevante y actualizada. La metodología de estudio se justifica en la necesidad de aplicar el sentido crítico al contrastar información entre fuentes primarias, secundarias, legislativas y datos de todo tipo, de forma coherente y contextualizada, para sustentar un plan de preparación integral y viable para la vida más allá de la Tierra. La rigurosidad en la cita y referencia se garantiza mediante la

aplicación estricta de la normativa APA 7.^a edición en todo el documento.

8.4. Desarrollo

a) La Viabilidad de la Infraestructura y la Gobernanza Espacial

El establecimiento de bases permanentes más allá de la Tierra exige la consideración simultánea de criterios geofísicos que garantizan la supervivencia, y criterios geopolíticos que aseguran la paz y la cooperación en el uso de los recursos, factores que son inherentemente interdependientes en la carrera espacial contemporánea.

Recursos In-Situ (ISRU)

El Factor de Autosuficiencia y Propulsión La dependencia continua de la Tierra para el suministro de recursos vitales (agua, oxígeno, materiales) hace que cualquier misión de larga duración sea insostenible en términos económicos y logísticos. Por esta razón, la Utilización de Recursos In-Situ (ISRU) se convierte en el pilar fundamental para la autosuficiencia de las bases permanentes. Este principio implica no solo la extracción, sino también el procesamiento y la transformación de materiales encontrados en el entorno extraterrestre. (National Aeronautics and Space Administration, 2020).

El Agua como Recurso Primordial y Vector de Propulsión

El recurso más crítico para el soporte vital y la propulsión es el agua. El hito científico confirmado por Li et al. (2018) sobre la evidencia directa de hielo de agua expuesto en las regiones polares de la Luna, especialmente en cráteres permanentemente sombreados (CPS), convierte a estas áreas en objetivos estratégicos prioritarios. La extracción de este hielo puede proporcionar tres elementos vitales que garantizan la habitabilidad y la movilidad: agua potable, oxígeno respirable y, mediante el proceso de electrólisis, hidrógeno y oxígeno líquidos que son esenciales como propelentes. Crawford (2021) enfatiza que esta capacidad de producción local de propelente puede crear una verdadera economía espacial alrededor de un puesto avanzado lunar, reduciendo drásticamente los costos de las misiones

más allá de la Luna (por ejemplo, hacia Marte) y haciendo realidad la visión de una presencia sostenida. (Crawford, 2021)

Arquitectura de Supervivencia

Blindaje Radiológico y Construcción Robótica con Regolito Un riesgo ambiental insuperable en la Luna y el espacio interplanetario es la exposición a la radiación ionizante (partículas cargadas, rayos cósmicos galácticos y eventos de eyección de masa coronal). La Luna carece de la atmósfera protectora y la magnetosfera robusta de la Tierra, lo que hace imperativa la construcción de hábitats que proporcionan un blindaje de masa sustancial. El blindaje con metal o materiales transportados desde la Tierra es logísticamente inviable debido a los altos costos de lanzamiento. La solución de ingeniería, y la única viable económicamente, es la Impresión 3D utilizando el regolito (el suelo superficial disponible en la Luna) como material de construcción principal (Cesaretti et al., 2014). Este método no solo permite crear estructuras masivas que actúan como blindaje, sino que también protege contra el constante bombardeo de micro meteoritos. Cesaretti et al. (2014) demostraron que esta técnica permite construir hábitats robustos, densos y potencialmente semienterrados, solucionando la necesidad de transportar materiales pesados y proporcionando la protección radiológica esencial para la salud a largo plazo de los colonos.

Geopolítica, Gobernanza y Selección Estratégica de Sedes.

La expansión espacial no puede separarse de su contexto político-económico. Los criterios de selección de sitios (Lunar Exploration Analysis Group – NASA, 2022) se basan en la tecnología y la ciencia, pero su operación está sujeta a un marco legal y estratégico.

Criterios de Selección Basados en la Energía y el Recurso.

La selección de sitios de aterrizaje está mediada por criterios rigurosos de:

- **Iluminación y Energía:** La capacidad de un sitio para recibir luz solar constante es crucial para el suministro de energía solar y para maximizar las ventanas operacionales. Mazarico et al. (2011) demostraron las condiciones de

iluminación del Cráter Shackleton, destacando la existencia de "picos de luz eterna" cerca de los polos, convirtiendo la viabilidad energética en un activo geoestratégico. La explotación de estas áreas es prioritaria en informes como el Artemis III Science Definition Report (NASA, 2023).

- **Aproximación a Recursos:** La proximidad a depósitos de hielo de agua es un factor determinante, tal como lo establece el Artemis Landing Site Analysis (Lunar Exploration Analysis Group – NASA, 2022). La combinación de iluminación constante y recursos hídricos define las zonas de interés estratégico que permiten la operación de los sistemas ISRU.

El Marco de Gobernanza y el Dilema de la Explotación de Recursos.

El marco de gobernanza, que regula la explotación de estos recursos y la ocupación territorial, es crucial para evitar conflictos y asegurar el futuro de la exploración. Williamson (2021) analizó las implicaciones del Tratado del Espacio Ultraterrestre en la gobernanza y la explotación espacial. A pesar de la prohibición de apropiación nacional, la explotación de recursos (ISRU) genera tensiones y lagunas legales no previstas. Milligan (2019) enfatizó las consideraciones éticas en la explotación de recursos extraterrestres, planteando la necesidad de un nuevo consenso global. El conflicto y la conciencia situacional espacial (SSA), como lo abordan Camargo y Correa (2020), se han convertido en temas de la geopolítica espacial contemporánea, haciendo que la cooperación internacional sea fundamental para la viabilidad a largo plazo de los asentamientos y la seguridad de los activos espaciales en órbita y en superficie. La importancia de la posición geográfica para plataformas de lanzamiento también es un factor geopolítico relevante (Ortiz et al., 2020).

El Surgimiento de Nuevos Marcos Políticos: Los Acuerdos Artemis

Ante el estancamiento y la ambigüedad del derecho espacial multilateral (Tratado del Espacio Ultraterrestre, 1967, y el Acuerdo

Luna, 1979) para abordar la minería espacial y la explotación de recursos (ISRU), Estados Unidos y sus socios han liderado la creación de los Acuerdos Artemis. Estos acuerdos políticos (*soft law*) se diseñaron para llenar las lagunas jurídicas y facilitar la exploración humana sostenida. Los Acuerdos Artemis reconocen explícitamente que la capacidad de extraer y utilizar recursos *in situ* en la Luna, Marte y otros cuerpos celestes puede ser **crítica para apoyar la exploración o la existencia fuera de la Tierra**. Si bien reafirman el principio de no apropiación territorial (Artículo II del OST), permiten la apropiación y el uso de los recursos extraídos, proporcionando el incentivo legal y económico necesario para la participación privada y la autosuficiencia de las bases.

Criterios Estratégicos para Sedes de Lanzamiento Terrestre

La viabilidad de las misiones comienza con la selección estratégica de la plataforma de lanzamiento en la Tierra, una decisión que equilibra la física con la geopolítica.

Ventaja Física (Latitud).

El criterio de eficiencia técnica prioriza la **proximidad al ecuador**. Los lanzamientos hacia el este desde latitudes bajas aprovechan al máximo la velocidad tangencial de la rotación terrestre, lo que se traduce en un impulso de velocidad adicional. Esta ventaja física se utiliza para reducir el consumo de propelente o aumentar la capacidad de carga útil. Por ejemplo, la Agencia Espacial Europea (ESA) capitaliza esta ventaja con su base en Kourou, Guayana Francesa.

Si bien el criterio geofísico apunta a la línea ecuatorial (latitud 0°) como la zona ideal para la máxima eficiencia de velocidad tangencial (Ortiz et al., 2020), la selección de la ubicación debe resolver la dicotomía de la seguridad. Desde una perspectiva de latitud, la costa ecuatoriana (específicamente la zona de Manabí o Esmeraldas) es pertinente por su proximidad a la latitud cero. Sin embargo, para capitalizar el impulso terrestre (lanzamiento al Este), la trayectoria pasaría sobre zonas pobladas (la Cordillera de los Andes). Esta situación obliga a considerar plataformas de lanzamiento marítimas o la pérdida de eficiencia al lanzar sobre el Océano Pacífico (Oeste),

demostrando que la seguridad y el control soberano priman sobre la eficiencia pura.

Prioridad Geoestratégica (Soberanía y Seguridad).

Las principales potencias, como Estados Unidos, han optado por emplazamientos como el Centro Espacial Kennedy y Cabo Cañaveral en Florida, a pesar de estar en una latitud menos eficiente. Esta elección obedece a la priorización de la seguridad operativa y la soberanía. Los lanzamientos se dirigen sobre el Océano Atlántico para garantizar que los escombros o las etapas de propulsión caigan en áreas despobladas en caso de fallo, un requisito crucial para operaciones tripuladas y militares. En este sentido, la capacidad de control autónomo y seguro sobre las plataformas de lanzamiento es un activo militar-estratégico ineludible.

b) El Factor Humano y la Capacitación Integral.

El ser humano, con sus complejidades biológicas y psicológicas, es el eslabón más vulnerable de la cadena de supervivencia espacial. Por lo tanto, la preparación debe ser integral, continua y enfocada en la autonomía.

Resiliencia Psicológica.

El Aislamiento y la Monotonía como Desafíos Operacionales Las misiones de larga duración, con su aislamiento, confinamiento y entornos extremos, exponen a los astronautas a desafíos psicosociales extremos que pueden comprometer el rendimiento de la misión. La misión análoga Mars-500, un experimento terrestre que simuló un viaje de 520 días a Marte proporcionó datos cruciales sobre los aspectos psicológicos y psicosociales de la tripulación (Stepanova et al., 2019).

Impacto del Aislamiento y la Monotonía en el Rendimiento Cognitivo

Según Stepanova et al. (2019) destacaron que el entorno de aislamiento y la rutina constante generan fatiga cognitiva, deterioro del estado de ánimo y alteraciones del ciclo circadiano. Estos factores no son solo problemas de confort, sino riesgos operacionales directos:

la perturbación del sueño afecta la capacidad de atención, el tiempo de reacción y el rendimiento en tareas críticas, incluyendo el mantenimiento de los sistemas ISRU y la gestión de la infraestructura de blindaje. La capacitación debe incorporar estrategias activas para mitigar el tedio, incluyendo la estimulación cognitiva, la diversificación de tareas y el mantenimiento de una conexión social estructurada, aunque sea retrasada.

Dinámica Grupal, Cohesión y Liderazgo Distribuido

La convivencia prolongada en un espacio reducido puede exacerbar los conflictos interpersonales y afectar la cohesión del equipo. La reducción de la privacidad y el incremento de la irritabilidad son consecuencias directas que impactan la seguridad de la misión. Es imperativo que la capacitación incluya técnicas de liderazgo distribuido, comunicación asertiva y resolución de conflictos bajo estrés crónico, ya que la intervención psicológica o médica externa será limitada o imposible debido a los retrasos de comunicación. El éxito de la misión dependerá de la capacidad de la tripulación para ser su propio sistema de soporte psicosocial.

Competencias Técnicas, Polivalencia y Desarrollo de Talento

El perfil del futuro astronauta requiere competencias técnicas polivalentes y la capacidad de operar y mantener infraestructuras complejas, como los sistemas ISRU, las plantas de soporte vital y el equipo de blindaje. En misiones de larga duración con retrasos significativos en la comunicación, la autonomía de reparación, diagnóstico y mantenimiento se convierte en la habilidad más crítica para la supervivencia.

La Selección del "Generalista Experto"

La NASA selecciona a candidatos a astronauta de la promoción 2025 buscando individuos con perfiles altamente técnicos y de liderazgo, capaces de adaptarse y tomar decisiones críticas de forma independiente (NASA, 2025). El colono ideal es un generalista experto que puede realizar medicina básica, geología de campo, e ingeniería de sistemas al mismo tiempo. La polivalencia técnica minimiza el riesgo de fallo de la misión ante la pérdida o incapacidad de un miembro del equipo especializado.

Requisitos de Calificación de la NASA

Los requisitos de calificación para el Programa de Candidatos a Astronauta (AstroCan) de la NASA se han adaptado para reflejar la naturaleza compleja y autónoma de las misiones Artemis. Los candidatos deben ser ciudadanos estadounidenses y poseer un título de Maestría en un campo STEM (ciencia, tecnología, ingeniería, matemáticas) de una institución acreditada.

Esta calificación de Maestría puede ser sustituida por alguna de las siguientes equivalencias:

- Dos años de trabajo completado hacia un programa doctoral en un campo STEM relacionado.
- Finalización de un título de Doctor en Medicina (MD), Osteopatía (DO), o un título médico relacionado.
- Finalización (o inscripción actual que resultará en finalización para junio de 2025) de un programa reconocido de escuela piloto de prueba en EE. UU.

Además, se requiere un mínimo de tres años de experiencia profesional relevante después de obtener el título, o 1,000 horas como Piloto al Mando de las cuales al menos 850 deben ser en aviones jet de alto rendimiento. Estas exigencias garantizan que el astronauta tenga una base científica y operativa avanzada para enfrentar desafíos multidisciplinares.

Preparación Temprana y Programas STEM.

El éxito a largo plazo de la expansión espacial depende de la formación de un pool de talento diverso. Las agencias espaciales promueven activamente los programas STEM (Ciencia, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas) dirigidos a estudiantes, y la NASA ofrece diez maneras en que los estudiantes pueden prepararse para ser astronautas (NASA, n.d.-a). Este esfuerzo de divulgación y educación asegura que las futuras generaciones estén equipadas con la base educativa y técnica necesaria, garantizando la sostenibilidad de la civilización multi planetaria y la continuidad del esfuerzo exploratorio.

Protocolos de Capacitación Integral: Cuerpo y Mente

El entrenamiento de los AstroCan tiene una duración de dos años e incluye el aprendizaje de habilidades básicas como las caminatas espaciales (EVA) y la operación de la Estación Espacial Internacional (ISS). No obstante, la preparación es mucho más profunda, abordando las dimensiones física y psicológica de la supervivencia:

- **Acondicionamiento Físico Científico:** El entrenamiento físico se basa en una sólida comprensión de la fisiología aeroespacial. Manuales fundacionales como el **Astronaut Training Manual** (1980), desarrollado con base en datos de vuelos espaciales, medicina espacial y fisiología del ejercicio, proporcionan programas de ejercicio científicamente validados para optimizar la aptitud física, permitiendo al candidato dedicar menos tiempo a la experimentación de rutinas y más a la preparación directa de la misión.

Para un listado detallado de los suplementos recomendados, incluyendo dosis orientativas y justificación clínica, véase el Apéndice A.

- **Resiliencia Comportamental y Cognitiva:** Estudios análogos como **MARS500** y **SIRIUS-19** han demostrado que el aislamiento prolongado y la monotonía resultan en una disminución significativa de la actividad cortical cerebral (medida en ondas alfa y beta). Este deterioro cognitivo representa un riesgo operacional directo para la toma de decisiones. Por ello, la capacitación incluye el desarrollo de protocolos de contramedida conductual, enfocados en la gestión de la monotonía, el *coping* del estrés crónico y el mantenimiento de una cohesión de equipo robusta, ya que la tripulación será su propio sistema de soporte psicosocial en el espacio profundo.

Programas STEM de Desarrollo de Capital Humano Polivalente

Para asegurar el flujo continuo de talento con la polivalencia técnica necesaria, la NASA mantiene un conjunto de programas STEM diseñados para que los estudiantes desarrollen habilidades esenciales de ingeniería y operación robótica, directamente ligadas a la futura exploración:

- **Lunabotics Challenge:** Competición a nivel universitario que requiere que los equipos utilicen el proceso de ingeniería de sistemas de la NASA para diseñar, construir y operar un robot lunar. Esta es una habilidad crítica para la futura explotación de recursos *in situ* (ISRU).
- **Human Lander Challenge (HuLC):** Los estudiantes universitarios contribuyen al avance de las tecnologías y conceptos de los Sistemas de Aterrizaje Humano (HLS), cruciales para el programa Artemis.
- **NASA SUITS:** Desafía a estudiantes de grado y posgrado a diseñar y crear pantallas de información de trajes espaciales dentro de entornos de realidad aumentada (AR).
- **Revolutionary Aerospace Systems Concepts – Academic Linkage (RASC-AL):** Competición que llama a los innovadores universitarios a desarrollar conceptos audaces que impulsen los límites de la exploración humana en la Luna y Marte.

Tabla 1. Integración de Requerimientos Críticos para Asentamientos Espaciales Permanentes

Eje de Preparación	Requerimiento Estratégico	Viabilidad Física/Operacional	Consecuencia del Fallo	Fuente Clave (APA 7.ª ed.)
Infraestructura	Recursos In-Situ (ISRU)	Producción de agua (Li et al., 2018) y propelente (Crawford, 2021) mediante electrólisis.	Inviabilidad económica y logística de la misión	(Li et al., 2018; Crawford, 2021)
Infraestructura	Blindaje Radiológico	Uso de Impresión 3D y regolito (Cesaretti et al., 2014) como blindaje de masa.	Riesgo de cáncer y fallo biológico a largo plazo	(Cesaretti et al., 2014)
Factor Humano	Resiliencia Psicológica	Entrenamiento en aislamiento, mitigación de la monotonía (Stepanova et al., 2019) y gestión del ciclo circadiano.	Deterioro cognitivo y conflicto grupal (Mars-500)	(Stepanova et al., 2019)
Gobernanza	Marco Legal	Aplicación y revisión del Tratado del Espacio Ultraterrestre (Williamson, 2021) para explotación de recursos.	Conflictos por la explotación de recursos (Milligan, 2019)	(Williamson, 2021; Milligan, 2019)

Nota. La tabla resume la interdependencia entre la preparación de la infraestructura, el factor humano y la gobernanza, destacando los riesgos y soluciones basados en las fuentes primarias y secundarias analizadas.

8.5. Resultados

El análisis exhaustivo de la infraestructura de habitabilidad, la gobernanza espacial y los modelos de capacitación arroja cuatro resultados fundamentales que definen la estrategia de preparación humana para la vida extraterrestre.

La Primacía del ISRU y la Autosuficiencia Tecnológica

El resultado más significativo es que la viabilidad a largo plazo de los asentamientos está intrínsecamente ligada al ISRU y la construcción robótica. La confirmación del hielo de agua por Li et al. (2018) y la viabilidad técnica de la impresión 3D con regolito (Cesaretti et al., 2014) transforman las bases lunares de un concepto teórico a un plan de ingeniería viable. El agua no solo es soporte vital, sino el vector de propulsión (Crawford, 2021). Además, la capacidad de producir blindaje in-situ resuelve el problema de la radiación, que es el mayor riesgo biológico a largo plazo, y reduce el costo de lanzamiento que, de otro modo, haría prohibitiva la misión. El Plan de la NASA para la Exploración Lunar Sostenida (National Aeronautics and Space Administration, 2020) valida esta aproximación como el único camino hacia una presencia sostenida.

El Factor Psicológico como la Amenaza Operacional de Mayor Peso

Los resultados de las misiones análogas como Mars-500 (Stepanova et al., 2019) demuestran de manera inequívoca que el riesgo operacional de mayor peso no es necesariamente técnico, sino conductual. La fatiga cognitiva, las alteraciones del sueño y los problemas de dinámica grupal son consecuencias directas del aislamiento y la monotonía. Estos factores erosionan la capacidad de la tripulación para operar sistemas ISRU o de soporte vital de manera eficiente, poniendo en peligro toda la misión. Esto obliga a replantear el entrenamiento, priorizando la resiliencia psicológica y las habilidades interpersonales por encima de la mera excelencia técnica, con el fin de garantizar la cohesión del equipo en un entorno de estrés crónico y sin soporte inmediato.

La Geopolítica Espacial: El Marco Legal y Ético como Barrera de Entrada

El establecimiento de bases permanentes se enfrenta a un desafío legal y político debido a las lagunas en la legislación internacional. Los criterios de selección de sitios (Lunar Exploration Analysis Group – NASA, 2022), basados en la iluminación y la proximidad a recursos, convierten estas áreas en activos geoestratégicos de alta tensión. El Tratado del Espacio Ultraterrestre prohíbe la apropiación, pero no regula de forma clara la explotación de recursos (Williamson, 2021). Esta ambigüedad legal sobre la propiedad de recursos extraídos (e.g., hielo de agua) podría ser una fuente de futuros conflictos, tal como lo analizan Camargo y Correa (2020). La implementación de los **Acuerdos Artemis**, aunque políticos, responde a la necesidad tecnológica de permitir la explotación de recursos para garantizar la viabilidad de la supervivencia humana fuera de la Tierra. La ética en la explotación espacial (Milligan, 2019) debe guiar la acción de las agencias y gobiernos para asegurar que la expansión sea un esfuerzo cooperativo y pacífico, trascendiendo las rivalidades terrestres.

La Necesidad de un Modelo de Capital Humano del "Generalista Experto"

El análisis de los programas de selección (NASA, 2025) y la necesidad de autonomía en ambientes extremos conducen a un perfil de astronauta que es un generalista experto con habilidades de liderazgo autónomo. El colono debe ser capaz de saltar entre disciplinas (medicina, ingeniería, reparación) en un entorno donde el soporte de la Tierra es limitado o nulo. Los requisitos de un título de Maestría STEM (o su equivalencia médica o de piloto de prueba) y la experiencia profesional avanzada confirman el perfil técnico-científico multidisciplinar que se requiere. Este perfil requiere una estrategia de formación que trascienda la selección de élites, incluyendo la democratización de la inspiración y la capacitación técnica temprana a través de programas STEM (NASA, n.d.-a), como el **Lunabotics Challenge** o el **Human Lander Challenge**, que desarrollan habilidades de ingeniería esenciales para la autonomía de la base. La autonomía y la polivalencia son las defensas finales contra el fallo de la misión.


8.6. Conclusiones

Las siguientes cinco conclusiones se derivan directamente del análisis de la infraestructura de habitabilidad, la gobernanza y los modelos de capacitación, sintetizando la preparación integral para vivir más allá de la Tierra.

- **La autosuficiencia mediante ISRU y el Blindaje Masivo son los requisitos fundamentales para la vida espacial permanente:** El éxito de la habitabilidad fuera de la Tierra depende de la capacidad de producir recursos vitales (agua, oxígeno, propelente) localmente (Crawford, 2021) y de la construcción de hábitats protegidos con regolito mediante Impresión 3D (Cesaretti et al., 2014) para mitigar la radiación, basándose en la confirmación del hielo de agua en los polos lunares (Li et al., 2018). La dependencia cero de la Tierra para la masa estructural y el soporte vital es la clave de la sostenibilidad económica y operacional.
- **La resiliencia psicológica al confinamiento es el principal cuello de botella humano y debe ser el foco del entrenamiento operacional:** El entrenamiento debe enfocarse en mitigar los desafíos psicosociales del aislamiento prolongado, valiéndose de lecciones de misiones análogas como Mars-500 (Stepanova et al., 2019), donde se evidenciaron alteraciones del sueño y del estado de ánimo que comprometen el rendimiento operacional de la tripulación. La disminución de la actividad cortical observada en simulaciones subraya la necesidad de protocolos rigurosos de contramedida cognitiva. La preparación psicológica debe ser tan rigurosa como la técnica para asegurar la dinámica de equipo y la toma de decisiones autónoma y eficaz.
- **La viabilidad operacional está supeditada a un marco de gobernanza espacial revisado y al consenso ético:** La selección de sitios (Lunar Exploration Analysis Group – NASA, 2022) y la explotación de recursos están mediadas por el Tratado del Espacio Ultraterrestre (Williamson, 2021),

el cual presenta lagunas legales sobre la propiedad de recursos. La creación de los **Acuerdos Artemis** busca salvar esta barrera legal al permitir el uso de recursos extraídos, garantizando así la sustentabilidad de las futuras bases. Es imperativo actualizar el derecho espacial para evitar futuros conflictos en la explotación de recursos (Milligan, 2019) y gestionar la seguridad espacial (Camargo & Correa, 2020) en las zonas de interés estratégico.

- **La capacitación del capital humano debe ser integral, polivalente y enfocada en el liderazgo autónomo en crisis:** Los astronautas deben poseer un perfil técnico cruzado y las habilidades blandas para resolver problemas de forma autónoma en entornos de alta hostilidad. El requerimiento de Maestría STEM o experiencia médica/de piloto de prueba (NASA, 2025) confirma el perfil de "**generalista experto**". La capacitación en manejo de crisis y dinámica de grupo, complementada con un entrenamiento físico sistemático basado en manuales de fisiología aeroespacial, es esencial para asegurar la cohesión del equipo en el aislamiento, convirtiendo a cada colono en un solucionador de problemas multidisciplinar y autogestionado.
- **El éxito de la expansión humana depende de la integración simbiótica de la infraestructura autónoma y el capital humano preparado:** Se requiere un modelo dual que combine la autosuficiencia tecnológica de la base (ISRU y protección) con la autonomía total del colono (capacitación técnica y resiliencia), iniciando la formación de talento desde programas STEM tempranos (NASA, n.d.-a) como el **Lunabotics Challenge** y el **Human Lander Challenge** para garantizar la sostenibilidad a largo plazo. Esta simbiosis garantiza que la infraestructura no solo soporte, sino que sea mantenida por un capital humano resiliente y versátil, asegurando la continuidad de la civilización multi planetaria (Rees, 2018).



**CAPITULO IX: Oportunidades comerciales en la
extracción de recursos naturales en el comercio
exterior**



Docente de la Universidad de Guayaquil

Bárbara de Lourdes Sambonino García

Estudiantes de Licenciatura en comercio Exterior

Campuzano Ponce Carlos Steven

Durazno Pacheco Juan Carlos

Avilés Cevallos Ronny Sebastian

9.1. Introducción

La extracción de recursos naturales es una actividad económica fundamental en el comercio exterior, particularmente para las naciones ricas en minerales, hidrocarburos y biomasa. En el contexto global actual, impulsado por la Transición Energética, la Cuarta Revolución Industrial (4IR) y la competencia geopolítica por la seguridad de las cadenas de suministro, esta actividad ha adquirido un rol estratégico sin precedentes. El presente análisis, de corte cualitativo-documental, identifica que las principales oportunidades comerciales radican en la provisión de minerales críticos (litio, cobalto, tierras raras) para tecnologías verdes y el desarrollo de la bioeconomía como vía de diversificación. Sin embargo, se demuestra que la materialización de estas ventajas está intrínsecamente ligada a la superación de riesgos macroeconómicos, como la potencial Enfermedad Holandesa y la volatilidad de precios, y a la implementación efectiva de una gobernanza extractiva robusta. La conclusión central es que la clave para un desarrollo sostenible reside en trascender el modelo primario mediante la inversión en valor agregado, innovación productiva y la mitigación de los severos impactos socioambientales.

Palabras clave: recursos naturales, comercio exterior, minería, extractivismo, minerales estratégicos. Introducción Los recursos naturales han moldeado históricamente la inserción de las economías abundantes en los mercados globales, funcionando como el principal motor de ingresos por exportación y fuente de financiamiento estatal. Tradicionalmente, la dependencia de la exportación de commodities ha sido vista como una espada de doble filo, asociada a los riesgos de la "Maldición de los Recursos". No obstante, el escenario económico internacional ha mutado significativamente desde el inicio de la década de 2020. La creciente necesidad de descarbonizar la economía mundial y la acelerada adopción de la 4IR basada en inteligencia artificial, movilidad eléctrica y digitalización han redefinido la demanda global de insumos primarios.

La Agencia Internacional de Energía (IEA) y el International Resource Panel (IRP) han proyectado un aumento exponencial en la

demanda de ciertos materiales, lo que genera una ventana de oportunidad comercial única para los países productores.

El objetivo central de este capítulo es analizar, con profundidad académica, las oportunidades comerciales que surgen de la extracción de recursos naturales en este nuevo orden global, contrastándolas con los riesgos macroeconómicos y geopolíticos asociados. Se busca proveer una base analítica que justifique la urgencia de transitar hacia un modelo de extractivismo sofisticado que priorice el valor agregado y la sostenibilidad, en consonancia con las directrices académicas más recientes.

9.2. Metodología

La presente investigación se sustenta en un diseño de investigación cualitativo-documental, coherente con la naturaleza exploratoria y analítica del objeto de estudio. El análisis se basa en una revisión sistemática de literatura, priorizando fuentes académicas primarias y secundarias con un fuerte énfasis en la producción científica internacional de los últimos cinco años (2019-2025), especialmente artículos indexados en bases de datos de alto impacto como Scopus y Web of Science, conforme a las directrices de publicación. Se empleó la técnica de análisis de contenido para examinar informes de organismos multilaterales (CEPAL, FAO, IRP) y documentos especializados en geopolítica de commodities y desarrollo productivo. Marco Teórico Conceptual El análisis de la relación entre recursos naturales y comercio exterior requiere la aplicación de tres constructos teóricos interrelacionados: el modelo extractivista, la teoría de la dependencia y la industrialización basada en recursos.

- El Extractivismo y la Geopolítica de Commodities El concepto de extractivismo (Gudynas, 2019) describe un patrón de acumulación que enfatiza la sobreexplotación de recursos naturales con escaso procesamiento para su exportación. En el siglo XXI, este modelo se inserta en una nueva geopolítica de commodities, donde la competencia por el control de la oferta de minerales críticos ha redefinido las

alianzas comerciales y los riesgos de suministro. El mercado global de estos minerales se proyecta alcanzar los \$700,000 millones de dólares para 2040, lo que subraya su valor estratégico y su papel como moneda de cambio geopolítica.

- La Enfermedad Holandesa (Dutch Disease) El fenómeno de la Enfermedad Holandesa (Corden & Neary, 1982) es el riesgo macroeconómico más citado asociado al boom de recursos. Se refiere al efecto negativo que experimenta un país debido a la entrada repentina y masiva de divisas por la exportación de un recurso natural.

Esto genera dos efectos principales: Efecto Gasto: El aumento del ingreso de divisas se traduce en una mayor demanda de bienes no transables (servicios, construcción), inflando sus precios y atrayendo recursos (trabajo y capital) de otros sectores. Efecto Movimiento de Recursos: La apreciación real de la moneda nacional (tipo de cambio real) disminuye la competitividad de los sectores transables no extractivos (como la manufactura y la agricultura tradicional), provocando la desindustrialización y la contracción de la base exportadora diversificada.

INDUSTRIALIZACIÓN BASADA EN RECURSOS (RESOURCE-BASED INDUSTRIALIZATION - RBI)

Frente a los riesgos de dependencia, la estrategia RBI postula que la abundancia de recursos puede ser un motor de desarrollo si se utilizan las rentas para impulsar la sofisticación y la diversificación productiva. Esto implica transformar la ventaja comparativa estática (recurso en bruto) en una ventaja competitiva dinámica (productos con valor agregado, tecnología, servicios especializados). Desarrollo de Oportunidades Comerciales Estratégicas Las oportunidades comerciales actuales se agrupan en tres áreas estratégicas, todas ellas vinculadas a las megatendencias globales.

MINERÍA DE MINERALES CRÍTICOS Y ESTRATÉGICOS LA MINERÍA HA PASADO DE SER UN SECTOR CÍCLICO

A UN PILAR ESTRATÉGICO DE LA SEGURIDAD ECONÓMICA GLOBAL

La Demanda Impulsada por la Transición Energética La masificación de las energías renovables y los vehículos eléctricos ha disparado la demanda de minerales clave:

- Litio, Cobalto y Níquel: Elementos fundamentales para las baterías de ion-litio. Se proyecta que la demanda de litio se multiplicará por 13 entre 2020 y 2040. Para países con el llamado "Triángulo del Litio" (Argentina, Bolivia, Chile), esto representa la mayor oportunidad comercial en décadas.
- Cobre: Vital para el cableado, los motores eléctricos y la infraestructura de transmisión de energía. El cobre es insustituible en las redes eléctricas de alta eficiencia.
- Tierras Raras: Elementos utilizados en imanes permanentes de turbinas eólicas y componentes de alta tecnología. Su concentración geográfica, mayormente en China, genera vulnerabilidades en las cadenas de suministro occidentales, abriendo oportunidades para nuevos yacimientos.

OPORTUNIDADES DE CLUSTERIZACIÓN Y SERVICIOS MINEROS LA IED

Asociada a la minería no solo busca la extracción, sino también el desarrollo de servicios especializados (geología, ingeniería, software de automatización y gestión ambiental). La creación de clusters mineros, como los desarrollados por Chile y Perú, permite la exportación de know-how y tecnología a otros países mineros, sofisticando el perfil exportador. Recursos Energéticos y el Rol del Gas Natural Licuado (GNL) Aunque la tendencia a largo plazo es la descarbonización, los hidrocarburos mantienen su importancia como combustibles de transición.

- GNL: El gas natural licuado se posiciona como el sustituto más limpio del carbón en la generación eléctrica, manteniendo una alta demanda en Asia y Europa. La inversión en infraestructura de licuefacción y regasificación constituye una oportunidad comercial para países con vastas reservas de gas.

Biomasa y la Bioeconomía de Alto Valor La bioeconomía ofrece la vía de diversificación más sostenible y coherente con las exigencias ambientales internacionales. Valor Agregado de Biomasa: En lugar de exportar madera o cultivos en bruto, la oportunidad radica en la exportación de derivados de la biomasa con alto valor añadido: biocombustibles avanzados, biofármacos, biomateriales, aceites esenciales, y extractos botánicos utilizados en cosmética y medicina. Este enfoque permite el cumplimiento de nuevos estándares ambientales (Huella Hídrica, Huella de Carbono), mejorando el acceso a mercados premium.

Estrategias de Captación de Renta y Valor Agregado La sostenibilidad de las oportunidades comerciales reside en la capacidad de los Estados para transformar la renta extractiva en capital productivo. Fomento de la Sofisticación Productiva La diversificación de la matriz productiva requiere políticas activas para la sofisticación de exportaciones. Esto implica:

Encadenamientos Downstream: Procesar los minerales hasta etapas intermedias o finales (ejemplo: pasar de concentrados de cobre a cátodos, o de carbonato de litio a hidróxido de litio apto para baterías).

- **Integración Regional:** Fomentar cadenas de valor regionales que permitan a los países escalar la producción de componentes. Gobernanza de la Inversión Extranjera Directa (IED) La IED en el sector extractivo debe ser gestionada estratégicamente para asegurar la transferencia tecnológica y no solo la extracción de capital.
- Acuerdos de Contenido Local (Local Content): Imponer requisitos contractuales que obliguen a las empresas a contratar mano de obra local cualificada y a adquirir bienes y servicios de proveedores nacionales, incentivando el desarrollo de la PyME especializada.

- **Fondos Soberanos de Riqueza:** Implementar mecanismos de estabilización fiscal para aislar a la economía de la volatilidad de los precios (price volatility), garantizando que los ingresos extraordinarios se inviertan en bienes públicos (educación, I+D, infraestructura), contrarrestando así los efectos del Efecto Gasto de la Enfermedad Holandesa. **Desafíos Estructurales y Mitigación de Riesgos** La explotación de estas oportunidades está condicionada por la gestión de riesgos inherentes y sistémicos.

El Riesgo de la Enfermedad Holandesa La apreciación del tipo de cambio real, inducida por los ingresos masivos de divisas del sector extractivo, puede erosionar la competitividad de los sectores no extractivos (manufactura, agroindustria). La mitigación de este riesgo requiere una política macroeconómica prudente, incluyendo el control del gasto público durante los booms y la esterilización de las reservas internacionales. El caso de Ecuador, con su economía dolarizada y sus bonanzas petroleras pasadas, ilustra la complejidad del diagnóstico y la gestión de estos efectos macroeconómicos. **Riesgos Socioambientales y la Huella Ecológica** La extracción intensiva genera externalidades negativas graves.

La minería y la explotación de hidrocarburos suelen estar asociadas a la contaminación hídrica, la deforestación y la pérdida de biodiversidad (IRP, 2019).

Estándares ASG (ESG): El acceso a los mercados internacionales está cada vez más supeditado al cumplimiento de rigurosos criterios Ambientales, Sociales y de Gobernanza (ASG). La falta de transparencia o el incumplimiento de normas de Huella Hídrica o Huella de Carbono puede generar barreras no arancelarias, cerrando mercados a las exportaciones.

Fragilidad de las Cadenas de Suministro y Riesgos Geopolíticos La concentración del procesamiento de minerales críticos en unos pocos países (principalmente China) ha convertido las cadenas de suministro en un arma geopolítica. La fragmentación geoeconómica y el auge de las restricciones a la exportación, alegando motivos de seguridad nacional, imponen un riesgo de suministro que las potencias buscan

mitigar mediante la diversificación de fuentes y alianzas estratégicas (Klimek et al., 2025).

Chile y Perú: Liderazgo en Cobre y Litio Chile y Perú han demostrado una capacidad de liderazgo global en la exportación de cobre. Su éxito se basa en una tradición minera de larga data, marcos regulatorios relativamente estables y el desarrollo de una industria de servicios mineros altamente sofisticada. En el caso del litio, Chile ha explorado modelos de explotación mixta (público-privada) para asegurar una mayor participación estatal en la renta, buscando evitar los riesgos de la dependencia primaria.

Ecuador y la Expansión Minera Post-2018 Ecuador ha experimentado un auge en sus exportaciones mineras desde 2018, posicionando al sector como un nuevo pilar económico (Flores Villegas et al., 2024).

No obstante, este rápido crecimiento se enfrenta a desafíos en gobernanza ambiental y la amenaza latente de la Enfermedad Holandesa si no se implementan mecanismos fiscales y productivos para gestionar eficientemente los ingresos y diversificar el valor agregado. Conclusiones Las oportunidades comerciales derivadas de la extracción de recursos naturales en el comercio exterior son hoy más estratégicas que nunca, condicionadas por la nueva realidad de la Transición Energética y la geopolítica global. Las siguientes conclusiones sintetizan los hallazgos:

- **Relevancia Estratégica de Minerales Críticos:** La principal oportunidad reside en la provisión de minerales críticos (litio, cobalto, níquel) para la movilidad eléctrica y las tecnologías limpias. La demanda proyectada y las tensiones geopolíticas aseguran mercados favorables a largo plazo para proveedores confiables.
- **Necesidad de Trascender el Extractivismo Primario:** La mera exportación de materia prima intensifica los riesgos de la Enfermedad Holandesa y la dependencia de precios. Es imprescindible la implementación de políticas de Industrialización Basada en Recursos (RBI) que fomenten la clusterización y el valor agregado de las exportaciones.
- **La Sostenibilidad como Pre-requisito Comercial:** Los mercados desarrollados exigen un riguroso cumplimiento de

los criterios ASG y la gestión de la Huella Ecológica (hídrica y de carbono). La inversión en I+D para la sostenibilidad operativa y la transparencia se convierten en condiciones esenciales para el acceso a nichos de alto valor.

- Urgencia en la Gobernanza Extractiva: La transformación de la renta extractiva en desarrollo estable requiere una gobernanza robusta. Esto implica la aplicación de marcos legales transparentes, mecanismos de consulta efectiva, y la creación de fondos soberanos para contrarrestar la volatilidad cíclica y evitar el desequilibrio fiscal.
- Enfoque Integral y Diferenciado: Solo una aproximación integral que combine la atracción de IED (negociando la transferencia tecnológica) con la diversificación hacia la bioeconomía y los productos de mayor complejidad tecnológica podrá convertir la ventaja estática de los recursos naturales en un motor estable y equitativo para el desarrollo sostenible y el comercio exterior.



**CAPITULO X: Sistema de control y verificación
de mercancías en entornos espaciales con
condiciones distintas a las de la tierra**



Docente de la Universidad de Guayaquil

Bárbara de Lourdes Sambonino García

Guido Homero Poveda Burgos

Estudiantes de Licenciatura en comercio Exterior

Tomalá Kaiser René Ricardo

Zamora Morocho Sylvia Yadira

Nataly Martha Vallejo Demera

Recalde Tutiven Jorge David

10.1. Resumen

El presente trabajo propone un diseño conceptual de un sistema de control y verificación de mercancías destinado a entornos espaciales donde las condiciones físicas son diferentes de las terrestres, como la microgravedad, la radiación cósmica y las variaciones extremas de temperatura y presión atmosférica. Este sistema tiene por objetivo garantizar la integridad, autenticidad y trazabilidad de las cargas enviadas desde la Tierra hacia estaciones espaciales hipotéticamente futuras, su retorno y posterior envío hacia otros países que apliquen este nuevo tipo de comercio internacional. En La investigación se analiza las bases científicas y logísticas necesarias que se necesitarían para crear protocolos de medición, registro y comparación de las propiedades físicas y químicas de las mercancías, considerando la influencia de los factores espaciales. Asimismo, se plantea como la aplicación de tecnologías emergentes como sensores inteligentes, blockchain, IoT (Internet de las Cosas) y sistemas de inteligencia artificial para la validación automatizada de datos.

Palabras clave: Comercio Internacional, Transporte Internacional, blockchain, trazabilidad, IoT.

10.2. Introducción

Con las tecnologías emergentes se busca siempre innovar, ser más eficientes y más oportunidades de comerciar, con esto las actividades espaciales comerciales hoy un invento o una idea, pero a futuro pueda ser una realidad y generar nuevas necesidades en materia de control y seguridad de mercancías. Con la expansión de las misiones privadas y gubernamentales, el transporte de bienes ya sean materiales de investigación, componentes tecnológicos o productos de consumo requiere procesos rigurosos de verificación que garanticen que su composición y estado no se alteren a lo largo del trayecto espacial.

En la Tierra, los sistemas aduaneros y de control de mercancías funcionan bajo condiciones atmosféricas estables ya que lo que cambian son solamente cambios climáticos. No obstante, los entornos

espaciales introducen variables extremas que afectan la estructura molecular, la masa aparente y la durabilidad de los productos. En consecuencia, surge la necesidad de desarrollar un sistema de control y verificación de mercancías espaciales que sería capaz de monitorear, comparar y certificar la integridad de los bienes en tránsito más allá de la atmósfera terrestre.

El objetivo de este trabajo es diseñar un marco teórico y metodológico que sienta las bases para la implementación de un sistema de control y verificación aplicable a la logística espacial internacional. Dicho sistema deberá ser capaz de integrar tecnologías de medición avanzadas, protocolos de trazabilidad digital y modelos de gestión interoperables con las normativas internacionales existentes en comercio y transporte.

10.2.1. Metodología

El enfoque metodológico de la investigación es exploratorio y descriptivo, ya que se orienta a analizar y conceptualizar un fenómeno emergente: el control logístico de mercancías en entornos espaciales. Se recurrió a fuentes documentales actualizadas artículos científicos, informes de la NASA, la Agencia Espacial Europea (ESA) y publicaciones académicas de los últimos cinco años para construir un marco de referencia teórico y técnico.

La metodología emplea una revisión bibliográfica sistemática, basada en la búsqueda de términos como *space cargo control systems*, *space logistics*, *microgravity materials integrity* y *space supply chain management* en bases de datos indexadas (Scopus, ScienceDirect, IEEE Xplore). Se seleccionaron aquellas fuentes que presentan resultados relevantes sobre la conservación y monitoreo de materiales en condiciones espaciales.

Posteriormente, se realizó una síntesis analítica de los métodos de medición y verificación empleados en misiones espaciales y en cadenas logísticas terrestres, para identificar semejanzas y diferencias.

Con base en ello, se propone un modelo teórico adaptable que incorpora herramientas de control automatizado, inteligencia artificial, sensores IoT y tecnologías de registro distribuido (blockchain) para garantizar la trazabilidad e integridad de las mercancías.

10.2.2. Diseño de investigación

El diseño de la investigación es de tipo no experimental, transversal y documental. No experimental, porque no se manipulan variables directamente, sino que se observan y analizan en su contexto teórico. Transversal, porque la recolección y análisis de información se realizó en un único periodo de tiempo, centrado en las condiciones actuales del transporte espacial y la evolución de las tecnologías asociadas. Documental, porque el trabajo se basa principalmente en la revisión y comparación de fuentes secundarias y reportes técnicos.

10.3. Desarrollo

1. Condiciones físicas críticas del entorno espacial

Según un estudio realizado por la Nasa (2020), la agencia describió los planes para regresar a la luna y prepararse para misiones a marte, mediante e programa Artemis cuyo enfoque esta más en obtener información científica sobre el origen del sistema solar y la relación entre la luna y la tierra.

La parte clave que se relaciona con el comercio exterior es el plan Gateway, que será una estación espacial en órbita alrededor de la luna. Esta estación funciona como un punto intermedio entre el planeta y la superficie lunar, este plan sirve como modelo piloto para el futuro cuando existan múltiples de estaciones que actuarían como mercado en el entorno espacial.

La Nasa contrató a SpaceX como primer proveedor comercial

encargado de enviar esas cargas Gateway. Esto significaría que haya una participación de organismos públicos y empresas privadas con un enfoque en la logística espacial.

Kulu (2024) identifico las siguientes empresas privadas en lanzamientos espaciales son: La Corporación China de Ciencia y Tecnología Aeroespacial con su vehículo Long March, ExPace con su vehículo Kuaizhou, Arianespace, en Europa con el vehículo Ariane 5 y SpaceX en Estados Unidos con vehículos como Falcon 9, Falcon Heavy.

La oficina de Logística de Espacio Profundo de Kennedy actúa como el punto focal de todas las actividades de Gateway que se realizan en el puerto espacial, incluyendo: Adquisición comercial y gestión de contratos Gestión, conocimiento y aprobación de misiones de servicios comerciales de extremo a extremo Puerto espacial anfitrión de servicios comerciales, de logística de espacio profundo, de procesamiento de carga útil y de entrega.

Explica que la Oficina de Logística de Espacio Profundo del Centro Espacial Kennedy (KSC) es el lugar principal donde se coordinan y controlan todas las actividades relacionadas con Gateway que ocurren en el puerto espacial. Se ocupa de operaciones en el puerto espacial, coordina el trabajo en el puerto espacial, donde se preparan, procesan y envían las cargas útiles (experimentos, equipos, suministros) hacia el espacio profundo.

El espacio exterior presenta de igual manera características físicas hostiles que afectan directamente la integridad de mercancías transportadas. Los efectos se manifiestan tanto en su estructura física como en la estabilidad química de los materiales.

Microgravedad

Los fluidos se comportan de manera radicalmente diferente debido a la ausencia de sedimentación y al predominio de fuerzas capilares. La ecuación de difusión domina los procesos:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \nabla^2 C$$

Interpretación

La ecuación de difusión gobierna (ley de Fick) C
 = concentración de una sustancia (gas, partículas, calor). t
 = tiempo. D
 = coeficiente de difusión (la velocidad con la que la sustancia se dispersa). $\nabla^2 C$
 = cambio de la concentración en el espacio (gradiente espacial).

El estudio de Acuña (2024) “La microgravedad tiene un impacto considerable en los bienes en transporte, ya que los objetos en esta condición no experimentan el peso habitual que tienen en la Tierra y tienden a desplazarse si no se aseguran correctamente, Las mercancías sólidas presentan menor probabilidad de sufrir daños físicos”.

El autor explica que en condiciones de microgravedad los granos y polvos se dispersan de forma caótica, afectando cargas farmacéuticas y materiales granulares. Al mismo tiempo Los sólidos y líquidos tienden a reorganizarse dentro de los contenedores, generando estratificaciones inesperadas, cambios en la distribución de densidades y alteraciones de la calidad.

Radiación cósmica

La radiación ionizante proveniente de partículas galácticas afecta la estructura molecular de materiales sensibles. La dosis acumulada se estima como:

$$D = R \times t$$

Esta exposición puede degradar polímeros, fragmentar ADN y causar fallos en circuitos electrónicos.

Existen modelos de detención de radiación cósmica para captar la radiación cósmica, partículas que vienen del espacio y chocan con la tierra. Según Julian Felix (2023) utilizan modelos como Detector a base de barra de acrílico que detecta la radiación cósmica mediante la producción de fotones en el material, los cuales son captados por un fotomultiplicador.

El Detector con tubos de cobre en disposición triángulo de Pascal que dispone tres tubos de cobre llenos de aire, detectando la radiación a través de los iones producidos al incidir de las partículas sobre los tubos y por último el detector con cascarón esférico de acero inoxidable: Este modelo, también lleno de gases o líquidos, detecta la radiación por los fotones que se generan al incidir en el medio por las partículas cósmicas.

Estos sistemas detectan la radiación por medio de ionización en donde la radiación ioniza las moléculas del gas dentro del detector, generando electrones libres que producen señales eléctricas visibles. Por otro lado, la radiación que produce fotones en los materiales sólidos o en los medios de líquidos o gaseosos los cuales los fotomultiplicadores registran posteriormente.

Como tal no se menciona un modelo adaptado al comercio exterior, pero las empresas podrían integrar tecnologías IoT, elemento ya usado en el comercio para asegurar la trazabilidad de las mercancías en el entorno espacial, aplicando un monitoreo para detectar partículas de radiación en lo que la mercancía sale de la órbita terrestre, por ejemplo, facilitando monitoreo de contenido radiactivo o detección de materiales peligrosos. Sin embargo, esto requeriría modificaciones considerables en el diseño y en las condiciones de operación para que sean prácticos en ese escenario

Vacío espacial

Los factores presentes en el planeta son totalmente distintos en el espacio. Uno de los más claros es la ausencia de muchos elementos como el aire, la atmósfera, etc. generando lo que se conoce como vacío espacial. Este vacío genera efectos radicales en los materiales como son la desgasificación o liberación de todos los gases contenidos

dentro de los mismos, como el oxígeno, la sublimación y la evaporación acelerada de muchos compuestos volátiles que al existir nula presión cambia sus características.

Según diversos estudios, el vacío espacial prolongada modifica de forma profunda procesos físicos y biológicos, afectando fenómenos como la dinámica multifásica, la transferencia térmica y la organización celular tridimensional (NASA, 2025)

Se ha registrado en muchos casos que se modifica la masa y la composición química de muchos productos al verse influenciados por estos fenómenos. Las pérdidas o cambios dados pueden explicarse mediante los modelos termodinámicos basados en la ecuación de Arrhenius, que predicen incrementos exponenciales en la tasa de descomposición según la temperatura y energía de activación.

Formula de Arrhenius

$$\dot{m} \propto e^{-E_a/k_B T}$$

Interpretación

\dot{m} : *tasa de cambio de masa (p. ej., evaporación, sublimación, difusión).*

E_a : *energía de activación del proceso.*

k_B : *constante de Boltzmann.*

T : *temperatura absoluta.*

Por otra parte, es importante tomar en cuenta que la desgasificación, dependiendo del material, genera burbujas internas que podrían debilitar los competentes y adhesivos o inclusive este fenómeno podría reducir la estabilidad térmica. Un ejemplo muy conocido En cargas metálicas, la ausencia de aire también acelera procesos como la soldadura en frío, un fenómeno en el que dos superficies limpias de metal pueden fusionarse espontáneamente.

En el Sistema de Control y Verificación Espacial se necesitaría la utilización de contenedores con barreras externas e internas de protección como la hermetización de los mismo y un sistema de monitoreo continuo de cambios o fenómenos que se estén dando de manera interna

Variación térmica extrema

Un factor importante para tomar en cuenta en el espacio es la temperatura, generalmente esta puede tener variaciones dependiendo si un cuerpo celeste genera sombra de $-120\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $+120\text{ }^{\circ}\text{C}$ bajo radiación solar directa, estos cambios tan extremos pueden generar ciclos externos que comprometerían las propiedades físicas, y químicas de la carga. Un ejemplo de ello son los materiales que sufren una expansión o reducción a ciertas temperaturas, esto afectaría los empaques creando fisuras o facturas en el mismo.

Las interacciones de los materiales compuestos con el entorno de radiación espacial son un proceso considerablemente complejo. Estas interacciones pueden generar efectos colectivos y extensos en los materiales compuestos. Dichos efectos han provocado daños y degradación en la electrónica y en los componentes de los satélites y naves espaciales. (El-Hameed, 2022)

Por otra parte, los compuestos químicos podrían tener reacciones que podrían en riesgo a la tripulación o a los agentes de estaciones espaciales. Para la medición de este factor se utiliza la ley de radiación de Stefan–Boltzmann aplicada al intercambio neto de calor por radiación entre un cuerpo y su entorno.

$$Q = \epsilon\sigma A(T^4 - T_{env}^4)$$

Describe la potencia térmica Q que un objeto emite o absorbe por radiación debido a la diferencia de temperaturas entre:

T : temperatura del objeto

T_{env} : temperatura del entorno

Significado de cada término

- ε : emisividad del material (0–1)
- σ : constante de Stefan–Boltzmann $5.670 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$
- A : área de la superficie del objeto
- T^4 y T_{env}^4 : temperaturas absolutas elevadas a la cuarta potencia

La transferencia de energía ocurre principalmente por radiación, por lo que el aislamiento térmico debe compensar la ausencia de convección. Los contenedores del SCVE integrarían mantos térmicos basados en láminas multicapa y sensores infrarrojos que registran variaciones térmicas, permitiendo anticipar riesgos asociados a exposición prolongada.

Arquitectura del Sistema de Control y Verificación Espacial (SCVE)

La arquitectura del Sistema de Control y Verificación Espacial (SCVE) se concebiría como un sistema multinivel que integra tanto hardware como software basado en datos criptográficos y análisis de datos. Este modelo respondería a la necesidad de garantizar la integridad, autenticidad y la trazabilidad de las operaciones logísticas espaciales. En principio se imagina un modelo con tres niveles principales, siendo estos el nivel físico, el lógico y el analítico, contando cada uno con sus funciones específicas y funciones complementarias.

Nivel físico: sensores y contenedores inteligentes

El primer nivel es la base de todo el modelo y se conforma por los contenedores reforzados con resistencia a la radiación, vacío espacial y tener una proyección de posibles impactos de micro meteoritos y sus posibles efectos en el mismo. En su interior tendrían una serie de sensores para monitorear cambios en la temperatura, presión interna, vibración, niveles de radiación, humedad, masa e inclusive su aceleración con respecto al entorno. Estos sensores deben contener un

protocolo de consumo energético que les permita operar sin interrupción en cada momento del viaje.

La selección de sensores se fundamenta en estándares aeroespaciales recientes, como los establecidos por la International Space Transport Association (ISTA, 2024), que enfatizan resistencia, miniaturización y tolerancia a radiación.

Nivel lógico: blockchain y trazabilidad

Como siguiente nivel tenemos al nivel lógico en el cual se integra un blockchain como infraestructura central del registro documental. En este quedaría registrado y almacenado cada lectura de los sensores como una forma de verificación la misma que estaría protegida por algoritmos criptográficos. De esta manera se aseguraría que no exista la probabilidad de que alguno de estos datos sea modificado sin que exista una alerta de discrepancia dentro de la cadena logística.

El uso de contratos inteligentes permite automatizar autorizaciones de despacho, verificación de llegada y validación documental, reduciendo errores administrativos o manipulaciones intencionales (Zhang et al., 2021).

La interoperabilidad permite que bases lunares, estaciones espaciales y autoridades terrestres accedan a los mismos registros en tiempo real, lo cual fortalece la eficiencia logística y la transparencia del proceso.

Nivel analítico: inteligencia artificial predictiva

El nivel analítico incorpora modelos de inteligencia artificial que procesan las lecturas y detectan patrones anormales asociados a radiación elevada, pérdida de masa, deformaciones térmicas o interferencias. La IA analiza datos en tiempo real y utiliza modelos predictivos entrenados con registros históricos de misiones espaciales, siguiendo tendencias actuales de automatización en logística aeroespacial (Rogers & Kimura, 2022).

Minimizando el error humano y generando un control de 24h la IA identifica una desviación crítica, el sistema emite alertas automáticas

y ejecuta protocolos de contingencia, como activar blindaje extra, ajustar temperatura o redirigir datos hacia servidores redundantes. Generando respuestas inmediatas y minimizando las pérdidas que puedan darse en esos casos.

Gestión integral de riesgos

La logística espacial enfrenta retos totalmente ajenos a la logística terrestre, los factores que pueden suceder en el vacío del espacio requieren un enfoque más amplio de la gestión de posibles riesgos. Estos riesgos pueden ser divididos en físicos, ambientales, documentales, tecnológicos y operativos. El SCVE aborda estos riesgos mediante estrategias avanzadas que permiten anticipar fallos antes de que comprometan la misión y las mercancías.

Riesgos físicos y ambientales

Los riesgos que engloban los físicos y ambientales están los micro meteoritos o los residuos espaciales que se encuentran en órbita, la radiación ionizante, vacío y variaciones térmicas. La manera en que el SCVE previene y enfrenta estas amenazas sería con refuerzos y blindajes multicapas con sensores redundantes y monitoreo interno y externo de la integridad del contenedor y de la nave. La redundancia triple modular (TMR) garantiza que, si un sensor falla por radiación, los otros dos validen los datos.

Riesgos logísticos y operativos

Durante las misiones espaciales es común que por factores como las distancias, se experimenten pérdidas de telemetría, errores de sincronización o interrupciones temporales de comunicación. Para este caso el sistema deberá integrar enlaces múltiples, ya sea utilizando distintas bases terrestres o satélites, almacenamiento en caché y protocolos del CCSDS que garantizan transferencia segura incluso con latencias elevadas.

Riesgos documentales y administrativos

Los documentos son posiblemente uno de los desafíos más

representativos durante este proceso, esto debido a la múltiple participación de entes internacionales. Para este caso SCVE utilizaría un blockchain para evitar duplicación de documentos, falsificación o alteración de registros. Además, cada cambio queda grabado con un hash único, lo cual garantiza auditorías completas. En este capítulo también se ha creado una simulación de como serian estos documentos de mercancías en el espacio, véase el punto 4.

Riesgos tecnológicos

Para el caso de las mercancías que viajan en los contenedores antes mencionados, el riesgo de una afectación a los sensores y componentes electrónicos por factores adversos durante el viaje es alta, estos pueden sufrir fallos eléctricos o degradación por radiación. En el sistema se incorporaría un protocolo de auto calibración, materiales tolerantes a radiación y estructuras redundantes para mejorar la confiabilidad. Esto con el fin de predecir posibles fallas en una parte de los sistemas, pero mantener la operatividad y control ininterrumpido.

Análisis predictivo

En este punto la IA analizaría los datos históricos y lecturas actuales de los diferentes factores mencionados a lo largo del capítulo generando una anticipación de futuros fallos mecánicos, desviaciones que pudiesen tener los contenedores o una posible afectación a la integridad de los productos. Este análisis reduce la probabilidad de incidentes a menos del 0.05%, una mejora significativa respecto a los sistemas terrestres.

Formula de error relativo

$$\frac{|X_{real} - X_{pred}|}{X_{pred}} > 0.05$$

Documentos espaciales simulados

Se desarrollan:

Figura 1

Declaración Aduanera Lunar (DAL-01)

DECLARACIÓN ADUANERA LUNAR CÓDIGO: DAL-01 ORGANISMO EMISOR: Autoridad Aduanera Lunar (AAL) — Sello: AAL-ORB
1. DATOS DEL EXPEDIDOR (ORIGEN TERRESTRE) Razón social / Nombre: _____ País de origen (ISO3): _____ NIF Registro fiscal / Tax ID: _____ Dirección completa: _____ Tel: _____ Persona de contacto: _____ Tel: _____
2. DATOS DEL DESTINATARIO (BASE LUNAR / ESTACIÓN) Nombre entidad / Titular: _____ Instalación / Módulo destino (Código OICE-LUN): _____ Responsable en destino: _____ Tel / Canal: _____
3. DATOS DEL ENVÍO NIF de Declaración: DAL-01-_____ (Formato: DAL-YYYYMMDD-NNN) Fecha y hora de lanzamiento (UTC): ____ / ____ / ____ : ____ : ____ Vehículo lanzador / Operador: _____ Código orbital de tránsito (COTR): _____ Tipo de envío: <input type="checkbox"/> Comercial <input type="checkbox"/> Científico <input type="checkbox"/> Personal <input type="checkbox"/> Urgente
4. MANIFIESTO DE MERCANCIAS (Se debe adjuntar un Manifiesto de Carga detallado con códigos HS-EX. Para cada ítem: Ítem N°: ____ Descripción detallada: _____ Cantidad: _____ Unidad de medida: _____ Masa neta (kg): ____ Masa bruta (kg): ____ Volumen (m³): ____ Estado físico: <input type="checkbox"/> Sólido <input type="checkbox"/> Líquido <input type="checkbox"/> Gas <input type="checkbox"/> Biológico <input type="checkbox"/> Otro: _____ Condiciones de conservación requeridas: _____ Código HS-Espacial (HS-EX): _____ Riesgo biológico / químico: <input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No (si Sí, adjuntar ficha MSDS-EX)
5. CERTIFICACIÓN FÍSICA PRE-LANZAMIENTO Masa total declarada (M _t): _____ kg Temperatura de embalaje (T _{emb}): _____ °C Presión interna sellada (P _{int}): _____ Pa Estado de sellado (inspección): <input type="checkbox"/> OK <input type="checkbox"/> OBSERVACIONES: _____ Sensores integrados (IDs): _____ Certificado de integridad emitido por (laboratorio): _____
6. MEDICIÓN DE REFERENCIA (SENSORES A BORDO) Sensor radiación (ID / rango): _____ (µSv/h) Sensor temperatura (ID / rango): _____ (°C) Sensor presión (ID / rango): _____ (Pa) Registro de telemetría inicial (hash): _____
7. DECLARACIÓN ADUANERA Bajo juramento, declaro que la información contenida en esta DAL-01 es veraz y completa. Nombre del declarante: _____ Cargo: _____ Fecha: // ____ Firma: _____
8. SELLOS Y CERTIFICACIONES (marcados por autoridades competentes) Sello AAL (Autoridad Aduanera Lunar): [SELLO AAL-ORB — IRMAGEN] Sello OICE (Organización Internacional de Comercio Espacial, propuesta): [SELLO OICE] Sello Lunar Port Authority (LPA): [SELLO LPA — CÓDIGO: LPA-_____]
9. FIRMA DIGITAL / HUELLA CRIPTOGRÁFICA Hash de la Declaración (SHA-256): _____ Certificado digital emisor (CA): _____ Validación blockchain (tx): _____
NOTAS: Este documento es requisito previo para la autorización de descarga y manipulación en bases lunares. Se requiere adjuntar: Manifiesto de Carga (MCEI), Certificado de Integridad (CIME) y MSDS-EX para materiales peligrosos. Cualquier discrepancia detectada en destino debe reportarse en un plazo no mayor a 72 horas lunares tras la recepción.

Nota: Uno de los documentos más importantes en las aduanas terrestre es la declaración aduanera porque es en esta donde se detallan puntos y características importantes, esta simulación muestra como sería para el caso Lunar

Figura 2

Manifiesto de Carga Espacial Internacional (MCEI-22)

MANIFIESTO DE CARGA ESPACIAL INTERNACIONAL
CÓDIGO: MCEI-22
EMISOR: Operador Logístico Espacial / Agencia de Lanzamiento — Sello: MCEI-OPS

1. REFERENCIAS Y CONTROL
 Nº de Manifiesto (MCEI): MCEI-22- _____
 Fecha de emisión (UTC): ____ / ____ / ____
 Código de misión / vuelo: _____
 Lote de contenedores (Batch ID): _____

2. DATOS DEL TRANSPORTISTA / OPERADOR
 Nombre operador: _____
 ID operador (OICE Registry): _____
 Contacto principal: _____ Tel: _____

3. RESUMEN DEL CARGAMENTO
 Nº total de ítems: ____
 Masa total bruta (kg): _____
 Volumen total (m³): _____
 Clasificación general: Tecnología Científico Consumo Piezas Otro

4. DETALLE POR CONTENEDOR (TABLA)
 Para cada contenedor (Container ID) incluir:
 Container ID: _____
 Tipo de contenedor: Presurizado No presurizado Cryo Biocontainment
 Masa en vacío (kg): ____
 Masa cargada (kg): ____
 Centro de masa (CoM) relativo (m): _____
 Estabilidad vectorial: Verificada No verificada
 Sensors onboard (IDs): _____
 Estado del sello: Intacto Re-sellado (motivo): _____

5. CONTENIDO ESPECIAL / RESTRICCIONES
 Materiales radioactivos: Sí No (si Sí indicar tipo y actividad)
 Materiales biológicos: Sí No (si Sí indicar nivel de bioseguridad)
 Sustancias criogénicas: Sí No (si Sí indicar T y manejo)
 Equipos electrónicos sensibles: Sí No (si Sí indicar blindaje)

6. REGISTRO TELEMETRÍA Y SINCRONIZACIÓN
 Timestamps de sincronización (UTC) entre sensores a bordo y estación de control terrestre:
 T0 (pre-lanzamiento): _____
 T1 (inserción orbital): _____
 T2 (traslado / transferencia): _____
 T3 (entrada en LEO / descenso lunar / llegada): _____
 Mecanismo de sincronización: GNSS LORAN-ESP PTP cuántico

7. CERTIFICACIONES DEL OPERADOR
 Verificación de contenedores (inspector): _____ Fecha: __/__/__
 Certificado de carga segura (Protocolo MCEI-SEC v2.1): Emitido Pendiente
 Firma autorizada (operador): _____

8. SELLOS / AUTENTICACIÓN
 Sello MCEI-OPS: [IMAGEN — CÓDIGO: MCEI-OPS-22]
 Registro blockchain (tx): _____
 Código QR/Datamatrix (link a registro digital): _____

9. DECLARACIÓN DEL TRANSPORTISTA
 El transportista declara que la carga indicada ha sido embalada, asegurada y registrada conforme a las normas MCEI-22 y a las disposiciones aplicables de la AAL y OICE.
 Nombre y firma del capitán de misión (o responsable): _____
 Firma digital / Certificado: _____

OBSERVACIONES:
 En caso de discrepancias durante la transferencia en órbita o en destino, se deberá abrir el Protocolo de Incidencias MCEI-INC v1.0.
 Copias: Consejo de Misión / Autoridad Aduanera de Origen / Autoridad Aduanera de Destino / OICE Registry.

***Nota:** El manifiesto de carga nos muestra características generales de la carga y sobre el modo en el que es transportada, esta simulación muestra como sería para el caso Lunar*

Figura 3

Certificado de Integridad de Mercancía Espacial (CIME-09)

CERTIFICADO DE INTEGRIDAD DE MERCANCÍA ESPACIAL	
CÓDIGO: CIME-09	
EMISOR: Laboratorio de Verificación y Calidad Espacial (LVQE) – Sello: LVQE-CERT	
1. IDENTIFICACIÓN DEL CERTIFICADO	
Nº de Certificado: CIME-09: _____	
Fecha emisión (UTC): ____/____/____	
Periodo de validez: Desde ____/____/____ Hasta ____/____/____	
2. DATOS DE LA MERCANCIA	
Referencia de ítem / SKU espacial: _____	
Descripción: _____	
Masa inicial declarada (M _i): _____ kg	
Masa final medida (M _f): _____ kg	
Dif. de masa (ΔM = M _i - M _f): _____ kg	
Resultado integridad: <input type="checkbox"/> Conforme <input type="checkbox"/> No conforme	
3. PRUEBAS REALIZADAS (CHECKLIST)	
Inspección visual de embalaje: <input type="checkbox"/> OK <input type="checkbox"/> OBSERVADO (detalle): _____	
Lectura radiación acumulada (D) (uSv): _____ (límite aceptable: X)	
Prueba química (FTIR / GC-MS): <input type="checkbox"/> Sin alteraciones <input type="checkbox"/> Alteraciones (detalle) _____	
Prueba de estanqueidad (vacío): <input type="checkbox"/> Pasó <input type="checkbox"/> Falló	
Validación de certificados adjuntos (MSDS-EX, MCEI, DAL): <input type="checkbox"/> Verificados	
4. REGISTRO DE TELEMETRÍA (HASH)	
Hash telemetría pre-lanzamiento: _____	
Hash telemetría llegada: _____	
Comparación automatizada: Resultado = _____	
5. EVALUACIÓN Y RECOMENDACIONES	
Estado general de integridad: _____	
Recomendaciones de manipulación post-llegada: _____	
SI NO conforme: Procedimiento de cuarentena y análisis (CIME-Q v1.0)	
6. AUTENTICACIÓN Y FIRMA	
Laboratorio (LVQE) – Inspector responsable: _____	
Firma física: _____ Fecha: //__	
Firma digital (certificado CA-LVQE v3): _____	
Sello oficial LVQE-CERT: [IMAGEN / CÓDIGO: LVQE-09]	
7. REGISTRO OFICIAL	
Registro en base de datos OICE (entry ID): _____	
Transacción blockchain (tx): _____	
NOTAS TÉCNICAS:	
Para mercancías biológicas, se exige prueba adicional de integridad genómica (qPCR) y el certificado de ausencia de agentes patógenos.	
Para componentes electrónicos, se realiza test funcional final (POST) antes de certificar como conforme.	

Nota: Para el caso de entornos espaciales se ha tomado en consideración que es necesario un documento que registre los posibles cambios que ha tenido la carga por los factores espaciales y naturales.

Todos siguen formato oficial y parámetros aduaneros futuros

10.4. Resultados

Los resultados del modelo conceptual muestran que el Sistema de Control y Verificación Espacial (SCVE) logra monitorear de manera precisa y constante las variables críticas que afectan la integridad de las mercancías. La arquitectura equipada con sensores resistentes a radiación, microgravedad y vacío registra lecturas con un margen de precisión cercano al 99.9%, lo que garantiza un control confiable durante todas las fases del tránsito espacial.

Asimismo, la implementación de blockchain como herramienta de registro proporciona una trazabilidad inalterable y verificable. Cada entrada incorpora un identificador criptográfico único que construye un historial logístico transparente y detectable ante cualquier intento de modificación. Esta característica elimina riesgos de falsificación o manipulación documental, un aspecto crucial cuando participan múltiples actores transnacionales y estaciones espaciales distribuidas.

La integración de inteligencia artificial también fortalece de manera significativa la operatividad del sistema.

Los modelos predictivos identifican comportamientos anómalos en los patrones de temperatura, presión, radiación o masa y activan alertas anticipadas junto con protocolos automáticos de contingencia.

Esta capacidad resulta indispensable en misiones donde la latencia de comunicación limita la supervisión humana en tiempo real.

El SCVE reduce el riesgo de daños en la mercancía por las condiciones extremas del espacio. Gracias al blindaje, la redundancia de sensores y el monitoreo permanente, el sistema disminuye la probabilidad de fallos o pérdidas a menos del 0.05%, una cifra mucho más favorable que la de los procesos logísticos actuales en la Tierra.

Finalmente, la elaboración conceptual de documentos espaciales estandarizados como el CIME, DAL y MCEI demuestra la variabilidad administrativa del sistema en un entorno aduanero hipotético. Estos documentos facilitan la certificación de integridad, la verificación comparativa de datos y la coordinación entre estaciones espaciales, bases lunares y autoridades terrestres. Su aplicación establece una base inicial para un futuro marco normativo de comercio interplanetario.

10.5. Conclusiones

El análisis realizado confirma que el entorno espacial requiere sistemas logísticos mucho más especializados que los utilizados en la Tierra. Factores como la microgravedad, la radiación, el vacío y los cambios extremos de temperatura afectan directamente la estabilidad

de los materiales, por lo que resulta necesario diseñar métodos propios para estas condiciones y descartar los modelos tradicionales utilizados a nivel terrestre.

El Sistema de Control y Verificación Espacial (SCVE) se posiciona como una alternativa sólida, ya que combina sensores avanzados, blockchain e inteligencia artificial para garantizar un seguimiento completo y seguro de la mercancía.

Esta integración tecnológica permite supervisar el estado de los productos desde el lanzamiento hasta su llegada a destino.

La plataforma basada en blockchain fortalece la seguridad documental y asegura la integridad de los registros logísticos, ya que evita manipulaciones y mantiene un historial verificable.

Esta capacidad resulta esencial en un contexto sin una gobernanza interplanetaria consolidada, donde la confiabilidad de los datos determina el éxito de las operaciones científicas, comerciales y diplomáticas.

La integración de sensores capaces de detectar radiación cósmica junto con tecnologías IoT, se convierte en elemento clave para garantizar la trazabilidad de las mercancías en entornos espaciales. Esta combinación permite monitorear en tiempo real la posible exposición de radiación y asegurar el control, seguridad y la integridad de los productos transportados.

La inteligencia artificial amplía la capacidad operativa del sistema pues anticipa riesgos, detecta patrones anómalos y genera alertas preventivas.

Su habilidad para analizar grandes volúmenes de datos en tiempo real mitiga fallos derivados de fluctuaciones térmicas, eventos de radiación o interrupciones en la comunicación, especialmente en misiones de largo alcance hacia la Luna o Marte.

Finalmente, los documentos espaciales diseñados para este estudio representan un primer paso hacia la creación de normas aduaneras interplanetarias. Su estructura muestra que, en un futuro, será

indispensable contar con reglas claras que aseguren transparencia, seguridad y responsabilidad en el comercio más allá de la Tierra.



**CAPITULO XI: La integración de la ética y el
desarrollo sostenible en la administración del
comercio exterior: desafíos y estrategias para
economías emergentes**



Docente de la Universidad de Guayaquil

Guido Homero Poveda Burgos

Estudiantes de Licenciatura en comercio Exterior

Génesis Rosado Córdova

Eunice Salinas Montiel

Nataly Vallejo Demera

11.1. Resumen

En este capítulo se analiza como la integración de la ética y el desarrollo sostenible en la administración del comercio exterior constituye un desafío estratégico para las economías emergentes. Se justifica en la necesidad de dar una respuesta a las presiones globales por buenas prácticas responsables y transparentes, se busca reforzar la competitividad internacional. La metodología empleada combina revisión documental de fuentes primarias y secundarias, con énfasis en artículos, además de un análisis comparativo de políticas comerciales en distintos contextos político-económicos. Los principales resultados evidencian que la aplicación de criterios éticos y sostenibles mejora la reputación internacional, facilita el acceso a mercados y reduce riesgos regulatorios. Las conclusiones destacan la urgencia de diseñar estrategias adaptadas a las realidades locales, promoviendo innovación, cooperación institucional y formación profesional orientada a la sostenibilidad.

Palabras clave: Ética empresarial, desarrollo sostenible, comercio exterior, sostenibilidad económica, administración.

11.2. Introducción

El comercio exterior se ha consolidado como un componente esencial en el desarrollo económico de las economías emergentes, permitiendo la integración a los mercados globales y fomentando el crecimiento sostenido. Sin embargo, en el contexto actual, la sostenibilidad y la ética han emergido como pilares fundamentales para garantizar un desarrollo responsable y inclusivo. La (CEPAL, 2024) resalta que para que este crecimiento sea verdaderamente sostenible, las políticas comerciales deben incorporar criterios de protección ambiental, derechos laborales y responsabilidad social, promoviendo relaciones comerciales justas y transparentes. La implementación de prácticas éticas y sostenibles en las cadenas de suministro ayuda a reducir impactos negativos en el medio ambiente, fomenta la inclusión social y mejora la reputación de las empresas en mercados cada vez más exigentes (Daturas, 2024).

No obstante, estas economías se enfrentan a desafíos estructurales como limitaciones en infraestructura, escasa capacidad tecnológica y normativas insuficientes, que dificultan el cumplimiento de estándares éticos y sostenibles (Fondo Monetario Internacional, 2022). Para superar estas barreras, es crucial impulsar estrategias de cooperación internacional, fortalecer las instituciones y promover la responsabilidad social empresarial que permita un desarrollo comercial equilibrado con el respeto ambiental y social (Banco Mundial, 2023). Además, la transparencia en las cadenas de suministro y la adopción de modelos de economía circular se presentan como herramientas efectivas para alcanzar una gestión del comercio exterior alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (Datasur, 2024).

11.3. Metodología

Este trabajo utiliza una metodología cualitativa basada en la revisión documental de fuentes primarias y secundarias relevantes para el comercio exterior, la ética y el desarrollo sostenible en economías emergentes. Se priorizan artículos científicos recientes, informes oficiales y documentos internacionales que consideran el contexto político-económico en que se desarrollan estas prácticas. La metodología permite un análisis crítico y contextualizado de la integración de la ética y sostenibilidad en la administración comercial, favoreciendo la comprensión de los desafíos y estrategias actuales.

11.4. Diseño de investigación

El diseño de esta investigación se fundamenta en un enfoque cualitativo con elementos comparativos, orientado a analizar cómo la ética y el desarrollo sostenible se integran en la administración del comercio exterior en economías emergentes, con especial atención al caso ecuatoriano.

La elección de este diseño responde a la necesidad de comprender

fenómenos complejos que involucran dimensiones políticas, económicas, sociales y ambientales, más allá de los indicadores cuantitativos tradicionales. La ética y la sostenibilidad en el comercio exterior constituyen campos de estudio multidisciplinarios que requieren un abordaje integral. En el caso de Ecuador, la presión de los mercados internacionales y los compromisos derivados de los Objetivos de Desarrollo Sostenible hacen imprescindible un análisis que combine la revisión documental con la interpretación crítica de políticas públicas y prácticas empresariales (United Nations, 2015). Un diseño cualitativo permite captar las percepciones de actores clave y contrastar diferentes enfoques normativos y empresariales.

Este diseño presenta ventajas importantes, como la posibilidad de captar la complejidad del fenómeno integrando dimensiones éticas, sociales y económicas, la triangulación de fuentes que combina artículos científicos, documentos institucionales y análisis comparativos, y la flexibilidad para adaptar el estudio al contexto ecuatoriano, donde las políticas de sostenibilidad aún están en proceso de consolidación.

Sin embargo, también existen limitaciones, entre ellas la dependencia de fuentes documentales que puede generar sesgos si los artículos disponibles no reflejan toda la realidad regional, el acceso limitado a datos primarios en Ecuador que dificulta la construcción de indicadores específicos sobre ética empresarial en comercio exterior, y el carácter cualitativo del estudio que restringe la posibilidad de generalizar resultados a todas las economías emergentes (FAIRTRADE INTERNATIONAL, 2023).

La estrategia de análisis se desarrollará en tres fases: la identificación de categorías clave como ética empresarial, sostenibilidad, competitividad y gobernanza; el contraste entre fuentes que permitirá comparar hallazgos de artículos científicos con políticas nacionales e internacionales; y la síntesis crítica que integrará los desafíos y estrategias más relevantes para economías emergentes, con énfasis en Ecuador. Se espera demostrar que la integración de la ética y la sostenibilidad en el comercio exterior mejora la reputación internacional de los países emergentes, facilita el acceso a mercados exigentes como la Unión Europea, reduce riesgos regulatorios y

fortalece la competitividad, además de promover la innovación y la cooperación institucional.

En el caso ecuatoriano, se prevé que la adopción de estándares éticos y sostenibles en sectores como el agroexportador y el industrial contribuya a diversificar la oferta exportable y a consolidar la posición del país en cadenas globales de valor (Cedeño & Salazar, 2021). En conclusión, el diseño de investigación propuesto busca ofrecer un análisis crítico y contextualizado que aporte a la discusión académica y profesional sobre la integración de la ética y el desarrollo sostenible en la administración del comercio exterior, resaltando tanto los beneficios como los desafíos que enfrentan las economías emergentes en su camino hacia un modelo de comercio responsable y competitivo.

11.5. Desarrollo

En las economías emergentes, el comercio exterior se ha convertido en un motor clave para la competitividad internacional, la generación de empleo y la atracción de inversión. Sin embargo, este crecimiento no siempre ha considerado factores éticos ni sostenibles, generando tensiones relacionadas con desigualdad, impacto ambiental, cadenas de suministro injustas, deterioro de recursos naturales y prácticas empresariales poco transparentes.

Frente a esta problemática, la integración de la ética y del desarrollo sostenible en la administración del comercio exterior se vuelve un requisito indispensable para asegurar que el intercambio global genere beneficios reales y duraderos.

La ética aplicada al comercio exterior exige que las empresas tomen decisiones responsables frente a empleados, proveedores, consumidores, comunidades y autoridades. Esto implica transparencia en los procesos, cumplimiento normativo, respeto a los derechos humanos y rechazo a prácticas como el dumping, la corrupción, la explotación laboral o el uso de información privilegiada (Organización de las Naciones Unidas, 2015).

Al mismo tiempo, el desarrollo sostenible amplía este enfoque, ya que incorpora criterios ambientales y sociales dentro de la gestión comercial.

De esta forma, las empresas deben adoptar modelos de producción limpios, promover cadenas logísticas bajas en emisiones, garantizar el comercio justo, proteger la biodiversidad y alinearse con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

En este escenario, las economías emergentes enfrentan desafíos significativos. Muchos países carecen de infraestructura adecuada, marcos regulatorios sólidos, supervisión eficiente y profesionales especializados. Asimismo, las micro y pequeñas empresas encuentran dificultades para asumir los costos de certificaciones, modernización tecnológica o programas de sostenibilidad.

Pese a ello, estas economías también presentan grandes oportunidades. La demanda global de productos responsables ha crecido, y los países que integran prácticas éticas tienen mayores opciones de acceder a mercados exigentes como la Unión Europea, Norteamérica o Asia. Además, el fortalecimiento de la responsabilidad social empresarial, la digitalización del comercio, la trazabilidad y las alianzas público-privadas permiten crear entornos comerciales más justos, transparentes e inclusivos.

Por lo tanto, la integración ética en la administración del comercio exterior requiere un enfoque estratégico basado en: adopción de políticas corporativas claras, fortalecimiento de la gobernanza, uso de tecnologías para la trazabilidad, mecanismos de protección ambiental, y cooperación internacional para buenas prácticas.

Solo con este tipo de enfoque es posible construir un comercio exterior competitivo, sostenible y alineado al bienestar social.

Este enfoque supone revisar la manera en que los países emergentes se insertan en el mercado internacional, evaluar los efectos que sus actividades generan en la sociedad y el ambiente, y adoptar una visión empresarial que responda a estándares globales de responsabilidad.

Tradicionalmente, el comercio exterior en economías en desarrollo se ha centrado en maximizar volúmenes de exportación, reducir costos logísticos y atraer inversionistas, dejando en segundo plano elementos esenciales como la justicia social, la equidad, el manejo ambiental adecuado y la transparencia institucional.

Hoy, estas variables son fundamentales para establecer relaciones comerciales duraderas y confiables, ya que los consumidores y los mercados internacionales exigen productos y servicios que garanticen condiciones laborales dignas, procesos productivos limpios y un compromiso empresarial auténtico con el bienestar colectivo.

En este contexto, la ética se convierte en un mecanismo que regula el comportamiento de las empresas, orientándolas hacia prácticas comerciales responsables.

Esto implica evitar la corrupción en operaciones aduaneras, respetar las reglas del comercio internacional, cumplir con regulaciones sanitarias y ambientales, y adoptar políticas internas que promuevan la integridad en toda la cadena de valor. Este marco ético fortalece la credibilidad de los países emergentes y les permite participar con mayor solidez en acuerdos multilaterales y tratados comerciales.

El desarrollo sostenible, por su parte, actúa como un pilar complementario que redefine la forma en que las empresas gestionan sus procesos productivos y su relación con el medio ambiente. Las compañías que operan en comercio exterior se enfrentan al reto de reducir emisiones, utilizar tecnologías limpias, optimizar la logística para disminuir la huella de carbono y garantizar que sus productos cumplan con estándares ecológicos reconocidos internacionalmente.

11.6. Resultados

La integración de la ética y el desarrollo sostenible en la administración del comercio exterior representa uno de los mayores desafíos para las economías emergentes, pero también una de sus oportunidades más estratégicas.

Los resultados evidencian que las empresas que adoptan modelos responsables no solo reducen riesgos y cumplen con estándares internacionales, sino que además fortalecen su competitividad, generan valor compartido y contribuyen al bienestar colectivo.

Avanzar hacia un comercio exterior ético implica abandonar prácticas de corto plazo y adoptar una visión integral que combine: eficiencia económica, respeto a los derechos humanos, protección ambiental, transparencia en la gestión, inclusión social.

Las economías emergentes deben fortalecer su institucionalidad, actualizar sus marcos normativos, impulsar la digitalización y apoyar especialmente a sus pequeñas y medianas empresas, para que la sostenibilidad deje de ser un privilegio y se convierta en un estándar.

En conclusión, el comercio exterior del futuro dependerá de la capacidad de las empresas y los estados para alinear sus actividades con principios éticos y sostenibles. Solo así será posible construir un sistema comercial global más justo, ambientalmente responsable y beneficioso para las generaciones presentes y futuras.

Las empresas que integran principios éticos y sostenibles en su gestión suelen demostrar mayor capacidad para enfrentar situaciones de crisis, ya sean económicas, sanitarias o ambientales.

Esta resiliencia se debe a que cuentan con sistemas de gestión más sólidos, procesos orientados al control de riesgos y relaciones transparentes con sus grupos de interés, lo que les permite responder de manera más eficiente ante escenarios adversos.

No obstante, persisten ciertas limitaciones que dificultan la plena adopción de estos enfoques: en muchos países todavía existe un apoyo estatal insuficiente, escasean los incentivos financieros para promover prácticas responsables, se mantiene una marcada diferencia entre grandes empresas y pymes, y aún se observan marcos regulatorios con debilidades significativas. A pesar de estas barreras, la tendencia internacional evidencia que la ética y la sostenibilidad se están posicionando como elementos esenciales para un crecimiento económico más equilibrado y responsable.

En el ámbito social y comunitario, la incorporación de prácticas éticas dentro del comercio exterior ha generado impactos importantes. Uno de los principales avances es la mejora en las condiciones laborales, ya que las empresas que adoptan este tipo de enfoque suelen erradicar el trabajo infantil, garantizar la igualdad salarial, fortalecer la seguridad ocupacional y promover la capacitación continua de sus trabajadores.

Del mismo modo, los modelos de producción sostenibles fomentan la inclusión de pequeños productores dentro de las cadenas de valor, lo que permite integrar a agricultores, artesanos, proveedores locales y pequeñas y medianas empresas. Esta integración contribuye a reducir desigualdades económicas y fortalece el desarrollo de las comunidades.

Por otro lado, la aplicación de principios éticos también ha influido en la disminución de conflictos socioambientales.

La transparencia en las operaciones y la participación activa de las comunidades generan un clima de mayor confianza entre empresas, autoridades y población local. Esto resulta especialmente relevante en sectores como la minería, la agroexportación, la pesca y la energía, donde históricamente han surgido tensiones por el uso de recursos naturales y los impactos ambientales.

11.7. Conclusiones

La integración de la ética y el desarrollo sostenible en la administración del comercio exterior se ha convertido en un requisito indispensable para las economías emergentes que buscan insertarse con éxito en un entorno global cada vez más competitivo, regulado y consciente de los impactos socioambientales del comercio.

El análisis realizado demuestra que la sostenibilidad ya no es una opción periférica o un complemento empresarial, sino un eje estratégico que determina la capacidad de los países para acceder a mercados exigentes, proteger sus recursos naturales, prevenir prácticas desleales y consolidar un crecimiento económico con rostro

humano.

Los resultados obtenidos evidencian que un enfoque ético genera transformaciones profundas tanto a nivel empresarial como institucional.

Las organizaciones que adoptan principios de transparencia, responsabilidad y respeto a los derechos humanos fortalecen sus cadenas de suministro, reducen riesgos operativos, mejoran su reputación internacional y desarrollan relaciones más equilibradas con proveedores, trabajadores y comunidades.

Asimismo, incorporar prácticas sostenibles contribuye a disminuir la huella ambiental del comercio, optimizar el uso de recursos, modernizar procesos logísticos y estimular la innovación tecnológica, lo cual incrementa la resiliencia de los sectores exportadores e importadores frente a crisis económicas, climáticas o sanitarias.

En el plano social, la integración ética promueve oportunidades laborales más justas, impulsa la inclusión de pequeños productores, fomenta el diálogo comunitario y reduce tensiones derivadas de actividades comerciales que históricamente han generado impactos negativos en territorios vulnerables.

Además, la profesionalización del talento humano y la implementación de modelos de responsabilidad social empresarial fortalecen las capacidades nacionales para competir en igualdad de condiciones en los mercados internacionales.

Sin embargo, también se identifican desafíos significativos que deben ser abordados para que la transición hacia un comercio verdaderamente sostenible sea posible.

Entre los principales obstáculos destacan la falta de marcos normativos robustos, la limitada fiscalización estatal, la ausencia de incentivos para prácticas responsables y la brecha marcada entre grandes corporaciones y pequeñas empresas, que suelen carecer de recursos para certificaciones, innovación y capacitación.

La investigación confirma que la integración de la ética y el desarrollo sostenible en la administración del comercio exterior constituye un factor estratégico para las economías emergentes, ya que permite consolidar la confianza institucional, mejorar la reputación internacional y facilitar el acceso a mercados más exigentes.

Los resultados muestran que, en el caso ecuatoriano, la adopción de estándares ambientales y sociales en sectores como el agroexportador y el industrial ha favorecido la diversificación de la oferta exportable y ha fortalecido la competitividad del país en cadenas globales de valor.

Asimismo, se evidencia que la ética empresarial no se limita a la transparencia en las transacciones, sino que se vincula con la responsabilidad social y la gobernanza, generando relaciones más sólidas entre empresas, consumidores y organismos internacionales.



CAPITULO XII: Facilidad de desarrollo de minería espacial para obtención de recursos útiles para la vida



Docente de la Universidad de Guayaquil

Delia Alexandra Cevallos Castro

Estudiantes de Licenciatura en comercio Exterior

Josselyn Morales Paucar

Danna Suárez Garzón

11.8. Resumen

La escasez de recursos en la Tierra puede provocar un interés en encontrar algún otro medio para obtenerlos, al igual que el crecimiento acelerado de la economía, ha impulsado el interés por la minería espacial como una alternativa estratégica para garantizar el

abastecimiento de recursos para la humanidad. Este libro analiza la viabilidad económica y comercial del desarrollo de actividades mineras de asteroides, considerando su potencial impacto en el comercio exterior y en la estructura económica global. La metodología se basa en una revisión bibliográfica recientes, así como indicadores de la OCDE y literatura académica especializada. Los principales resultados muestran que, aunque la minería espacial enfrenta barreras tecnológicas y legales, su desarrollo podría transformar los mercados internacionales, diversificando las cadenas globales de suministro y generar nuevas dinámicas geopolíticas. En conclusión, la minería espacial surge como una oportunidad económica emergente cuya finalidad dependerá de la cooperación internacional y el avance tecnológico.

Palabras clave: Minería espacial, economía, comercio exterior, competitividad, tecnología.

11.9. Introducción

La búsqueda de nuevas fuentes de recursos ha impulsado un interés profundo en la economía espacial. A medida que los recursos terrestres se vuelven cada vez más escasos y costosos de extraer, la minería espacial ha dejado de ser una idea imposible para convertirse en una posibilidad económica, impulsada por avances tecnológicos, inversiones privadas y estrategias nacionales emergentes, etc.

Sin embargo, puede existir un crecimiento del sector minero espacial, mientras que diversos países y empresas pueden proyectan misiones orientadas a la obtención de minerales y compuestos de alto valor presentes en asteroides.

Esta tendencia no solo redefine la actividad económica más allá de la Tierra, sino que también plantea impactos directos en el comercio exterior, las cadenas globales de suministro y la competitividad internacional, entre otros. Por esa razón el presente libro analiza los posibles beneficios de la minería espacial y los cambios desde una perspectiva económica y comercial, evaluando oportunidades, riesgos

regulatorios.

11.10. Metodología

11.10.1. Enfoque de la Investigación

La presente investigación adopta una metodología Cualitativa tipo documental, en donde se realiza un análisis de varias fuentes relacionadas con la minería espacial, la economía y sus impactos comerciales internacionales.

De igual manera se priorizan los artículos, informes, documentos jurídicos y estudios económicos que se integran explícitamente los contextos económicos y comerciales en los que se desarrollan estas actividades emergentes.

Este estudio de investigación busca también comprender no solo los avances tecnológicos, sino también las dinámicas regulatorias, geopolíticas y económicas que moldean la viabilidad de la minería espacial más allá de una idea "futurista".

Este enfoque se selecciona debido a que la minería espacial constituye un campo emergente, donde aún no existe explotación comercial real, por lo que la evidencia disponible proviene principalmente de modelos tecnoeconómicos, estudios prospectivos, informes institucionales y debates de gobernanza internacional.

La naturaleza anticipatoria de este fenómeno exige recurrir a metodologías que permitan interpretar tendencias, identificar patrones y evaluar escenarios futuros a partir de la información ya existente.

La elección de un diseño documental es adecuada porque facilita la integración transversal de tres dimensiones clave del estudio: la viabilidad técnica de las operaciones de extracción y uso de recursos extraterrestres (ISRU), la evaluación económica y financiera basada en modelos de costos, retorno esperado e inversión público-privada, y los marcos éticos, legales y distributivos que definen la gobernanza internacional del espacio ultraterrestre.

Además, facilita la integración de perspectivas económicas, legales y tecnológicas, necesarias para evaluar cómo la obtención de recursos en el espacio puede transformar las estructuras del comercio exterior y la competitividad global.

11.11. Desarrollo

Los estudios indican que ciertos asteroides contienen concentraciones de minerales significativamente superiores a los minerales extraídos de la Tierra, lo que podría alterar una gran disponibilidad global de materias primas.

De acuerdo con la autora, (Blasco, 2020) menciona que incluso un solo asteroide de tamaño moderado puede contener miles de dólares en metales del grupo del platino, cuya escasez en la tierra limita la producción de la industria tecnológica avanzada.

El desarrollo de la minería espacial y la Utilización de Recursos In Situ (ISRU) es fundamental para la expansión sostenida de la humanidad en el espacio.

Esta sección presenta un análisis en profundidad de los aspectos técnicos y económicos que definen la viabilidad actual y futura de esta industria naciente.

Minería Espacial e ISRU

El concepto de minería espacial ha pasado de la ciencia ficción a una hoja de ruta tecnológica y de ingeniería. Su objetivo principal es la explotación de cuerpos celestes, como la Luna y asteroides cercanos a la Tierra (NEAs), para utilizar sus recursos, reduciendo drásticamente los costos y la dependencia de los lanzamientos desde la Tierra. (Markets, 2024)

¿Qué es ISRU (In-Situ Resource Utilization)?

La Utilización de Recursos In Situ (ISRU) se define como el conjunto

de tecnologías y métodos para obtener y procesar materiales de otros cuerpos celestes (como la Luna, Marte o asteroides) para su uso directo en la misma misión o en futuras operaciones espaciales.

En lugar de transportar todo desde la Tierra (lo cual es extremadamente costoso y logísticamente complejo), ISRU permite "vivir de la tierra" en el espacio, haciendo posibles las misiones de larga duración y el establecimiento de bases permanentes. (Markets, 2024)

El agua (en forma de hielo) es el recurso más importante que se busca a través de ISRU. Esto se debe a que el agua puede ser electrolizada para producir propelente de hidrógeno y oxígeno (combustible de cohete) y puede ser utilizada para el soporte vital de las tripulaciones.

Extracción de Recursos Clave: Agua, Metales y Regolito

La minería espacial se centra en la extracción de tres categorías principales de recursos, cada una con un uso estratégico en la órbita terrestre o en el espacio profundo:

Agua (H₂O):

- **Fuente:** El hielo de agua es abundante en los cráteres permanentemente sombreados (PSRs) de los polos lunares y en ciertos asteroides.
- **Método de Extracción:** El proceso más estudiado implica la excavación del material que contiene hielo (regolito) y su calentamiento mediante procesamiento térmico (por ejemplo, hornos solares o de microondas) para sublimar el hielo directamente a vapor, que luego se captura y purifica. (Markets, 2024)
- **Uso:** Es el recurso más inmediatamente útil. Sirve como: combustible espacial (al separarse en hidrógeno y oxígeno), consumible de soporte vital para los astronautas, y como escudo contra la radiación. (arxiv, 2018)

Metales y Minerales Raros:

Fuente: Los asteroides tipo M y los cuerpos lunares contienen grandes cantidades de metales del grupo del platino (PGMs), níquel, hierro y cobalto.

- **Método de Extracción:** En el caso de los asteroides, se proponen métodos de separación magnética o de procesamiento químico en el espacio. Empresas como AstroForge están desarrollando tecnologías para **refinar metales en el espacio** utilizando buses satelitales y lanzamientos de SpaceX, con el objetivo de retornar los recursos a la Tierra. (Markets, 2024)
- **Uso:** Suministro de minerales críticos en la Tierra o uso en la fabricación de estructuras en órbita.

Regolito:

- **Fuente:** La capa de polvo y roca no consolidada que cubre la superficie de la Luna y otros cuerpos.
- **Uso:** El regolito lunar es rico en silicio y oxígeno. Es un material excelente para la impresión 3D de estructuras in situ, como hábitats, carreteras y plataformas de lanzamiento. La impresión 3D es, de hecho, la aplicación que lidera las proyecciones de ingresos en el mercado de la minería espacial, con un 42.50% de la cuota en 2024. (Markets, 2024).

Tecnologías Disponibles y Desarrollo

El desarrollo técnico se centra en la automatización, la eficiencia energética y la robustez de los sistemas.

Robots y Maquinaria Autónoma

Se requieren sistemas de excavación, manejo de materiales y transporte que operen con un mínimo de intervención humana. Esto incluye **robots mineros** autónomos capaces de operar en ambientes extremos, y misiones de prueba que ya se han realizado para recolectar material de asteroides (JAXA con Hayabusa y NASA con OSIRIS-REx), confirmando la viabilidad de la recolección. (arxiv, 2018)

- **Propulsión Eléctrica y Solar:** Para misiones de larga distancia y para el movimiento de grandes volúmenes de material o bases de procesamiento, la propulsión eléctrica (como los propulsores iónicos o Hall) es clave por su alta eficiencia (bajo consumo de propelente), aunque su bajo empuje requiere mucho tiempo. La energía solar es esencial para alimentar los procesos de extracción y refinamiento térmico en el espacio. (arxiv, 2018)
- **Procesamiento Térmico y Químico:** La extracción de hielo requiere sistemas de calefacción que utilizan energía solar o nuclear (RTGs), como los reactores de reducción de hidrógeno. Para los metales, se buscan hornos de vacío o métodos de electrólisis del regolito fundido, lo que reduce la necesidad de traer equipos voluminosos. (arxiv, 2018)

Limitaciones Técnicas Reales

A pesar del progreso, la minería espacial se enfrenta a desafíos técnicos significativos que deben superarse antes de alcanzar una escala comercial viable:

- **CAPEX Extremadamente Alto y Riesgo Tecnológico:** El desarrollo, lanzamiento y establecimiento de operaciones mineras requieren un capital sustancial antes de cualquier retorno. Las líneas de tiempo son extensas y la tasa de falla en las misiones iniciales es una preocupación. (arxiv, 2018)
- **Ausencia de Demostración a Escala:** Las misiones exitosas (Hayabusa, OSIRIS-REx) han recolectado muestras pequeñas; todavía no se ha demostrado la viabilidad de

extraer, procesar y almacenar recursos a una escala industrial o comercial. (arxiv, 2018)

- **Desafíos Ambientales y Operacionales:** La operación en gravedad cero o baja gravedad (como en los asteroides) y en el polvo lunar (regolito abrasivo) crea problemas únicos para la maquinaria, como el desgaste de los equipos y la dificultad para fijar equipos de excavación. (arxiv, 2018)
- **Exploración y Verificación:** Se requiere un esfuerzo mayor en exploración y verificación de los cuerpos celestes para confirmar la concentración y accesibilidad de los recursos, lo cual es vital para el análisis de la viabilidad económica. (arxiv, 2018)

Modelos de Negocio y Mercados

La viabilidad financiera de la minería espacial es el motor que impulsará la próxima generación de desarrollo de infraestructuras en el espacio.

Costos Iniciales vs. Retorno Proyectado

La minería espacial es un emprendimiento de **alto riesgo y alta recompensa** que exige una paciencia inversora a largo plazo. (Markets, 2024)

- **Costos Iniciales (CAPEX):** El desarrollo de la tecnología necesaria, el lanzamiento de misiones de exploración y el establecimiento de operaciones mineras requieren una **inversión inicial sustancial que podría ascender a miles de millones de dólares.**
- **Retorno Proyectado (ROI) y Viabilidad Financiera:** La incertidumbre en el retorno de la inversión (ROI) es un obstáculo considerable.
 - **A Corto Plazo:** La viabilidad es baja debido a la alta

inversión y las extensas líneas de tiempo, ya que las misiones espaciales toman años o décadas antes de generar ingresos. El rendimiento positivo en la inversión podría no lograrse hasta dentro de **muchos años**. Las compañías se ven obligadas a buscar asociaciones con organismos espaciales gubernamentales de "bolsillos profundos" para sostener las operaciones.

- **A Largo Plazo:** La viabilidad aumenta con la disminución de los costos de lanzamiento (gracias a la reutilización de vehículos como Starship) y el aumento del interés en misiones de larga duración (como el programa Artemis). Se proyecta que el mercado de minería espacial, valorado en USD 2.58 mil millones en 2025, alcance USD 6.29 mil millones para 2040. (Markets, 2024)

Uso en Órbita vs. Traer Recursos a la Tierra

Los modelos de negocio se dividen en dos enfoques, cada uno con un riesgo de mercado diferente:

1. Uso en Órbita (Modelo ISRU):

- **Objetivo:** Producir y vender recursos a clientes en el espacio (estaciones espaciales, satélites, misiones de espacio profundo).
- **Ventaja:** Se evita el alto costo y el riesgo de reingresar recursos a la Tierra. El valor de los recursos en órbita (especialmente el agua/combustible) es extremadamente alto debido al costo de lanzarlos desde la Tierra.
- **Recurso Clave:** **Agua** para combustible (propelente) y soporte vital. Este es el recurso con mayor utilidad inmediata.

Traer Recursos a la Tierra (Modelo Clásico de Minería):

- **Objetivo:** Extraer metales preciosos (como los del grupo del platino) de asteroides y venderlos en los mercados terrestres.
- **Desafío (Paradoja de la Commodity):** Introducir grandes cantidades de metales preciosos en los mercados terrestres podría reducir los precios y disminuir la rentabilidad. Además, la competencia con la minería terrestre y los avances tecnológicos en este sector complican la competitividad de la minería espacial. (Markets, 2024)

Mercado Potencial

El mercado potencial se segmenta en función del valor estratégico del recurso.

Agua para Combustible Espacial, Constituye el mercado más sólido a corto y medio plazo. La capacidad de reabastecer naves y satélites en órbita transforma la economía de los viajes espaciales, permitiendo misiones más lejanas o largas sin necesidad de transportar el peso del combustible desde la Tierra.

- **Metales Raros y Críticos:** La minería espacial es vista como una forma viable de asegurar el suministro de minerales críticos. (Markets, 2024)
- **Manufactura en Órbita (Impresión 3D):** La impresión 3D, que utiliza el regolito o materiales metálicos extraídos, es la aplicación que lidera las proyecciones de ingresos del mercado.

Inversión Privada Global

La inversión en el sector espacial ha sido resiliente, aunque volátil, con una fuerte tendencia hacia el desarrollo de Infraestructura, que es el segmento donde encaja la minería espacial y el ISRU. (Capital, 2024).

Inversión Acumulada

Se han invertido un total de \$298.000 millones de dólares en 1.832 empresas espaciales únicas desde 2014.

Resiliencia de la Infraestructura

A pesar de las caídas en otros segmentos (como Aplicaciones), la inversión en Infraestructura (que incluye logística, lanzamiento y posiblemente la minería espacial) se mantuvo sólida, representando el 70% de la inversión total en 2023 y marcando su segundo récord anual más alto. (Capital, 2024)

Impulso Gubernamental

La inversión en Infraestructura está impulsada por el crecimiento en la demanda de los clientes gubernamentales, con una conexión ineludible entre el gasto de defensa y el sector comercial en países como EE. UU. El Capital de Riesgo (VC) sigue siendo la fuente más grande de capital para las empresas espaciales. (Capital, 2024).

Economía Espacial, Inversión y Minería Espacial

Tabla 1

Viabilidad económica del sector de minería espacial (ISRU) y la infraestructura relacionada.

Indicador Clave	Valor/Cifra	Horizonte Temporal	Contexto
Valor Proyectado del Mercado de Minería Espacial	\$23.08 Mil Millones USD	2040	Cifra máxima de mercado. Impulsado por el uso de recursos <i>in-situ</i> (ISRU) y la extracción de metales raros.

Indicador Clave	Valor/Cifra	Horizonte Temporal	Contexto
Tamaño Actual del Mercado de Minería Espacial	\$2.37 Mil Millones USD	2025	Representa la base de la industria, incluyendo tecnologías de prospección, desarrollo y misiones de prueba.
Tasa de Crecimiento Anual (CAGR) de la Minería Espacial	19.13%	2025 – 2040	Indica el ritmo acelerado de expansión de la industria en las próximas dos décadas.
Proyección de la Economía Espacial Global (Total)	\$1.8 Billones USD	2035	Estima el valor total de la economía espacial (incluyendo satélites, lanzamientos, infraestructura y aplicaciones).
Inversión Global de Capital de Riesgo Reciente (VC)	\$3.5 Mil Millones USD	2025	Cifra trimestral récord de inversión en tecnología espacial, mostrando el continuo interés de la inversión privada.

Indicador Clave	Valor/Cifra	Horizonte Temporal	Contexto
Inversión en Infraestructura Espacial (Proyección)	\$307.41 Mil Millones USD	2032	La infraestructura es el segmento donde se inscribe el ISRU. Representa casi el doble del valor de 2025.
Participación de América del Norte en Ingresos de Minería Espacial	36.45%	2024	Región líder en la generación de ingresos del mercado de minería espacial a nivel global.

11.12. Resultados

Los resultados de esta investigación permiten identificar tres hallazgos centrales sobre la viabilidad y las implicaciones económicas, técnicas y éticas de la minería espacial. En primer lugar, el análisis de los modelos tecnoeconómicos demuestra que la minería de asteroides es técnicamente posible, pero su rentabilidad depende de la reducción progresiva de los costos de lanzamiento, la automatización y el desarrollo de tecnologías ISRU.

En segundo lugar, los resultados muestran que el sector se encuentra en una fase precomercial, fortalecida por un incremento sustancial de inversiones privadas y alianzas público-privadas.

El informe del (World Economic Forum, 2024) evidencia que la economía espacial en general podría superar los 1,8 billones de dólares en las próximas décadas, lo que sitúa a la minería espacial como un subsector estratégico dentro de este crecimiento.

De manera complementaria, Aguilar et al. (2024) concluyen que la participación estatal mediante APP es esencial para reducir riesgos financieros iniciales, debido a los elevados costos tecnológicos y regulatorios.

Finalmente, se identifican resultados significativos en el ámbito ético y distributivo. Estudios recientes (Sun, 2022) revelan que la minería espacial podría intensificar desigualdades globales si solo las potencias espaciales acceden a los beneficios económicos.

Del mismo modo, Rivkin et al. (2020) advierten que la falta de acuerdos vinculantes sobre la propiedad de los recursos del espacio exterior genera tensiones respecto a la equidad intergeneracional y la sostenibilidad.

Esto implica que la gobernanza internacional será tan determinante como la tecnología para garantizar que los beneficios de los recursos extraterrestres no se concentren en pocos actores.

11.13. Conclusión

La minería espacial constituye una oportunidad emergente para diversificar las fuentes de recursos naturales, disminuyendo la dependencia de la Tierra y ofreciendo una posible solución a la escasez futura de minerales estratégicos.

Aunque la viabilidad técnica ha avanzado considerablemente, los elevados costos, los riesgos tecnológicos y la falta de explotación comercial real continúan siendo barreras importantes que limitan su desarrollo en el corto plazo.

El modelo de utilización de recursos en el espacio (ISRU) se perfila como el más factible y rentable durante las próximas décadas, debido a su impacto directo en la reducción de costos logísticos y el establecimiento de misiones espaciales sostenibles.

La minería espacial no solo implica un avance tecnológico, sino también una transformación económica y geopolítica, ya que podría redefinir las relaciones comerciales y el acceso a recursos estratégicos a nivel global.

Finalmente, el desarrollo de la minería espacial dependerá en gran medida de la cooperación internacional, el establecimiento de marcos legales claros y el fortalecimiento de alianzas entre gobiernos, agencias espaciales y empresas privadas.



**CAPITULO XIII: Tecnologías limpias
desarrolladas por la nasa como motor del
comercio sostenible**



Docente de la Universidad de Guayaquil

Clara Augusta Cabrera Jara

Estudiantes de Licenciatura en comercio Exterior

Selena Bermúdez Gualpa

Diana Jiménez León

David Muñoz Valladares

Judi Robles Plua

12.1. Resumen

La indagación examina, detenidamente, el impacto de las tecnologías limpias propulsadas por la NASA energía solar espacial y de alta eficiencia, junto con ingeniosos sistemas de reciclaje (agua y desechos), además de biotecnología y biomanufactura en el auge de industrias exportadoras sostenibles, se analizaron sus capacidades. Se

adoptó una metodología descriptivo-analítica; un profundo análisis de fuentes primarias documentos y programas de transferencia tecnológica emanados de la NASA, además del estudio detallado de la literatura científica reciente centrada en la biomanufactura y las energías solares avanzadas. Los hallazgos revelan que las innovaciones espaciales proponen plataformas tecnológicas transferibles como el agua potable reciclada, métodos para la transformación del CO₂ en sustratos químicos, igualmente, las tecnologías fotovoltaicas de alta eficiencia y los conceptos de Space-Based Solar Power, con potencial para la creación de productos exportables: sistemas de tratamiento hídrico, bioproductos tales como nutrientes, enzimas, y bioplásticos y módulos fotovoltaicos especializados. La viabilidad comercial, para ser efectiva, demanda una inversión sólida en escalado, certificación, infraestructura manufacturera y la formación de alianzas público-privadas. Como conclusión se destaca que las tecnologías NASA podrían funcionar como catalizadoras de cadenas de valor exportadoras verdes siempre y cuando se implementen políticas industriales y esquemas de transferencia tecnológica apropiados, resultaría clave para su éxito.

Palabras clave: Energía solar, Biotecnología, Reciclaje de agua, Transferencia tecnológica, Comercio sostenible.

12.2. Introducción

La transición hacia economías sostenibles ha elevado la demanda de tecnologías limpias que reduzcan emisiones, optimicen recursos y generen valor exportable. Las agencias espaciales, y en particular la NASA, desarrollan soluciones para entornos extremos (circuitos cerrados, eficiencia energética, biomanufactura) que resultan altamente relevantes para problemas terrestres: escasez hídrica, dependencia de cadenas de suministro y necesidad de productos sustentables de alto valor agregado. Este trabajo examina tres ejes tecnológicos (energía solar avanzada, reciclaje y biotecnología) originados o acelerados por la investigación espacial y evalúa su capacidad para convertirse en motores de industrias exportadoras ecológicas. Se presta atención especial al papel de la transferencia tecnológica (tech-transfer / spinoffs) y a las barreras de escalado e

inserción en mercados internacionales.

12.3. Metodología

12.3.1. Diseño de investigación

Se utiliza un diseño descriptivo-analítico fundamentado en la revisión documental y el análisis crítico para este estudio. Fuentes primarias tales como documentos, portales e informes oficiales provenientes de la NASA, además de programas spinoff y la NTRS, fueron prioridad. También, se consideró la literatura científica indexada revistas con revisión por pares publicadas principalmente entre 2019 y 2025 para mantener la relevancia temporal. Para aportar, se emplearon informes sobre políticas públicas concernientes a la biomanufactura y la tecnología espacial.

12.3.2. Justificación de la metodología

El análisis documental facilita la comprensión del progreso tecnológico, identificando ejemplos de transferencia tecnológica como pruebas de concepto, prototipos y licencias. Esto ofrece beneficios claros, tal como acceso inmediato a detalles técnicos, programas y resultados experimentales, además de posibilitar el análisis de la cadena de valor, desde el nacimiento de la innovación hasta su incursión en el mercado. Sin embargo, hay restricciones: un gran número de tecnologías se encuentran en fases TRL medias, precisando ampliación, y la información existente con frecuencia exalta el triunfo en entornos piloto sin considerar por completo los gastos de industrialización. Por esta razón, el análisis compara fuentes primarias, por ejemplo, de NASA, NTRS, Spinoff, con estudios académicos que implementan evaluaciones técnico-económicas y revisiones críticas.

12.4. Desarrollo

Energía solar avanzada y posibilidades exportadoras

La energía solar, un área donde la NASA ha logrado notables adelantos, promete una sustancial transferencia a la economía en la Tierra. La tarea de energizar satélites, vehículos robóticos y estaciones espaciales ha motivado la creación de paneles fotovoltaicos muy eficientes, ligeros y fuertes ante la radiación, superando las capacidades de la mayoría de las tecnologías comerciales. La NASA (2024) señala que los sistemas fotovoltaicos vanguardistas para smallsats ya exceden el 30% de eficiencia, y continúan desarrollándose con materiales compuestos y capas semiconductoras optimizadas para entornos rigurosos. Este avance es particularmente importante para industrias que requieren módulos solares de alto desempeño bajo condiciones desafiantes, desde desiertos hasta regiones polares o aplicaciones marítimas.

El diseño de células solares flexibles, que conjuga delgadez, adaptabilidad y eficiencia, ha sido otra contribución destacada. Originalmente, estas tecnologías se idearon para disminuir la masa en misiones espaciales y simplificar el despliegue automático de estructuras energéticas orbitales. En la Tierra, su aplicación se extiende a la agricultura inteligente, techos curvos, automóviles, drones, o dispositivos portátiles dirigidos a mercados distantes.

Efectivamente investigaciones actuales acentúan el posible uso de paneles solares ultraligeros en áreas agrícolas, pesqueras, y de telecomunicaciones lo cual fomentaría nuevos mercados para la exportación de tecnología en naciones en desarrollo. Como mencionan Onofri y colaboradores (2025) los materiales espaciales demuestran una robustez significativamente mayor a la de productos comerciales ordinarios, volviéndolos deseables para usos demandantes de autonomía energética extendida. El vasto esquema conceptual del Space-Based Solar Power (SBSP) también es fundamental. La NASA (2024) divulgó un análisis donde explora la recolección de energía orbital y su posterior transmisión a la Tierra a través de microondas o láseres. A pesar de ser todavía tecnologías en desarrollo los primeros resultados esbozan una trayectoria visionaria donde la energía solar espacial podría asistir las redes eléctricas globales de manera consistente constante y sin depender de cambios climáticos. La SBSP podría impulsar oportunidades en industrias exportadoras afines a proveedores de servicios energéticos,

compañías de infraestructura satelital y fabricantes de componentes especializados incluyendo antenas receptoras y materiales térmicos.

La exportación de bienes originados de estas innovaciones guarda relación directa con la facultad de expansión industrial de cada nación. Para varias naciones latinoamericanas, un enfoque factible implicaría centrarse en componentes con elevado valor añadido. Si bien crear celdas solares de nivel espacial podría resultar extremadamente oneroso, existe un mercado global en crecimiento para recubrimientos anti-radiación, selladores térmicos, estructuras ligeras de despliegue, sistemas de administración energética y dispositivos electrónicos resistentes a condiciones adversas. Estas cadenas de valor facultan a países, incluso con capacidades manufactureras limitadas, para involucrarse en industrias especializadas, donde la pericia técnica predomina sobre la manufactura a gran escala.

Las organizaciones aspirantes para integrarse a este mercado necesitarán, no obstante, evaluar los retos económicos. Los prototipos provenientes del sector espacial frecuentemente presentan gastos iniciales considerables, como resultado de la demanda de líneas de producción altamente especializadas. Sin embargo, como expone Manufacturing USA (2022), los costes habitualmente se aminoran significativamente cuando los procesos se industrializan y se vinculan a cadenas de suministro más amplias.

El desafío para las naciones en desarrollo radica en captar inversión semilla crucial, en capacitar talento humano experto, y además, robustecer los ecosistemas de innovación que faciliten la transposición de tecnologías espaciales al ámbito comercial.

El potencial exportador se ve igualmente impulsado por una creciente avidez mundial por soluciones energéticas distribuidas. Sistemas fotovoltaicos compactos, fáciles de transportar, y con una eficiencia notable, encuentran aplicación actualmente en áreas como la ayuda humanitaria, la exploración minera y monitoreo ambiental, así como en la movilidad eléctrica ligera. Por lo tanto, dado que son productos de alta especificidad y con una competencia limitada, los productores pueden ingresar en mercados internacionales de manera relativamente expedita. En ese panorama, las tecnologías derivadas de la NASA se

alzan como un catalizador perfecto para afianzar a las industrias nacionales en nichos premium asociados con la transición energética global.

Reciclaje y gestión circular (agua y residuos)

Un ámbito adicional donde la NASA ha generado tecnologías muy transferibles es la administración y el reaprovechamiento de recursos, centrados notablemente en el agua. Con el objetivo primordial de garantizar la supervivencia de tripulaciones espaciales durante extensos períodos, la agencia concibió uno de los sistemas de reciclaje más innovadores: el Water Recovery System (WRS) de la Estación Espacial Internacional, sin duda un logro notable. El WRS, tal como el NASA Ames Research Center (2025) detalla, recupera hasta el 98% del agua a partir de fluidos corporales, sudoración y residuos líquidos, empleando técnicas de filtración, destilación, absorción y oxidación catalítica.

La premisa subyacente a este progreso tecnológico es directa: en el espacio, la optimización de cada recurso es crucial. En la Tierra, sin embargo, estas mismas innovaciones tienen la capacidad de transformar radicalmente sectores industriales, particularmente aquellos que lidian con la escasez hídrica o costosos procesos de tratamiento. Sectores como la minería, la agricultura, las fuerzas armadas, la industria petrolera, y comunidades remotas, podrían beneficiarse al utilizar unidades de reciclaje compactas, basadas en el sistema WRS.

A diferencia de las plantas tradicionales, los sistemas ideados por la NASA destacan por su eficiente consumo de energía, notable resistencia a contaminantes complejos y una exigua necesidad de mantenimiento, presentándose, así como soluciones llave en mano particularmente atractivas para su exportación.

Más allá del ámbito hídrico, la NASA se ha involucrado profundamente en la gestión de residuos para futuras misiones lunares y marcianas. Iniciativas como LunaRecycle fomentan el uso de tecnologías que transforman desperdicios orgánicos y plásticos en recursos valiosos como energía, fertilizantes, o materiales aptos para

ser reutilizados. Estos métodos se fundamentan en procesos tales como la pirolisis, gasificación, y bioconversión, optimizados para un funcionamiento continuo y con una mínima generación de subproductos peligrosos. Si bien originariamente concebidos para el espacio, varias de estas soluciones ya se han aplicado exitosamente en entornos terrestres, desde micro plantas de reciclaje hasta incineradores con bajo impacto ambiental y sistemas avanzados de compostaje. La ESA (2023) asimismo, ha puesto de manifiesto la pertinencia de estos avances, señalando que las tecnologías espaciales pueden mitigar de forma sustancial la escasez hídrica y mejorar la sostenibilidad en diversos procesos industriales.

En lo concerniente a las exportaciones, el mercado mundial de tecnologías de tratamiento de agua y reciclaje ostenta una dinámica envidiable y goza de una prometedora trayectoria de crecimiento.

Países aspirando a sistemas inspirados en la ingeniería de la NASA, hallarán terreno fértil para la especialización, concretamente en diversas áreas de negocio estratégicas:

1. Módulos reducidos para purificación hídrica resultan particularmente atractivas para los sectores mineros, turísticos, y organizaciones no gubernamentales que brindan auxilio humanitario.
2. Sistemas descentralizados para el reciclaje, conformado por pequeños dispositivos capaces de transformar residuos orgánicos y plásticos, ideales para zonas rurales e industrias medianas.
3. Materiales vanguardistas, originados de procesos de reciclaje avanzado, tales como membranas semipermeables, catalizadores, filtros y resinas de intercambio.

La solidez técnica intrínseca de estos productos es una clara ventaja en mercados internacionales donde la calidad y eficiencia energética predominan sobre el precio; empero, tal como NASA Spinoff (2024) señala, su viabilidad comercial requiere certificaciones sanitarias internacionales, pruebas en escenarios reales y la formación de alianzas estratégicas con entidades públicas y privadas que puedan validar su funcionamiento a escala.

Biotecnología y biomanufactura (bioeconomía circular)

En años recientes, un área floreciente en la NASA es la exploración de biología sintética y biomanufactura espacial; se busca elaborar nutrientes, bioplásticos, enzimas y demás compuestos orgánicos valiéndose de microorganismos cuidadosamente programados. Aversch et al. (2023) argumentan convincentemente el enorme potencial de estas tecnologías; ellas posibilitan la conversión de CO₂, desperdicios biológicos, y mínimos recursos en productos de alta valía

El proyecto BioNutrients, como ejemplo paradigmático, procura generar vitaminas, antioxidantes, y nutrientes vitales durante largas misiones. Con tal fin, la NASA se dedica al desarrollo de microorganismos competentes para sintetizar nutrientes, de modo seguro, eficaz, y estable, empleando exiguas cantidades de insumos. Este planteamiento abre el camino a alternativas terrestres en la producción nutracéutica, implicando costos reducidos y menor impacto ambiental; resultando idóneas para su exportación en mercados como los alimentos funcionales, la salud preventiva, y la suplementación.

Por otro lado, la electro-biofabricación representa un elemento central para la conversión de CO₂ en valiosos compuestos químicos. Estudios recientes Alli et al. (2024), revelaron que la biomanufactura tiene el potencial de redefinir el manejo del dióxido de carbono, un desecho industrial importante. Esto transforma el CO₂ en moléculas orgánicas, útiles en la producción de bioplásticos, combustibles sintéticos e incluso enzimas industriales. Este proceso implica directamente la economía circular, mitigando la dependencia de combustibles fósiles, y reduciendo las emisiones de carbono también.

La transferencia de estas innovadoras tecnologías, hacia industrias exportadoras, podría tener un impacto mayor, sin duda. Las naciones, con una infraestructura biotecnológica sólida, tendrían la capacidad de desarrollar:

- Bioplásticos de alto valor, fabricados a partir de CO₂ o desechos orgánicos.

- Nutracéuticos y suplementos alimenticios, usando la biología sintética.
- Enzimas y catalizadores innovadores, aplicados en las industrias textil, farmacéutica y alimentaria.
- Materiales biodegradables específicos, destinados al empaquetado ecológico.

La ventaja competitiva para los países que implementen estas estrategias es innegable. La biomanufactura crea productos previamente obtenidos por procesos petroquímicos contaminantes. Por si eso fuera poco, como puntualiza Onofri y su equipo (2025), la biología sintética espacial está adaptada a entornos con recursos limitados, lo que la hace útil en lugares con energía o materia prima, costosa o poco disponible.

A pesar de ello, el alcance del impacto exportador estará sujeto al "escalado". Las tecnologías biotecnológicas, emanadas del ámbito espacial, generalmente operan en entornos cuidadosamente controlados y con volúmenes limitados; a escala industrial, sin embargo, se precisa de fermentadores, biorreactores, cadenas de frío rigurosas, certificaciones sanitarias exhaustivas y un acceso sin trabas a capital de riesgo. El informe del PCAST, de 2022, enfatiza que las naciones que aspiren a fomentar bioeconomías prósperas deben canalizar sus recursos hacia nodos de biomanufactura, laboratorios piloto estratégicos y centros de transferencia tecnológica que sirvan de enlace entre las instituciones universitarias y las empresas.

En lo concerniente a la sostenibilidad, la biomanufactura despliega ventajas innegables. Esta técnica genera menor cantidad de residuos, demanda una menor utilización de agua y energía, y emplea carbono capturado como material base. Estas características aumentan su atractivo en mercados internacionales donde los compradores procuran cadenas de suministro con una huella ambiental reducida. Más aún, el florecimiento de políticas de economía circular, implementadas en la Unión Europea y Norteamérica, abre sendas para exportaciones de bioproductos que sean certificables y rastreables.

Transferencia tecnológica, ecosistema y política industrial

Aunque las tecnologías limpias de la NASA prometen bastante, la transferencia de tecnología y el ecosistema productivo nacional son CLAVE para promover las exportaciones verdes. La NASA gestiona un programa de transferencia, el Technology Transfer Program (T2P), enorme a nivel mundial que facilita licencias, spinoffs, y colaboraciones industriales. De acuerdo con datos de NASA (2023), cada año miles de patentes y desarrollos tecnológicos se ofrecen a empresas interesadas en su adaptación comercial.

Sin embargo, varios factores externos afectan la transformación de estos avances en productos exportables:

1. Políticas públicas son esenciales: incentivos fiscales, bajar aranceles a equipos científicos, subsidios a la innovación y programas SBIR/STTR como en EE UU.
2. Infraestructura industrial: requiere laboratorios, plantas piloto, centros de prototipado, manufactura avanzada y las certificaciones pertinentes.
3. Capital humano resulta FUNDAMENTAL: ingenieros espaciales, biotecnólogos, expertos en materiales, químicos, y especialistas en energías renovables.
4. Acceso a mercados internacionales: tratados comerciales, certificaciones ISO, además de acuerdos de manufactura con otros países son importantes.

Veamos, las tecnologías fotovoltaicas de vanguardia demandan, para su correcta homologación, ajustarse a las certificaciones IEC. Asimismo, las innovaciones en el reciclaje de agua requieren la necesaria aprobación sanitaria y ambiental, sin discusión. Los bioproductos, a su vez, solicitan certificaciones rigurosas, como FDA, EFSA u otras equivalentes. Aquel país que cumpla con estos preceptos, sus industrias abren puertas a mercados de alto valor, donde la ganancia económica supera a las manufacturas habituales.

Los datos apuntan a que las naciones que apuestan estratégicamente por la transferencia tecnológica aumentan su capacidad exportadora. NASA Spinoff (2024) presenta ejemplos donde tecnologías purificadoras de agua, creadas inicialmente para misiones espaciales, se han transformado en productos comercializables a escala global. Esta tendencia sugiere, con claridad, que la transferencia tecnológica opera como un puente eficiente para convertir el saber científico en productos para el mercado.

12.5. Resultados

La evaluación de los hallazgos revela una disparidad en la madurez tecnológica de las tecnologías limpias impulsadas por la NASA, un factor determinante en su capacidad como catalizadoras del comercio sostenible. Primero que nada, se distingue que las innovaciones en energía solar avanzada y sistemas de reciclaje ostentan niveles TRL considerablemente altos, sugiriendo una transferibilidad casi inmediata a las industrias terrestres interesadas en refinar sus procesos o aumentar su desempeño ambiental. Estudios recientes, de hecho, sugieren que los subsistemas solares destinados a satélites diminutos sobrepasan los paneles comunes en eficiencia y robustez, creando oportunidades de exportación en áreas como la fabricación de energía y las soluciones descentralizadas para regiones rurales (NASA 2024). Igualmente, los sistemas de reciclaje ideados para las misiones espaciales, singularmente aquellos que emplean membranas avanzadas para el tratamiento del agua, han sido objeto de licencias comerciales, comprobando la factibilidad de la transferencia tecnológica y la existencia de casos concretos de adopción comercial (NASA Spinoff 2023).

No obstante, aunque el desarrollo de estas tecnologías simplifica su uso en la industria el panorama difiere en biotecnología espacial. Aunque este campo avanza rápido aún existen retos que dificultan su desarrollo industrial. Estudios en biomanufactura en microgravedad muestran que el cultivo eficiente de organismos tejidos o enzimas en el espacio podría revolucionar la producción de biomoléculas caras. Sin embargo, hay obstáculos legales, logísticos y de infraestructura que deben superarse antes de la comercialización (Nature

Communications, 2023). Por lo tanto y a pesar del alto potencial de exportación se requiere fortalecer los centros de biomanufactura establecer políticas de apoyo y crear cadenas de valor especializadas para que estos procesos prosperen.

Además, un importante descubrimiento sugiere que las tecnologías espaciales pueden incorporarse naturalmente en modelos de economía circular ofreciendo una ventaja sobre las industrias tradicionales. Precisamente por esto, los sistemas de valorización del CO₂ los biopolímeros, resultado de síntesis eficaces, junto a módulos compactos para el tratamiento del agua, emergen como productos exportables, destinos ideales los mercados en busca de soluciones sostenibles, de alto rendimiento.

Estudios recientes, a saber, ponen de manifiesto que las industrias que abrazan las tecnologías de reciclaje avanzado no solo miran los costos operativos, sino que además, a su vez, mejoran notablemente su posicionamiento comercial, teniendo acceso a segmentos premium, esos que valoran la trazabilidad ambiental (Rodríguez-López & Singh, 2024).

En conclusión, el análisis nos lleva a corroborar la existencia de una relación directa y evidente entre adopción tecnológica, eficiencia productiva y oportunidades de exportación ecológica.

A fin de cuentas, al examinar fuentes gubernamentales, académicas y tecnológicas, resulta manifiesto que la carencia de políticas públicas enfocadas a la transferencia tecnológica limita considerablemente el aprovechamiento del conocimiento generado por la NASA. Informes especializados resaltan que la creación de hubs tecnológicos, sumada a incentivos fiscales y sistemas de certificación internacional, se vuelve un requisito indispensable, para que las innovaciones espaciales se traduzcan en productos exportables, en lugar de permanecer en una fase precomercial prolongada (PCAST, 2022). Como resultado, los hallazgos revelan que la capacidad de exportación se fundamenta no solo en el progreso tecnológico, sino también en la presencia de instituciones robustas que impulsen la innovación. Es decir, esta conexión cobra una importancia particular en las economías en desarrollo, dado que el fomento de un comercio viable requiere

enfoques integrales que armonicen la destreza científica, normativas efectivas y el vigor emprendedor.

12.6. Conclusiones

Para concluir el estudio indica que las tecnologías limpias propulsadas por la NASA sirven como catalizador de innovación, crucial para empresas que se dedican al comercio sostenible, pero siempre considerando simultáneamente, los problemas técnicos y organizativos que influyen en su implementación. Primero, se establece que los avances en energía solar y los sistemas de reciclaje ostentan una madurez adecuada, permitiendo su aplicación inmediata en las cadenas productivas terrestres. Esto, por supuesto, mejora la eficiencia energética, disminuye la utilización de recursos y aumenta la competitividad internacional de las industrias verdes. Evidentemente, estos sectores constituyen los pilares de las exportaciones sostenibles a corto y medio plazo. Segundo, los ejemplos de spinoff documentados en el tratamiento del agua y las tecnologías de membranas confirman la factibilidad de transferir tecnología espacial a la industria civil. El conocimiento aeroespacial, por lo tanto, puede materializarse en productos comercializables, cumpliendo con estándares ambientales estrictos. Dicha experiencia genera un marco de referencia útil, principalmente para las naciones que pretenden diversificar sus exportaciones a través de la innovación sostenible.

Además, la investigación dictamina que la biotecnología espacial exhibe una posibilidad estratégica para desarrollar productos de valor agregado considerable, incluyendo biopolímeros, enzimas, y nutracéuticos, con capacidad para acceder a nichos de mercado especializados. Sin embargo, el éxito exportador en esta área necesita cuantiosas inversiones en infraestructura crucial, así como regulaciones transparentes y asociaciones sólidas entre gobierno, universidades e industrias. De manera esencial, la explotación efectiva de este sector depende de la capacidad distintiva de cada nación para forjar ambientes de innovación de punta.

Paralelamente, se establece que la transferencia tecnológica es viable

solo con un compendio consistente de políticas públicas diseñadas para impulsar la expansión industrial, la certificación ambiental, y la mitigación de peligros tecnológicos. En defecto de estas políticas, las innovaciones originadas en la NASA tienden a permanecer como prototipos, frenando su impacto comercial sostenible (PCAST, 2022). En consecuencia, el papel estatal emerge como un factor absolutamente necesario para convertir la innovación científica en exportaciones verdes.

Finalmente, el estudio revela que la sostenibilidad, junto con la circularidad comprendidas como la facultad de transmutar desechos, afinar recursos, y recortar emisiones propician indudables ventajas competitivas ante los productos convencionales. Esto abre las puertas a mercados de alta gama, donde se aprecia la trazabilidad ambiental y la merma del impacto ambiental. A causa de esto, la integración de tecnologías limpias, algunas inspiradas o trasladadas por la NASA, no sólo intensifica la ecoeficiencia de las industrias exportadoras; además, cataloga a los países como participantes clave en el comercio global con conciencia.



**CAPITULO XIV: Producción y exportación de
alimentos aeroespaciales con alto valor proteico:
una oportunidad de desarrollo para Ecuador**



Docente de la Universidad de Guayaquil

Guido Homero Poveda Burgos

Docente de la Universidad Estatal de Milagro

César José Ávila Martínez

Estudiantes de Licenciatura en comercio Exterior

Alex Arévalo Chenche

Carlos Chang Macías

Joseph Escobar Arreaga

Lisbeth Pérez Miranda

Nataly Vallejo Demera

13.1. Resumen

La presente investigación analiza el potencial que tiene Ecuador para producir y exportar alimentos aeroespaciales con alto valor proteico,

un sector en crecimiento impulsado por misiones espaciales de larga duración, turismo espacial y la expansión de estaciones comerciales. Mediante un enfoque mixto, se integraron análisis documentales, datos técnicos y evidencia científica provenientes de agencias espaciales, instituciones nacionales y literatura especializada. Los resultados muestran que Ecuador posee ventajas comparativas basadas en su biodiversidad, capacidad agrícola y desarrollo biotecnológico emergente, especialmente en materias primas como la quinua, el chocho y la espirulina; además, identifica oportunidades para innovación en procesos y cadenas de valor. Asimismo, se detallan requisitos técnicos, barreras de acceso y modalidades estratégicas de inserción en el mercado internacional. Se concluye que, con inversión tecnológica, certificaciones rigurosas y alianzas internacionales, el país puede posicionarse como un proveedor competitivo en una industria de alto valor agregado, contribuyendo significativamente a la diversificación productiva y al desarrollo económico nacional.

Palabras clave: Alimentos aeroespaciales, proteínas alternativas, biotecnología alimentaria, exportaciones ecuatorianas, industria espacial.

13.2. Introducción

En las últimas décadas, el desarrollo de tecnologías aeroespaciales ha impulsado una creciente demanda por alimentos especializados capaces de cubrir los requerimientos nutricionales de astronautas durante misiones de larga duración. Este sector, históricamente dominado por países como Estados Unidos, Japón y miembros de la Unión Europea, ha comenzado a abrirse hacia nuevos actores capaces de producir alimentos funcionales, estables y altamente nutritivos. Para Ecuador, un país con amplia biodiversidad y potencial agroindustrial, la producción y futura exportación de alimentos aeroespaciales representa un espacio emergente para diversificar su matriz productiva y aumentar su presencia en mercados tecnológicamente avanzados (Torres, 2022).

La presente investigación aborda los conceptos esenciales necesarios para comprender la naturaleza de los alimentos aeroespaciales, sus

propiedades proteicas y la relevancia de su incorporación en la industria espacial global.

La investigación sobre la producción y exportación de alimentos aeroespaciales con alto valor proteico resulta pertinente debido al crecimiento acelerado de la industria espacial y a la necesidad global de desarrollar alimentos capaces de mantener el rendimiento físico y cognitivo de los astronautas en misiones de larga duración. Dado que las condiciones de microgravedad alteran el metabolismo humano, provocando pérdida de masa muscular y ósea, el estudio de alimentos especializados —particularmente aquellos con alto contenido proteico— se convierte en una prioridad para organismos como la NASA y la Agencia Espacial Europea (NASA, 2021; ESA, 2021). Esto justifica la importancia científica y tecnológica de analizar las características nutricionales de estos productos y su papel dentro de las misiones espaciales.

Además, comprender las características y exigencias de los alimentos aeroespaciales es fundamental para identificar las oportunidades que emergen a nivel internacional. La literatura evidencia tendencias crecientes hacia la producción de alimentos funcionales, proteicos y tecnológicamente procesados mediante técnicas como la liofilización, la compactación nutricional y el uso de proteínas vegetales y microalgas (FAO, 2020). Analizar estas tendencias permite establecer un marco conceptual actualizado y alineado con la realidad del mercado global, lo que sustenta la relevancia académica del presente estudio.

La justificación también se sostiene en el hecho de que el sector espacial está experimentando una expansión sin precedentes, impulsado por el ingreso de empresas privadas, el turismo espacial y los planes de colonización lunar y marciana. Esta demanda creciente requiere nuevos proveedores capaces de desarrollar alimentos seguros, nutritivos, livianos y estables, lo que abre un campo de investigación con proyección económica y científica (Davis, 2022). Por ello, estudiar este fenómeno desde un enfoque informativo aporta claridad sobre los factores que impulsan el crecimiento del mercado y sobre las oportunidades para nuevos actores internacionales.

Asimismo, la investigación es especialmente relevante para el contexto ecuatoriano. Ecuador cuenta con una biodiversidad privilegiada y una producción significativa de superalimentos como la quinua, el amaranto, el cacao fino y diversas proteínas vegetales con potencial para ser adaptadas al sector aeroespacial (Jaramillo & Ruiz, 2020). Analizar estos recursos permite evidenciar el potencial del país para integrarse en cadenas de producción de alto valor agregado y diversificar su matriz exportadora. Esta visión estratégica fortalece la pertinencia del estudio y respalda su utilidad para el ámbito académico, productivo y gubernamental.

13.3. Metodología

La presente investigación se desarrolla bajo un enfoque mixto, debido a la complejidad del fenómeno analizado: la producción y exportación de alimentos aeroespaciales de alto valor proteico como una oportunidad de desarrollo para Ecuador. Este tipo de estudio requiere combinar mediciones objetivas con la comprensión de percepciones, capacidades tecnológicas y condiciones del entorno productivo. La perspectiva mixta resulta adecuada porque permite integrar datos numéricos, documentales y testimoniales en un solo proceso analítico, obteniendo una lectura más completa del problema.

Según Hernández-Sampieri, Collado & Baptista (2014), los métodos mixtos se caracterizan por reunir procedimientos cuantitativos y cualitativos dentro de un mismo diseño, de manera que la interpretación final surge de toda la evidencia en conjunto. Estos autores explican que este enfoque ha cobrado fuerza en el siglo XXI porque muchos fenómenos sociales, tecnológicos y organizacionales requieren la combinación de distintos tipos de datos. Esto coincide con lo señalado por Creswell (2013), quien sostiene que la investigación mixta es apropiada cuando ninguna aproximación por sí sola permite captar la totalidad del fenómeno y es necesario integrar secuencias, comparaciones o complementaciones entre datos CUAN y CUAL.

Torres (2019) enfatiza que la ruta mixta supera la simple suma de las dos perspectivas tradicionales y logra potenciar sus aportes mediante la integración de sus resultados, generando metainferencias más sólidas. En su planteamiento, este tipo de enfoque emplea información

numérica, verbal, textual, visual y simbólica, lo cual es coherente con el tema de este estudio, que involucra análisis tecnológicos, revisión normativa, criterios de expertos, capacidades productivas y estimaciones de mercado.

13.3.1. Diseño de investigación

El diseño de investigación es la estructura planificada de procedimientos y técnicas que permite responder preguntas de investigación y garantizar la validez de los resultados (Alonso-Serna, 2019). El estudio se plantea como un diseño no experimental, transeccional (transversal) de carácter descriptivo, con un enfoque mixto aplicado a fuentes ya publicadas. Se adopta además una lógica secuencial exploratoria: primero se desarrolla una revisión cualitativa y crítica de documentos técnicos, normativos y literatura científica para identificar variables relevantes, barreras tecnológicas y vacíos; en una segunda etapa se realizan análisis cuantitativos sobre datos secundarios (estadísticas oficiales, bases de comercio e informes institucionales) con el fin de contrastar y dimensionar los hallazgos previos. Esta secuencia permite integrar evidencia numérica y textual sin recurrir a trabajo de campo, favoreciendo la triangulación de fuentes y la elaboración de conclusiones coherentes.

13.3.2. Justificación de la metodología

Se opta por un diseño descriptivo porque el objeto de estudio de alimentos aeroespaciales de alto valor proteico se sustenta mayoritariamente en protocolos, normas, resultados experimentales y reportes institucionales ya publicados por agencias espaciales, centros de investigación, organismos regulatorios entre otros. El enfoque mixto se justifica al combinar:

- **Datos cuantitativos** (estadísticas de comercio exterior, indicadores de producción, registros oficiales, estimaciones económicas).
- **Datos cualitativos** (análisis de normativas, lineamientos técnicos, políticas públicas y descripciones de procesos tecnológicos).

Esta combinación ofrece una visión más completa y contextualizada del potencial exportador de Ecuador y facilita la comparación con experiencias internacionales.

13.3.3. Prioridad de fuentes y consideración del

contexto político-económico

Se priorizarán fuentes primarias siempre que sea posible: normas y guías de agencias espaciales (NASA, ESA, JAXA), documentos técnicos (AOAC, ISO), artículos científicos con datos experimentales, informes institucionales y bases oficiales (INEC, Banco Central del Ecuador, ProEcuador, FAOSTAT, UN Comtrade). Asimismo, se analizará de forma explícita el contexto político-económico que condiciona la inserción de productos especializados (políticas de innovación, incentivos a la exportación, barreras regulatorias), pues dicho marco influye en la viabilidad práctica de cualquier estrategia de desarrollo y comercio.

Ventajas

- Empleo de evidencia verificada por instituciones reconocidas y literatura revisada por pares.
- Reducción de sesgos derivados de percepciones individuales.
- Capacidad para comparar y dimensionar escenarios internacionales frente a la realidad ecuatoriana.
- Viabilidad con recursos limitados y sin necesidad de trabajo de campo.

Limitaciones

- Posible insuficiencia de datos específicos sobre producción nacional de alimentos aeroespaciales, lo que obliga a realizar inferencias a partir de información análoga.
- Dependencia de la disponibilidad y calidad de las fuentes públicas y académicas.
- Ausencia de evidencia primaria directa de actores locales, por lo que las conclusiones se circunscribirán al alcance documentado y se expresarán con las debidas reservas.

13.4. Desarrollo

Los alimentos aeroespaciales

Los alimentos aeroespaciales son productos nutricionales especialmente formulados para su consumo en condiciones de microgravedad y ambientes espaciales, donde la estabilidad, seguridad sanitaria, densidad nutricional y facilidad de consumo son fundamentales. De acuerdo con la NASA (2021), estos alimentos deben cumplir con estándares rigurosos de inocuidad, vida útil prolongada, empaques livianos y resistencia a la radiación.

- En términos generales, los alimentos aeroespaciales:
- Mantienen su valor nutricional por largos periodos.
- Presentan bajo peso y fácil manipulación.
- Pueden consumirse sin necesidad de refrigeración ni preparación compleja.
- Incorporan tecnologías como liofilización, deshidratación térmica y compactación nutricional (Jaramillo & Ruiz, 2020).

Características nutricionales y énfasis en el alto valor proteico

El alto valor proteico es uno de los requisitos centrales en la dieta aeroespacial. Esto se debe a que los astronautas sufren pérdida de masa muscular y ósea debido a la microgravedad, por lo que requieren proteínas de rápida absorción y alto rendimiento biológico (Kramer, 2023).

Entre las características nutricionales más relevantes se encuentran:

- Proteínas completas con todos los aminoácidos esenciales.
- Capacidad de digestión eficiente aun en microgravedad.
- Alta densidad calórica en pequeños volúmenes.
- Micronutrientes clave como hierro, vitamina D, calcio, omega 3, antioxidantes.
- Reducción de sodio y grasas saturadas para evitar retención de líquidos o complicaciones metabólicas.

Los alimentos con alto valor proteico usados actualmente incluyen barras compactadas, proteínas vegetales liofilizadas, mezclas proteicas fortificadas y alimentos funcionales diseñados a partir de soya, quinua, amaranto, insectos comestibles y otros insumos de alto rendimiento (FAO, 2020).

Importancia de los alimentos aeroespaciales para misiones espaciales

Los alimentos cumplen funciones críticas en la operación aeroespacial. La Agencia Espacial Europea (ESA, 2021) señala que una dieta adecuada incide directamente en la salud, el rendimiento cognitivo y la estabilidad emocional de los astronautas, especialmente en misiones prolongadas como las previstas hacia Marte.

Su importancia radica en:

- Evitar pérdida de masa muscular y descalcificación ósea.
- Mantener energía y concentración, fundamentales para actividades extravehiculares.
- Soportar condiciones extremas, incluyendo cambios de temperatura y exposición a radiación.
- Optimizar logística y carga útil, reduciendo peso y volumen.

En misiones que pueden durar meses o años, la disponibilidad de alimentos estables y proteicos se convierte en un factor determinante para la supervivencia y el rendimiento humano (Davis, 2022).

- Tendencias globales en la producción de alimentos para la industria aeroespacial
- A nivel mundial, varias tendencias están marcando el desarrollo de este sector:
- Crecimiento de alimentos funcionales y proteicos
- La industria privilegia fuentes vegetales de alto contenido proteico, como legumbres, microalgas (spirulina, chlorella) y granos andinos (quinua, amaranto) (FAO, 2020).
- Innovación en tecnologías de conservación
- La liofilización es la técnica más utilizada debido a su eficiencia en mantener nutrientes y reducir peso hasta en 90% (NASA, 2021).

- Producción de alimentos en órbita
- Experimentos de cultivo de vegetales en estaciones espaciales están aumentando, impulsando investigaciones sobre agricultura espacial (ESA, 2021).
- Expansión del mercado privado
- Empresas como SpaceX, Blue Origin y Axiom Space han generado un incremento en la demanda de proveedores de alimentos espaciales humanos y para experimentación biológica (Torres, 2022).

El crecimiento del sector aeroespacial alimentario se justifica por varios factores. Entre ellos destacan el aumento del turismo espacial, el avance de empresas privadas como SpaceX, Blue Origin y Axiom Space, y los proyectos de colonización lunar y marciana, que requieren sistemas alimentarios mucho más eficientes y duraderos. Davis (2022) señala que la búsqueda de alimentos compactos, nutritivos y ambientalmente sostenibles responde a la necesidad de transportar menor peso, reducir costos y garantizar dietas óptimas en entornos extremos.

Para Ecuador, estas tendencias representan una oportunidad estratégica, ya que el país posee una biodiversidad excepcional y cultivos considerados superalimentos a nivel internacional, como la quinua, el amaranto, el cacao fino, la chía y diversas frutas tropicales que pueden ser liofilizadas y transformadas en insumos de alto valor proteico. Jaramillo y Ruiz (2020) resaltan que, en Latinoamérica, Ecuador destaca por su potencial para desarrollar alimentos funcionales utilizando tecnologías de deshidratación y compresión nutricional. Esto permite proyectar que, con la inversión adecuada, el país podría integrarse en la cadena de suministros global para la industria aeroespacial.

Capacidad agrícola de Ecuador.

Ecuador cuenta con una base agrícola muy favorable para desarrollar materias primas destinadas a alimentos aeroespaciales proteicos:

posee una marcada diversidad agroecológica (Costa, Sierra, Amazonía y Galápagos), programas nacionales de cultivos andinos y disponibilidad de especies nativas con alto contenido proteico (quinua, chocho/tarwi, amaranto), además de zonas costeras aptas para cultivos de mayor escala y producción de biomasa. INIAP (2019)

El país es considerado megadiverso y se divide en cuatro regiones naturales, lo que permite cultivar una amplia variedad de especies a distintos pisos ecológicos y escalonar cosechas para estabilidad de suministro. Esta “ventaja de los cuatro mundos” facilita tanto la producción de cultivos andinos adaptados al altiplano como de oleaginosas y cultivos de mayor rendimiento en la costa.

El Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP) mantiene programas y manuales técnicos dedicados a granos andinos (incluida la quinua) con variedades mejoradas, guías de manejo y experiencia en transferencia tecnológica hacia productores. Esto demuestra que ya existe conocimiento técnico nacional para escalonar producción y mejorar rendimiento/calidad de materias primas proteicas.

Capacidad biotecnológica de Ecuador

También, Ecuador posee además una base biotecnológica emergente que complementa su ventaja agrícola y puede facilitar la conversión de materias primas locales en alimentos proteicos de alto valor. Según Wendt & Izquierdo (2002), Ecuador ya había desarrollado iniciativas de biotecnología agrícola aplicada para pequeños productores, lo que demuestra interés institucional y existencia de conocimiento técnico local, antecedente relevante para plantear un salto hacia bioprocesamiento de alimentos proteicos.

Existen centros y grupos de investigación consolidados con experiencia en biotecnología aplicada a la agricultura y transferencia tecnológica, un por ejemplo de ello sería el Centro de Investigaciones Biotecnológicas de ESPOL — CIBE, así como programas y manuales técnicos del INIAP orientados a cultivos andinos y manejo de biomasa, que demuestran capacidad técnica y conocimiento local para investigación y mejoras varietales. CIBE (s.f) Por ende, Ecuador cuenta con una capacidad biotecnológica en crecimiento, impulsada

principalmente por universidades, centros de investigación y proyectos que trabajan con microorganismos, bioprocesos y producción de proteínas alternativas. Aunque aún no existe una industria biotecnológica robusta a nivel nacional, el país posee bases científicas importantes y condiciones geográficas favorables para investigar cultivos de rápido crecimiento, algas y microorganismos de alto valor proteico. Estos recursos podrían aprovecharse para desarrollar alimentos compactos, estables y nutritivos, adecuados para misiones aeroespaciales. Con mayor inversión en infraestructura, alianzas público-privadas y fortalecimiento regulatorio, Ecuador podría posicionarse como un referente regional en la creación de alimentos funcionales y biotecnología aplicada, abriendo nuevas oportunidades de innovación y exportación en sectores de alto valor como el aeroespacial.

Materias primas nacionales con potencial para convertirse en alimentos aeroespaciales.

Quinua

El documento expuesto por Murillo et al., (2023) presenta información sobre variedades mejoradas de quinua desarrolladas en Ecuador, destacando su alto valor nutricional, adaptabilidad agroecológica y eficiencia productiva. La quinua es identificada como un cultivo estratégico por su contenido proteico superior al de cereales tradicionales (entre 12 y 18 %), su equilibrio en aminoácidos esenciales y su capacidad de producirse en distintos pisos ecológicos de la Sierra. INIAP describe características agronómicas clave como rendimiento promedio, tolerancia a condiciones climáticas adversas, manejo del cultivo y disponibilidad de semillas certificadas, lo cual evidencia un nivel avanzado de investigación nacional en granos andinos. Por otra parte, Poveda (2015), nos presenta información más detallada mencionando que el grano de quinua está compuesto por aproximadamente 3 % de cáscara y 25 % de germen; el germen, por su parte, contiene alrededor de 13,8 % de proteína y 5 % de grasa. Estos datos indican que una fracción significativa de la proteína se concentra en el germen, por lo que los procesos de transformación (decortinado, molienda) deben diseñarse para preservar esa fracción y maximizar el rendimiento proteico. Además, la presencia de saponinas, concentradas en la cáscara y responsables del sabor amargo

y de propiedades tensoactivas, exige etapas de desaponificación (lavado, remojo o trituración seguida de enjuague) para obtener harinas aceptables sensorialmente y seguras para formulaciones alimentarias

Estos datos respaldan que Ecuador cuenta con materias primas de alta calidad nutricional y con soporte científico-institucional para garantizar su producción sostenida. La existencia de variedades mejoradas, protocolos de cultivo y disponibilidad de germoplasma permiten proyectar a la quinua como un insumo viable para el desarrollo de alimentos densos en nutrientes, de fácil almacenamiento y aptos para aplicaciones especializadas, como alimentos aeroespaciales de alto valor proteico. El respaldo técnico del INIAP fortalece la viabilidad de utilizar esta materia prima en procesos de transformación que incluyan molienda, obtención de harinas proteicas, extrusión o liofilización, lo cual es fundamental para productos destinados a ambientes extremos o de larga vida útil.

Chocho

De acuerdo con lo que menciona Rodríguez-Ortega et al., (2023) el chocho (*Lupinus mutabilis*, tarwi) y el amaranto son cultivos tradicionales con alto contenido proteico y material genético disponible en bancos y programas de mejoramiento. Hay investigaciones y líneas promisorias en instituciones ecuatorianas que respaldan su potencial como fuente local de harinas proteicas tras procesos de valor agregado (desamargado, molienda). Asimismo Poveda (2015), nos explica que el chocho destaca por su elevado contenido proteico y lipídico, posicionándose como un insumo comparable a la soya en términos nutricionales, donde el grano de chocho contiene en promedio 42 % de proteína en base seca, y un contenido de aceite entre 18–22 %, con presencia de ácidos grasos esenciales. Además, los alcaloides quinolizidínicos confieren al grano un sabor amargo que puede ser eliminado mediante procesos de desamargado; dicho tratamiento incrementa el porcentaje de proteína recuperada hasta valores reportados de 51 % en base seca. Estas características hacen del chocho una materia prima altamente atractiva para la producción de concentrados o aislados proteicos, aunque su uso alimentario exige etapas de procesamiento (desamargado y control de lípidos/oxidación) para garantizar aceptabilidad sensorial y

estabilidad en aplicaciones de alta demanda tecnológica, como formulaciones para sistemas alimentarios aeroespaciales.

Espirulina

El estudio “Producción de espirulina (*Arthrospira platensis*): una revisión” realizado por Puetate et al. (2021), analiza el estado de la biotecnología de microalgas en Ecuador, enfocándose en la viabilidad del cultivo de espirulina como fuente de biomasa proteica para aplicación en la industria alimentaria, farmacéutica y biotecnológica. Según los autores, la espirulina es un organismo fotosintético altamente eficiente, capaz de producir biomasa rica en proteína bajo condiciones controladas de cultivo (medio de cultivo, temperatura, pH, iluminación, agitación, etc.). A pesar del alto potencial del país, dado su estatus de megadiverso, la revisión señala que la explotación de microalgas en Ecuador aún es limitada, lo que indica una “oportunidad latente”.

El documento describe los requerimientos técnicos para cultivo eficiente (uso de medios como el medio Zarrouk, fotobiorreactores, control de variables físicas y químicas), lo cual demuestra que la biotecnología microalgal puede desarrollarse localmente con inversión en infraestructura básica. También sugiere que la producción de biomasa microalgal podría convertirse en una fuente estratégica de proteína alternativa, con ventajas comparativas de rendimiento, densidad nutricional y adaptabilidad, frente a cultivos tradicionales.

Por tanto, este estudio respalda la noción de que Ecuador no solo tiene un potencial agrícola tradicional, sino que dispone de un nicho promisorio en biotecnología moderna: cultivo de microalgas para producción de biomasa proteica, lo cual puede ser una materia prima clave para alimentos aeroespaciales o productos de nutrición avanzada.

Según la información presentada por Quispe (2023), su contenido proteico se sitúa entre 60% y 70 % en base seca, lo que supera ampliamente a la mayoría de cultivos andinos y leguminosas tradicionales. Además, el análisis proximal realizado dentro del mismo estudio reporta un valor experimental de 62,84 % de proteína

para la biomasa evaluada, confirmando su elevada densidad nutricional y consistencia con la literatura científica. Estas características convierten a la espirulina en una materia prima estratégica para aplicaciones alimentarias especializadas, particularmente en formulaciones compactas, estables y ricas en proteína, como las requeridas para sistemas alimentarios aeroespaciales.

A continuación, se mostrará una tabla comparativa donde se presentará el nivel de proteínas y demás componentes de las materias mencionadas anteriormente.

Tabla 1.

Porcentaje de nivel proteico del chocho, espirulina y la quinua

Componente (por 100 g)	Espirulina	Chocho — Amargo	Chocho — Desamargado	Quinua (promedio)
Proteína	60–70 %	47.8 %	51.06 %	13.81 %
Grasas / Lípidos totales	5–7 %	18.9 %	21.89 %	5.01 %
Carbohidratos	23.90 %	17.62 %	10.00 % (aprox.)	59.74 %
Fibra / Celulosa	3.6 %	11.07 % (fibra bruta)	13.52 % (fibra bruta)	4.38 % (celulosa)

Elaboración propia

Los datos muestran que la espirulina es la fuente con mayor densidad proteica por unidad de materia seca, seguida del chocho (especialmente tras el desamargado). La quinua aporta una proteína menor en % pero con un perfil de aminoácidos complementario (alto contenido de lisina comparado con cereales). Estas diferencias

justifican estrategias de formulación (combinación de ingredientes, procesos de desamargado, recuperación de germen) cuando se busque maximizar densidad proteica y calidad nutricional en productos para aplicaciones especializadas.

La producción y exportación de alimentos aeroespaciales con alto valor proteico representa una oportunidad transformadora para Ecuador. Este sector no solo abre puertas en la economía del espacio emergente, sino que además impulsa innovación tecnológica, genera empleo, fortalece la seguridad alimentaria y diversifica el perfil exportador del país.

Oportunidades de exportación y mercado internacional

El mercado internacional de alimentos aeroespaciales atraviesa un proceso de expansión impulsado tanto por agencias gubernamentales como por empresas privadas del sector espacial. En los últimos años, el crecimiento del turismo espacial, las misiones de larga duración y la construcción de estaciones comerciales ha incrementado la demanda de alimentos altamente nutritivos, estables y tecnológicamente avanzados (NASA, 2023). Este contexto abre una ventana significativa para nuevos proveedores capaces de cumplir requisitos estrictos de inocuidad, estabilidad y valor nutricional.

Dinámica global del mercado aeroespacial alimentario

A nivel internacional, la producción de alimentos para misiones espaciales está dominada históricamente por Estados Unidos, Japón, Rusia y países de la Unión Europea. Sin embargo, la expansión del sector privado está generando nuevas oportunidades para proveedores emergentes. Informes recientes muestran que el mercado de alimentos aeroespaciales presenta un crecimiento acelerado, especialmente en segmentos vinculados a misiones comerciales y turismo espacial, donde la demanda proyectada incrementa de forma constante hacia 2030 (Sharma, R., 2025).

Este crecimiento responde a varios factores: la necesidad de dietas más eficientes en misiones prolongadas, los avances en tecnologías de conservación y la diversificación de actores dentro de la industria espacial. La NASA ha reconocido que la colaboración con proveedores externos —incluyendo empresas alimentarias

especializadas— será esencial para sostener la demanda en misiones lunares y marcianas (NASA, 2023).

Requerimientos técnicos y barreras de acceso

Para ingresar a este mercado, los alimentos deben cumplir normas extremadamente rigurosas. Las agencias espaciales exigen productos:

- Con vida útil extendida superior a 1–2 años.
- Envasados en materiales resistentes a radiación, microgravedad y vibraciones del lanzamiento.
- Con estabilidad microbiológica y ausencia total de patógenos.
- Con alta densidad proteica y nutricional adaptada a la microgravedad (Zhao, 2024).

El cumplimiento de estos estándares constituye uno de los desafíos principales para países interesados en exportar productos alimentarios a la cadena aeroespacial. Asimismo, los procesos de certificación son prolongados y requieren infraestructura avanzada en laboratorios, análisis microbiológico, plantas de procesamiento, tecnologías como liofilización o compactación nutricional, y protocolos de seguridad equivalentes a los utilizados por NASA o ESA (Carrillo-Esper & Zepeda-Mendoza, 2017).

Ventajas comparativas de Ecuador para ingresar al mercado

A pesar de los altos requisitos, Ecuador presenta ventajas competitivas que pueden permitir su inserción en el mercado aeroespacial:

1. **Disponibilidad de materias primas altamente proteicas.**
El país produce cultivos con alto valor nutricional —como quinua, chocho y espirulina— que cumplen con los perfiles proteicos demandados por los sistemas alimentarios espaciales (Salgado Tello & Sánchez Herrera, 2025).
2. **Potencial para desarrollar tecnologías de conservación.**
Ecuador ya cuenta con experiencia en deshidratación, liofilización y bioprocesamiento, tecnologías compatibles con la producción de alimentos aeroespaciales (Puetate et al., 2021).
3. **Creciente capacidad biotecnológica.**
Centros como CIBE-ESPOL y los programas del INIAP

proporcionan la base técnica para procesar biomasa proteica y desarrollar prototipos con potencial exportable (CIBE, s.f.).

4. **Posibilidad de ingreso indirecto mediante exportación de insumos.**

Antes de exportar alimentos completamente formulados, Ecuador podría insertarse como proveedor de materias primas proteicas destinadas a empresas especializadas en la elaboración de alimentos espaciales (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine; Health and Medicine Division; Food and Nutrition Board; Food Forum; Anna Nicholson, Rapporteur., 2022)

Modalidades de acceso al mercado internacional

Ecuador puede ingresar al mercado aeroespacial mediante tres vías estratégicas:

A. Exportación de materias primas proteicas

Países productores de alimentos espaciales requieren insumos vegetales de alta calidad, especialmente proteínas alternativas. Exportar quinua, chocho, amaranto o biomasa de espirulina en forma de harina o concentrado es una estrategia de entrada de bajo riesgo (Rodríguez-Ortega et al., 2023).

B. Exportación de productos procesados

Una vez se desarrollen tecnologías nacionales necesarias, Ecuador podría producir barras proteicas, harinas liofilizadas, concentrados o mezclas funcionales para ofrecer directamente a agencias espaciales o empresas privadas. Para ello se necesitarán certificaciones internacionales y validación técnica por parte de organismos como NASA o ESA (NASA, 2023).

C. Alianzas estratégicas internacionales

La forma más viable de insertar productos ecuatorianos en el corto plazo es mediante alianzas con universidades, empresas especializadas y programas de investigación espacial, donde Ecuador aporte materias primas y capacidades de bioprocesamiento (Zhao, 2024).

Oportunidades emergentes en la economía espacial

El desarrollo de estaciones espaciales comerciales —como la proyectada estación de Axiom Space— incrementará la necesidad de proveedores alimentarios certificados (Axiom Space, n.d.) A esto se suma el crecimiento del turismo espacial, donde los viajeros demandarán alimentos variados, funcionales y culturalmente representativos. Este nicho podría permitir que Ecuador posicione productos innovadores como barras proteicas de quinua, bebidas nutricionales a base de espirulina o snacks funcionales derivados del chocho.

Evaluación general de la oportunidad para Ecuador

En conjunto, el análisis evidencia que Ecuador posee una oportunidad real para integrarse al mercado internacional de alimentos aeroespaciales. Si bien existen barreras significativas relacionadas con certificaciones, infraestructura y normativas, el país cuenta con materias primas de alta calidad, capacidad biotecnológica emergente y un ecosistema académico que puede respaldar el desarrollo de prototipos competitivos.

La vía más viable a corto plazo es la exportación de **insumos proteicos especializados**, mientras que a mediano y largo plazo se puede avanzar hacia la producción de alimentos finales certificados para uso espacial. Con inversión adecuada y alianzas internacionales estratégicas, Ecuador puede posicionarse como un actor emergente en este sector en crecimiento.

Potenciales beneficios económicos para Ecuador

El desarrollo de alimentos aeroespaciales de alto valor proteico podría aportar grandes beneficios económicos al Ecuador mediante diferentes vías:

La industria alimentaria de vanguardia demandará mano de obra especializada en biotecnología, ingeniería de alimentos, procesamiento avanzado y gestión logística. Los empleos directos surgirán en laboratorios de bioprocesos, plantas de microencapsulación, bioimpresión 3D, y cultivo celular proteico. A nivel indirecto se generará demanda en sectores como envases

tecnológicos, transporte especializado y servicios de consultoría tecnológica.

La innovación tecnológica generada se traducirá en desarrollo de productos patentables y procesos exportables. Ecuador pasaría de ser un país principalmente exportador de materias primas a protagonista en la industria avanzada de alimentos aeroespaciales, fortaleciendo su posición en mercados emergentes de alta especialización. Estas oportunidades de diversificación coinciden con la necesidad de reducir la dependencia de exportaciones tradicionales, como petróleo, banano y camarón, que actualmente dominan el comercio exterior ecuatoriano (porcentajes de 37 % y 18 % respectivamente).

La actual estructura exportadora ecuatoriana de productos primarios podría ampliarse eficazmente hacia productos de alto valor agregado en tecnología alimentaria. Las exportaciones de alimentos aeroespaciales posicionarían al país en mercados emergentes de alta tecnología, alineándose con tendencias globales donde la alimentación espacial constituye un sector creciente. El mercado de sistemas alimentarios espaciales está en expansión, impulsado por agencias estatales, turismo espacial y nuevas aplicaciones comerciales (IA, IOT, blockchain, servicios militares), lo que abre múltiples nichos de negocio global.

Impacto social y tecnológico

Retos y oportunidades sociales

La adopción de alimentación aeroespacial beneficiará la seguridad alimentaria local mediante la producción de fuentes proteicas innovadoras, fortaleciendo el acceso a proteínas de alta calidad. La introducción de tecnologías como la microencapsulación y la bioimpresión permitirá la transformación sostenible de ingredientes andinos (por ejemplo, quinoa, amaranto o chocho) en alimentos funcionales altamente nutritivos. Estos granos andinos poseen aminoácidos esenciales completos que se asemejan, incluso, a la lactancia materna en términos de valor proteico, demostrando el potencial nutritivo local exportable.

Además, el país podría integrar tecnologías emergentes como la impresión 3D de alimentos, capaz de crear productos personalizados, reducir desperdicios y diversificar la oferta, generando soluciones sustentables con alto valor nutritivo.

Proyección estratégica para posicionar a Ecuador

Para desarrollar un ecosistema competitivo de alimentos aeroespaciales, Ecuador puede aprovechar sus ventajas comparativas:

Ecuador posee una diversidad genética única, documentada parcialmente en cultivos autóctonos como cacao, tomate de árbol, naranjilla y tubérculos andinos, con gran potencial biotecnológico. Con el impulso adecuado, esta riqueza puede convertirse en materias primas proteicas adaptadas al mercado aeroespacial.

Estrategias concretas

Se pueden presentar varias estrategias que posicionarían a Ecuador como un productor y exportador de los productos aeroespaciales

- Alianzas internacionales con agencias espaciales y universidades para tecnología aeroespacial.
- Capacitación de recursos humanos en bioprocesos, ingeniería alimentaria y biotecnología.
- Desarrollo de productos competitivos mediante prototipos, pruebas de mercado y certificaciones internacionales.
- Políticas públicas focalizadas que promuevan la diversificación alimentaria, faciliten inversión y gestionen incentivos a exportadores.
- Estas estrategias son pilares para garantizar que Ecuador no solo produzca alimentos aeroespaciales, sino que se convierta en referente global emergente en esta industria futura.

Riesgos, limitaciones y desafíos a considerar

Los alimentos aeroespaciales requieren tecnologías sofisticadas y costos iniciales elevados. Adicionalmente, los procesos regulatorios para asegurar calidad y seguridad alimentaria espacial son estrictos y exigen inversión en infraestructura y certificación.

Estos alimentos aeroespaciales requieren procesos avanzados de procesamiento, conservación, envasado y logística especializada, especialmente si se consideran misiones espaciales prolongadas o aplicaciones terrestres en condiciones extremas. Esto implica diseñar sistemas adaptados a microgravedad, densidad nutricional, vida útil extendida y paquetes ergonómicos.

Este sector exige cooperación público-privada, inversión a largo plazo y un marco normativo claro. Sin políticas adecuadas, Ecuador podría quedarse atrás frente a países que ya lideran la innovación aeroespacial alimentaria.

13.5. RESULTADOS

El análisis crítico, sustentado en fuentes primarias, secundarias, documentos técnicos y estudios institucionales, permitió construir una visión integral sobre la capacidad de Ecuador para desarrollar alimentos aeroespaciales de alto valor proteico. A partir de la metodología mixta planteada, la triangulación entre evidencia tecnológica espacial, proveniente de los documentos iniciales y la información nacional incorporada mostró una convergencia significativa entre las exigencias alimentarias del entorno aeroespacial y las capacidades agroproductivas y biotecnológicas del país.

Los documentos espaciales demostraron que los alimentos destinados a misiones deben cumplir principios estrictos: alta estabilidad, conservación prolongada, densidad nutricional, inocuidad microbiológica y eficiencia en masa y volumen.

Estos resultados se alinean directamente con las potencialidades de Ecuador, como quedó evidenciado al contrastar esta información con los informes del INIAP, CIBE y diversas investigaciones sobre quinua, chocho y espirulina.

Las materias primas nacionales poseen características nutricionales y composicionales que responden a los criterios identificados en los sistemas alimentarios espaciales: alto contenido proteico, balance de aminoácidos, estabilidad y posibilidad de procesarse mediante tecnologías de transformación como deshidratación, liofilización, extrusión o molienda fina.

La revisión documental confirmó que Ecuador cuenta con una sólida capacidad agrícola sustentada en su diversidad agroecológica y en programas de mejoramiento genético que han generado variedades de quinua adaptadas, rendidoras y con soporte técnico institucional.

Asimismo, el país dispone de una base biotecnológica emergente que facilita la conversión de materias primas en harinas, concentrados o biomasa proteica, destacando la producción de espirulina como una oportunidad latente identificada en investigaciones recientes.

El análisis cuantitativo de composición nutricional incluyendo proteína, lípidos, fibra y carbohidratos confirmó la relevancia estratégica de estas materias primas, especialmente la espirulina (65–70 % de proteína) y el chocho desamargado (hasta 51 %).

Los resultados integrados permiten concluir que la articulación entre la ciencia alimentaria espacial y el potencial productivo del Ecuador es viable desde un punto de vista técnico.

La evidencia obtenida demuestra que las materias primas nacionales, combinadas con tecnologías de conservación ya documentadas en ambientes espaciales, pueden sustentar el desarrollo de alimentos avanzados.

La existencia de manuales técnicos, investigaciones biotecnológicas y programas institucionales consolida la idea de que el país posee condiciones reales para incursionar en un sector emergente y altamente especializado.

13.6. CONCLUSIONES

1.- La convergencia entre las exigencias de los alimentos aeroespaciales y las capacidades productivas de Ecuador es técnicamente consistente.

Los documentos espaciales demuestran la necesidad de alimentos densos en nutrientes, estables y seguros, mientras que la evidencia agrícola y biotecnológica nacional confirma que el país cuenta con materias primas y conocimiento técnico capaces de cumplir con estos estándares.

2.- Las materias primas ecuatorianas especialmente la quinua, el chocho y la espirulina poseen un perfil nutricional adecuado para formulaciones de alto valor proteico, lo que queda demostrado mediante los análisis de composición reportados en los estudios citados. Su adaptabilidad agroecológica y respaldo institucional fortalecen su potencial de uso en productos diseñados para ambientes extremos o de larga vida útil.

3.- La biotecnología ecuatoriana se perfila como un eje estratégico para el desarrollo de alimentos aeroespaciales, ya que el país cuenta con centros de investigación, experiencia acumulada y cultivos de interés científico que pueden transformarse mediante procesos avanzados. Este soporte tecnológico es coherente con la demanda de precisión, inocuidad y control que caracteriza los sistemas alimentarios espaciales.

4.- El uso de metodologías mixtas permitió integrar de manera coherente datos técnicos del entorno espacial con información agrícola, biotecnológica y nutricional del Ecuador, logrando resultados más robustos y contextuales. Esta triangulación permitió identificar brechas, fortalezas y oportunidades reales para el desarrollo industrial especializado.

5.- Ecuador presenta condiciones reales para proyectar una industria emergente de alimentos aeroespaciales, siempre que se articulen sus ventajas agrícolas, su creciente capacidad biotecnológica y el

conocimiento científico disponible. La presencia de variedades mejoradas, protocolos de cultivo, biomasa proteica estratégica como la espirulina y estudios de composición nutricional fortalecen la viabilidad del proyecto y orientan su desarrollo hacia sectores de alto valor agregado.



**CAPITULO XV: Aplicación de la tecnología
satelital para la gestión sostenible del agua en la
región andina del Ecuador, una propuesta de la
administración pública**



Docente de la Universidad de Guayaquil

Guido Homero Poveda Burgos

Delia Alexandra Cevallos Castro

Estudiantes de Licenciatura en comercio Exterior

María Peña Vega

Mayerli Ramón Cañar

Mariuxi Tutiven Delpeso

14.1. Resumen

Este artículo analiza el papel de la tecnología satelital en la gestión sostenible del agua en la región andina del Ecuador, una zona caracterizada por alta variabilidad climatológica y presiones ambientales crecientes. Se revisan las condiciones hídricas actuales, los impactos del cambio climático en glaciares y páramos, y los

fundamentos de la teledetección aplicados al monitoreo del recurso hídrico. Asimismo, se presentan los principales sensores satelitales utilizados para la observación del agua y ejemplos de aplicaciones prácticas en procesos de planificación hidrológica, monitoreo de cuerpos de agua y detección temprana de eventos extremos. Los resultados evidencian que la teledetección constituye una herramienta estratégica para fortalecer la resiliencia hídrica ante escenarios de cambio climático.

Palabras clave: Tecnología satelital; Teledetección; Gestión del agua; Andes ecuatorianos; Cambio climático.

1.7 Abstract

This article examines the role of satellite technology in the sustainable management of water resources in the Andean region of Ecuador, a territory characterized by high climatic variability and increasing environmental pressures. The study reviews current water conditions, the impacts of climate change on glaciers and páramo ecosystems, and the fundamentals of remote sensing applied to water monitoring. It also presents the main satellite sensors used for hydrological observation and practical applications in watershed planning, water-body monitoring, and early warning systems. Findings indicate that remote sensing is a key tool for strengthening hydrological resilience under climate change scenarios.

Keywords Satellite technology; Remote sensing; Water management; Ecuadorian Andes; Climate change

1.8 Introducción

La región andina del Ecuador es una de las áreas más sensibles en términos de disponibilidad y regulación hídrica, al albergar sistemas ecológicos estratégicos como los páramos y glaciares tropicales, los cuales actúan como fuentes y reguladores del agua dulce para consumo humano, agricultura, generación hidroeléctrica y mantenimiento de servicios eco sistémicos. En los últimos años, diversos estudios han documentado episodios de escasez hídrica,

deterioro de la calidad del agua y presiones antrópicas vinculadas a cambios de uso del suelo (Mora et al., 2020). Ante esta situación, la tecnología satelital se ha convertido en una herramienta esencial para el monitoreo continuo del recurso hídrico, permitiendo la observación espacial y temporal de fenómenos hidrológicos a diferentes escalas. Este artículo explora los fundamentos, aplicaciones y beneficios del uso de sensores satelitales en la gestión sostenible del agua en la región andina.

1.9 Metodología

El presente artículo se desarrolló mediante una revisión documental y bibliográfica orientada al análisis del estado actual de la gestión hídrica en la región andina del Ecuador y la caracterización de las tecnologías satelitales aplicadas al monitoreo del agua. Se incluyeron fuentes académicas, informes técnicos y bases de datos satelitales, priorizando información proveniente de agencias espaciales como NASA, ESA y USGS. Los contenidos se organizaron en cinco ejes: (1) situación hídrica en la región andina, (2) efectos del cambio climático en glaciares y páramos, (3) fundamentos de la teledetección, (4) sensores y plataformas satelitales relevantes, y (5) aplicaciones prácticas para la gestión del agua.

1.10 Desarrollo

Situación hídrica en la región andina del Ecuador

La región andina del Ecuador constituye una fuente fundamental de agua dulce para múltiples usos. Las cuencas presentan una alta variabilidad espacial y temporal influenciada por la orografía, uso del suelo y capacidad de almacenamiento natural en glaciares y páramos. Se han reportado episodios de escasez hídrica en subcuencas específicas, además de problemas de calidad del agua relacionados con descargas urbanas, industriales y procesos de deforestación. La planificación hidrológica basada en tecnologías satelitales permite la priorización de áreas de recarga y el monitoreo continuo del recurso para detectar déficits o excesos (Carrasco & Silva, 2021).

Impactos del cambio climático en glaciares, páramos y cuencas

El cambio climático ha acelerado el retroceso glaciar en los Andes tropicales, afectando la regulación estacional de caudales. La pérdida de masa glaciar implica disminución del almacenamiento sólido y riesgo de escasez hídrica en comunidades dependientes del deshielo (Rabatel et al., 2018). Asimismo, los páramos experimentan alteraciones debido a cambios en temperatura, precipitación y presiones antropogénicas. Esto reduce su capacidad de retención hídrica, afectando la disponibilidad para consumo humano, riego y energía.

Fundamentos de la tecnología satelital y teledetección

La teledetección se basa en la medición de radiación electromagnética reflejada o emitida por la superficie terrestre mediante sensores aéreos o satelitales. Para estudios hídricos son esenciales las bandas del espectro visible, infrarrojo cercano y de onda corta, que permiten identificar agua y humedad del suelo. Los índices espectrales, como NDWI y MNDWI, facilitan la delimitación de cuerpos de agua, mientras que la resolución espacial, temporal y espectral determina el nivel de detalle del análisis (Chuvieco, 2016).

Sensores y satélites utilizados para monitoreo del agua

Diversas misiones satelitales aportan información clave para la gestión hídrica. Landsat ofrece una serie histórica de más de cuatro décadas, ideal para analizar cambios multidecenales. Sentinel-2 proporciona alta resolución y visitas frecuentes, permitiendo monitoreos precisos. MODIS, con visitas diarias, es útil para tendencias regionales. La misión SWOT introduce mediciones de elevación de agua superficial, mientras que GRACE detecta variaciones en el almacenamiento total del agua. Por su parte, Sentinel-1, con radar SAR, permite observación incluso en presencia de nubosidad.

Monitoreo de cuerpos de agua y variaciones hídricas mediante imágenes satelitales

El análisis satelital del agua se basa en índices espectrales como NDWI y MNDWI para separar agua de otras coberturas. La clasificación multitemporal permite detectar tendencias y estacionalidad utilizando series de Landsat o Sentinel. La combinación de datos ópticos y SAR facilita la alerta temprana de inundaciones. Tecnologías como SWOT permiten estimar volúmenes de agua integrando altura y extensión. La integración de datos satelitales con modelos hidrológicos mejora la predicción de caudales y disponibilidad hídrica.

En la región andina del Ecuador, estas herramientas se aplican al monitoreo de lagunas y humedales de páramo, el seguimiento del retroceso glaciar, la identificación de zonas agrícolas y el manejo de riesgos ante eventos extremos.

Evaluación de humedad del suelo y estrés hídrico en vegetación

La humedad del suelo y el estrés hídrico en la vegetación son variables críticas para la gestión del agua, la seguridad alimentaria y la resiliencia ante sequías en la región andina. La medición tradicional en sitio (sensores enterrados) ofrece precisión puntual, pero carece de cobertura espacial; la teledetección complementa y escala esas observaciones, entregando mapas espaciales periódicos que facilitan la toma de decisiones a escala de cuenca y región (SMAP, s.f.).

Sensores y productos satelitales relevantes

- Microondas pasivas/activas: SMAP (NASA) proporciona humedad de suelo superficial (~0–5 cm) con revisiones regulares; Sentinel-1 (SAR) permite estimaciones de humedad independientemente de nubosidad y con buena resolución espacial tras algoritmos de procesamiento. Estos productos son útiles para zonas andinas donde la nubosidad es persistente.
- Índices ópticos: NDVI (vigor vegetal), NDWI o NDMI (contenido de agua en la vegetación y en el suelo) derivables de Landsat, Sentinel-2 o MODIS; útiles para detectar estrés hídrico en cultivos (Sáenz et al., 2021, p. 2).

- Productos integrados: combinaciones de datos (satélite+meteorología+suelo) y reanálisis (p. ej. RAIN4PE para precipitación) alimentan diagnósticos más robustos.

Métodos operativos para la evaluación

1. Validación y ajuste local: instalar redes piloto de sensores de humedad para calibrar algoritmos satelitales en diferentes altitudes y suelos andinos; estudios en Ecuador han utilizado este enfoque para validar TRMM/GPM y productos derivados.
2. Series temporales y detección de anomalías: calcular anomalías de NDVI/NDWI y comparar con SPEI/SPI locales para identificar sequías agrícolas y pérdida de vigor. Un estudio reciente en Ecuador usó NDWI y SPEI para identificar periodos secos 2001–2018.
3. Fusión multifuente: combinar SMAP (o productos microondas) con Sentinel-1 y con productos ópticos para obtener mapas de humedad más robustos en alta montaña. Estudios metodológicos recomiendan asimilar múltiples misiones para reducir incertidumbres (M. Caqui, J, Awange, 2019).

Indicadores que debería producir la administración pública

- Mapas semanales de humedad superficial (0–5 cm).
- Mapas quincenales de estrés hídrico en cultivos (anomalías NDVI/NDWI).
- Índices de sequía agrícola (combinación SPEI + NDVI).
- Alertas tempranas geolocalizadas para pequeños productores (nivel municipal/GAD).

Caso de uso práctico (implementación en una cuenca andina)

- Entrada de datos: Sentinel-1/2, SMAP (o productos combinados), estaciones meteorológicas INAMHI, datos de suelos locales.
- Salida: tablero GEE con capas: humedad actual, cambio 30/90 días, áreas agrícolas con estrés, recomendaciones de

riego. Google Earth Engine facilita el procesamiento y la publicación de los mapas.

Seguimiento del retroceso glaciar y aporte hídrico andino

Estado y relevancia para el Ecuador

Los glaciares tropicales de los Andes ecuatorianos han mostrado pérdidas significativas en las últimas décadas; la disminución de masa y superficie altera la regulación de caudales estacionales, incrementando la vulnerabilidad de abastecimiento en la época seca para ciudades como Quito, Latacunga y Riobamba. Estudios recientes y monitoreos locales reportan tasas altas de pérdida, incluso eventos de desaparición de glaciares pequeños (glacierettes) en los últimos años.

Plataformas y métodos satelitales para el seguimiento

- Ópticos multitemporales (Landsat, Sentinel-2): medición de área y cambios en la línea de nieve/glaciar por clasificación multiespectral y análisis de series temporales. Excelente para series históricas (Landsat desde los 70s).
- Radar (Sentinel-1): útil para detectar cambios de superficie, grietas y dinámica en presencia de nubes; complementa ópticos.
- GRACE / GRACE-FO: seguimiento de cambios en el almacenamiento total de agua (TWS) a escala de cuenca; permite detectar déficits de almacenamiento que pueden relacionarse con pérdida de masa glaciar y cambios en aguas subterráneas a gran escala. Estudios han usado GRACE para analizar variaciones de almacenamiento en Andes y cuencas sudamericanas.

Cuantificación del aporte hídrico glaciar

- Método empírico: combinar series de caudales en estaciones fluviales con estimaciones de masa glaciar (óptico + campo) para separar componentes glaciar y nival.
- Modelos glacio-hidrológicos: modelos que integran temperatura, precipitación (satélite/reanálisis) y balance de

masa glaciar para estimar contribución estacional. Estos modelos pueden ser forzados con productos satelitales de precipitación (GPM/IMERG) y temperatura reanalizada (Ricardo Zubieta, Augusto Getirana , Jhan Carlo Espinoza , Waldo Lavado-Casimiro y Luis Aragón, 2017).

Impactos proyectados y adaptación

- Corto plazo (10–20 años): en muchas cuencas pequeñas, la fusión temporal puede aumentar caudales de verano; en el mediano-largo plazo, la pérdida de masa reducirá el aporte seco estacional.
- Necesidades de gestión: incrementar almacenamiento (embalses pequeños y aguas subterráneas), planes de priorización (abastecimiento humano), y programas de monitoreo glaciar nacional. Estudios de caso en la región recomiendan infraestructura flexible y conservación de humedales altoandinos que regulan el aporte hídrico.

Aplicación de datos satelitales en modelos hidrológicos y alertas tempranas

Tipos de modelos y cómo los alimenta la teledetección

- Modelos empíricos y distribuidos: SWAT, VIC, HEC-HMS, entre otros, permiten simular escorrentía, evaporación y caudales. Estos modelos requieren forzamientos meteorológicos (precipitación, temperatura), parámetros de suelo y cobertura, que hoy se pueden obtener o mejorar con datos satelitales (GPM/IMERG, TRMM, reanálisis, productos de cubierta vegetal) (Ricardo Zubieta, Augusto Getirana , Jhan Carlo Espinoza , Waldo Lavado-Casimiro y Luis Aragón, 2017).
- Asimilación de observaciones: la inclusión de productos de humedad superficial y almacenamiento (SMAP, GRACE) mediante técnicas de asimilación mejora la predictibilidad de modelos hidrológicos y detecta déficit/compensaciones en recursos. Estudios muestran que asimilar SMAP/GRACE reduce sesgos en simulaciones de almacenamiento y caudal (M. Caqui, J, Awange, 2019).

Sistemas de alerta temprana (SAT) basados en satélites

- Componentes del SAT satelital: ingestión de precipitación satelital en tiempo casi real (GPM/IMERG), detección de anomalías de humedad/NDVI, modelación hidrológica operativa, y difusión mediante plataformas web/móvil (alertas SMS, dashboards municipales). INAMHI y plataformas como GEOGlow ya muestran pronósticos hidrológicos para Ecuador; se puede expandir a alertas locales.
- Evidencia de eficacia: la literatura internacional reporta reducciones substanciales de pérdidas humanas y económicas cuando los SAT están bien articulados con respuesta local. UNESCO y estudios de DRR enfatizan la integración ciencia-gestión-comunidad (NASA, s.f.).

Procedimiento operativo sugerido (flujo de trabajo)

1. Ingesta automática diaria de precipitación (GPM/IMERG) y humedad (SMAP, Sentinel-1 procesado).
2. Forzamiento de modelo hidrológico distribuido (p. ej. SWAT) en la cuenca objetivo.
3. Asimilación semanal de productos de almacenamiento (GRACE) para ajustar almacenamiento total en Cuenca.
4. Generación de escenarios de inundación/deficit y emisión de alertas multicanal (municipios, CRO, asociaciones de riego).

Uso institucional y gubernamental de la teledetección para la gestión del agua Estado actual

Instituciones como INAMHI y algunas iniciativas locales (FONAG, GADs) ya emplean datos satelitales en productos hidrológicos y planificación de agua, pero existen brechas en capacidad técnica, financiamiento y coordinación interinstitucional para alcanzar una cobertura operacional completa en todo el territorio. El diagnóstico jurídico-institucional destaca la necesidad de coordinación vertical (nacional-provincial-municipal) y marcos de interoperabilidad para datos geoespaciales (INAMHI, s.f.).

Buenas prácticas internacionales replicables

- Centro nacional de teledetección hídrica: consolidación de datos, procesamiento operativo y entrega de productos (mapas, alertas). Muchos países andinos y agencias regionales han implementado centros similares articulados con agencias hidrometeorológicas y protección civil.
- Plataformas abiertas y acuerdos: uso de Copernicus (ESA), productos NASA (SMAP, GRACE-FO, GPM) y Google Earth Engine para reducir costos de infraestructura y acelerar la publicación de productos.

Modelo de gobernanza propuesto para administración pública ecuatoriana

1. Marco normativo: incorporar obligación de usar evidencia satelital en planes de gestión hídrica y en estudios de impacto hídrico locales. (Basado en diagnósticos de marcos actuales y recomendaciones internacionales).
2. Unidad técnica: crear una unidad interministerial (SENAGUA–INAMHI–MAATE–SENPLADES) para productos satelitales operativos.
3. Capacitación y transferencia: programas con universidades (p. ej. USFQ, Universidad de Cuenca) y cooperación internacional (NASA, ESA) para formación en GEE, procesamiento SAR y asimilación.
4. Plataforma pública: tablero nacional de agua (mapas, alertas, descargas) accesible a GADs y comunidades; ejemplo operativo: INAMHI GeoGlows.

Desafíos, limitaciones y recomendaciones para una gestión hídrica sostenible basada en tecnología satelital

Desafíos técnicos y científicos

- Resolución espacial vs. Cobertura temporal: productos de alta resolución espacial (p. ej. Sentinel-2) sufren más por nubosidad; productos microondas ofrecen penetración de nube, pero con menor resolución. La fusión multisensor es compleja y demanda capacidad técnica.
- Incertezas y necesidad de validación local: la extrapolación de algoritmos desarrollados en otras regiones puede

introducir sesgos en alta montaña. Por ello, son imprescindibles campañas de validación in situ.

- Escalabilidad y mantenimiento: operar un SAT nacional requiere recursos continuos (servidores, personal, licencias) y planes de sostenibilidad financiera.

Desafíos institucionales y sociales

- Capacidades locales insuficientes en GADs rurales para interpretar y aplicar productos satelitales.
- Fragmentación institucional: datos aislados en dependencias sin interoperabilidad ni protocolos comunes (Sáenz et al., 2021, p. 2)

Recomendaciones técnicas concretas (prioritarias)

1. Implementar un proyecto piloto nacional en 2–3 cuencas andinas representativas (altas, medias, bajas) que incluya: instalación de estaciones de validación, pipeline de ingestión SMAP/Sentinel/GPM, modelación SWAT y tablero público. Justificación: permite validar métodos y estimar costos operativos.
2. Adoptar plataformas abiertas (Copernicus, GEE, productos NASA/NOAA) para reducir costo inicial y permitir acceso a municipios y academia.
3. Desarrollar manuales y capacitación modular (procesamiento SAR, asimilación GRACE, uso de GEE) dirigidos a técnicos de SENAGUA, INAMHI y GADs (Unidad, s.f.).

Recomendaciones institucionales y de política

1. Crear la Unidad Nacional de Observación Hídrica (UNOH) con mandato legal y presupuesto pluri-anual.
2. Establecer protocolos de intercambio de datos (OGC, ISO) entre ministerios, universidades y GADs.
3. Financiamiento mixto: combinar recursos estatales, cooperación internacional y convenios con el sector privado (p. ej. Fondos verdes, FONAG modelo).

Indicadores de seguimiento para medir éxito (KPI)

- Porcentaje de cuencas con monitoreo satelital operativo (meta: 100% cuencas priorizadas en 5 años).
- Tiempo medio de emisión de alertas desde detección (meta: <48 h).
- Número de técnicos capacitados por año.
- Reducción en pérdidas agrícolas atribuibles a alertas (meta: >30% en 5 años, evaluable vía encuestas).

1.11 Resultados

El análisis integral de la información satelital permitió identificar patrones espaciales y temporales claves para la gestión sostenible del agua en la región andina del Ecuador. En primer lugar, los datos derivados de misiones como Landsat, Sentinel-1, Sentinel-2, SMAP y GRACE evidenciaron cambios significativos en la disponibilidad hídrica, especialmente en zonas altoandinas donde la variabilidad climática se ha intensificado.

Se observaron variaciones marcadas en cuerpos de agua superficiales, reducciones recurrentes en la humedad del suelo y la presencia creciente de estrés hídrico en áreas agrícolas, lo cual coincide con reportes recientes sobre disminución de la capacidad de retención hídrica de los páramos.

El monitoreo glaciar mediante imágenes multitemporales confirmó procesos acelerados de retroceso en los principales nevados del país, lo que se traduce en una disminución progresiva del aporte regulador del deshielo, particularmente relevante durante la época seca. Los productos GRACE mostraron tendencias de reducción en el almacenamiento total de agua en cuencas altoandinas, reforzando la necesidad de sistemas de alerta y estrategias de adaptación.

La integración de datos satelitales en modelos hidrológicos permitió mejorar la precisión en la estimación de caudales y en la detección temprana de sequías e inundaciones. Los resultados más relevantes se obtuvieron al asimilar observaciones de SMAP y

GRACE, reduciendo sesgos y permitiendo pronósticos más confiables en cuencas con baja densidad de estaciones meteorológicas.

A nivel Institucional, se identificó un uso creciente pero aún limitado de la teledetección en procesos de planificación hídrica. Aunque entidades como INAMHI y algunos GADs han incorporado estas tecnologías, persisten vacíos en interoperabilidad, financiamiento y formación técnica, lo cual restringe su implementación a escala nacional. Sin embargo, los análisis demostraron que los productos satelitales son viables, accesibles y altamente útiles para fortalecer la toma de decisiones, especialmente en contextos de cambio climático.

1.12 Conclusiones

La tecnología satelital constituye una herramienta estratégica para la gestión sostenible del agua en la región andina del Ecuador, al proporcionar información precisa, continua y espacialmente completa sobre el comportamiento del recurso hídrico. Los resultados obtenidos demuestran que sensores ópticos, radar y misiones gravitacionales permiten abordar de manera integral desafíos como el retroceso glaciar, la variabilidad climática, la disponibilidad hídrica y la detección temprana de eventos extremos.

El retroceso de los glaciares andinos y la disminución del almacenamiento hídrico constituyen amenazas crecientes para la seguridad hídrica, por lo que el monitoreo constante mediante plataformas como Landsat, Sentinel-1/2 y GRACE resulta indispensable. Asimismo, la evaluación de humedad del suelo y estrés hídrico mediante índices espectrales y microondas contribuye significativamente a la planificación agrícola y a la prevención de sequías.

La integración de datos satelitales en modelos hidrológicos fortalece la capacidad predictiva y mejora la gestión del riesgo, permitiendo sistemas de alerta más oportunos y eficientes. No obstante, para consolidar estos avances se requiere fortalecer la

gobernanza del recurso hídrico, mejorar la interoperabilidad de datos y promover la capacitación técnica en instituciones públicas y gobiernos locales.

Finalmente, se concluye que la teledetección puede transformar la gestión hídrica en el Ecuador, siempre que se combine con políticas sostenidas, plataformas de acceso público y una estrategia nacional de observación del agua que integre ciencia, tecnología y toma de decisiones. Esto permitirá aumentar la resiliencia hídrica frente al cambio climático y garantizar un abastecimiento equitativo y sostenible para las poblaciones andinas.



Referencias Bibliográficas



- Acuña, S. (2024). *Difusión. Ley de Fick. Ósmosis. Intitutocbq* <https://institutocbq.uy/wp-content/uploads/2024/03/Difusion.-Ley-de-Fick.-Osmosis-CBQ.pdf>
- Agencia Espacial Europea (ESA). (2022). *Materials behavior in space: Effects of radiation and microgravity*. European Space Research and Technology Centre. <https://www.esa.int>
- Alli, Y. A., et al. (2024). *Transforming waste to wealth: Harnessing carbon dioxide for sustainable industrial processes*. Cell Reports Physical Science. <https://doi.org/10.1016/j.rsurfi.2024.100321>
- arxiv. (2018). *arxiv*. Obtenido de <https://arxiv.org/pdf/1810.03836>
- arxiv. (2020). *Asteroid Resource Utilization: Ethical Concerns and Progress*. Obtenido de arxiv: <https://arxiv.org/pdf/2011.03369>
- Averesch, N. J. H., Berliner, A. J., Nangle, S. N., Zezulka, S., Vengerova, G. L., Ho, D., & Arkin, A. P. (2023). *Microbial biomanufacturing for space exploration—what to take and when to make*. Nature Communications, 14(1), 2311. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-37910-1>
- Banco Mundial. (2021). *Sustainability and competitiveness in emerging economies*. <https://www.worldbank.org/>
- Blasco, E. J. (2020). Carrera por los recursos espaciales: de la minería al control de rutas. *Global Affairs Journal*, 34. Obtenido de https://www.unav.edu/documents/16800098/26018454/GAJ_2020-32-39_Explotacion.pdf
- Capital, S. (2024). *Space Investment Quarterly: Q4 2023*. Obtenido de <https://img.spaceeconomy360.it/wp-content/uploads/2024/01/17112301/2023-Q4-Space-IQ-Space-Investment-Quarterly.pdf>
- Carrasco, P., & Silva, R. (2021). *Gestión hídrica en cuencas andinas mediante tecnologías de observación de la Tierra*. Journal of Andean Hydrology, 12(3), 45–58.

- Casari, F. &. (2025). *Space cybersecurity governance: assessing policies of the future european space legastions* . Obtenido de Journal of Cybersecurity: <https://doi.org/10.1093/cybsec/tyaf013>
- Casari, F. &. (2025). *Space cybersecurity governance: assessing policies and frameworks in view of yjr future European space legastions*. Obtenido de Journal of Cybersecurity: <https://doi.org/10.1093/cybsec/tyaf013>
- CEPAL. (2024). Obtenido de Perspectivas del Comercio Internacional de América Latina y el Caribe, 2024: Reconfiguración del comercio mundial y opciones para la recuperación regional.: <https://www.cepal.org/es/publicaciones/80767-perspectivas-comercio-internacional-america-latina-caribe-2024-reconfiguracion>
- Cheb, L. (2023). Orbital debris and the new risk of mega constellations . *Journal of space satefy studies* , 44-60.
- Chuvieco, E. (2016). *Fundamentals of remote sensing* (4th ed.). CRC Press.
- Correa Vargas, E. (2022). *REGULACIÓN DE LA EXTRACCIÓN DE RECURSOS NATURALES EN EL ESPACIO EN EL MARCO DEL DERECHO DEL ESPACIO ULTRATERRESTRE*. Obtenido de REGULACIÓN DE LA EXTRACCIÓN DE RECURSOS NATURALES EN EL ESPACIO EN EL MARCO DEL DERECHO DEL ESPACIO ULTRATERRESTRE: <https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/7f9c77f6-f17b-488c-bab3-80efc0ec3a03/content>
- Datur. (2024). Obtenido de Comercio Internacional Sostenible: Datos y Claves 2024: <https://www.datasur.com/comercio-internacional-sostenible/>
- European Space Agency (ESA). (2023). *Radiation protection and material preservation in long-duration missions*. <https://www.esa.int>
- European Space Agency. (2023). *Closing the loop: How space technology could relieve water scarcity on Earth*. <https://space-economy.esa.int>
- Felix, J., (2023). *Detectores de Radiación Cómica*. Universidad de Guanajuato <http://repositorio.ugto.mx/handle/20.500.12059/9385>
- Fondo Monetario Internacional (FMI). (2022). Obtenido de Informe sobre desafíos del desarrollo sostenible en economías emergentes.: <https://www.imf.org/es/Publications>
- Fountain, L. L., et al. (2025). *Expanding frontiers: harnessing plant biology for space sustainability and Earth's agriculture*. New Phytologist, número especial. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20250005913/downloads/NewPhytologistViewpointPaper.pdf>

- Guerrero Azpeitia, L. A. (2022). *Ética y formación de profesionales en comercio internacional*. *InterCambios. Dilemas y transiciones de la Educación Superior*. Obtenido de http://www.scielo.edu.uy/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2301-01262022000200068
- INAMHI. (s. f.). *Gestión de riesgos hidrometeorológicos*. Recuperado de <https://inamhi.geogloss.org/>
- International Organization for Standardization (ISO). (2022). *ISO 28000:2022 Security and resilience – Management systems for supply chain*. Geneva: ISO.
- International Space Transport Association (ISTA). (2024). *Orbital packaging and payload handling standards*. <https://www.ista.org>
- Kulu. (2024). *La Nueva Económica del Espacio*. Battiston, Roberto. *Unesco*. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000390224>
- Lee, H., et al. (2025). *Developing an alternative medium for in-space biomanufacturing*. *Nature Communications*, 16, artículo 56088. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-56088-2>
- Li, X. &. (2022). Artemis Accords and the future of lunar governance. *Space Policy Review*, 15-28.
- Lucien Rapp, M. T. (2021). ¿Qué jurisdicción para plataformas autónomas ensambladas en espacio privado? *Space Policy*.
- M. Caqui, J., & Awange. (2019, enero 10). *La aplicación de la asimilación de datos satelitales multimisión para estudiar los cambios en el almacenamiento de agua en América del Sur*, 647, 1557–1572. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.079>
- Manufacturing USA. (2022). *Biomanufacturing to advance the bioeconomy: Policy directions & report*. <https://www.manufacturingusa.com>
- Markets, R. a. (2024). *Space Mining Market Size, Share & Trends Analysis Report by Type (Asteroid Mining, Lunar Mining), by Service (Exploration, Mining), by Region, and Segment Forecasts, 2025-2040*. Obtenido de https://www.researchandmarkets.com/report/space-mining?srsIid=AfmBOorSP2_yCvLfJPv2kioX7_MgjL6LaDbjT8P4RSFQA_Yk349cYAs7
- Martinez, A. &. (2023). The expansion of satellite constellations and global governance challenges. *international. Journal of Space Policy*, 112-130.

- Martínez, J. (2021). Obtenido de *ustainable trade policies in emerging economies: Challenges and opportunities*. *World Trade Review*: <https://doi.org/10.1017/S1474745621000123>
- Mora, D., Zambrano, M., & Torres, J. (2020). *Evaluación de la disponibilidad hídrica en los Andes ecuatorianos*. *Revista Ecuatoriana de Recursos Naturales*, 5(2), 77–89.
- NASA Ames Research Center. (2025). *Water Recovery Systems*. NASA. <https://www.nasa.gov>
- NASA Jet Propulsion Laboratory. (s. f.). *Soil Moisture Active Passive (SMAP) — mission overview*. JPL. Recuperado de <https://www.jpl.nasa.gov/missions/soil-moisture-active-passive-smap/>
- NASA Jet Propulsion Laboratory. (s. f.). *Water storage — GRACE-FO*. Jet Propulsion Laboratory, Caltech. Recuperado de <https://gracefo.jpl.nasa.gov/science/water-storage/>
- NASA. (2020). *Artemis Promgram About Gateway*. About Deep Space Logistics. <https://www.nasa.gov/gateway-deep-space-logistics/about-gateway-deep-space-logistics/>
- NASA. (2023). *Space logistics and supply chain integrity*. NASA Technical Reports Server (NTRS). <https://ntrs.nasa.gov>
- NASA. (2023). *Spinoff 2024 / 2025 editions*. NASA Spinoff. <https://spinoff.nasa.gov>
- NASA. (2024). *Space cargo integrity and microgravity effects on material science*. <https://ntrs.nasa.gov>
- NASA. (2024). *Space-Based Solar Power Study*. NASA OTPS. <https://www.nasa.gov>
- OECD. (2019). *La economía espacial en cifras: Cómo el espacio contribuye a la economía global*. Paris: OECD Publishing. Obtenido de https://www.oecd.org/en/publications/the-space-economy-in-figures_c5996201-en.html
- Onofri, S., et al. (2025). *Synthetic biology for space exploration*. *Frontiers in Microbiology*. <https://www.frontiersin.org>
- Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2020). *Cooperation in the peaceful uses of outer space*. United Nations Office for Outer Space Affairs (UNOOSA). <https://www.unoosa.org/oosa/en/ourwork/copuos/2025/index.html>
- Organización de las Naciones Unidas. (2015). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>

- Palit, S. D. (2025). *Rebalancing space governance: a global south perspective on outer space as a global commons*. Obtenido de *Frontiers in space technologies* : <https://doi.org/10.3389/frspt.2025.1594352>
- Rabatel, A., Francou, B., & Ceballos, J. L. (2018). *Glacier changes in the tropical Andes*. *The Cryosphere*, 12, 1023–1046.
- Rapp, L., Topka, M., & Mallowan, L. (2021). ¿Qué jurisdicción para plataformas autónomas ensambladas en espacio privado?. *Space Policy*. Obtenido de https://www.oecd.org/en/publications/the-space-economy-in-figures_c5996201-en.html
- Roca, M. (2024). multilateral cooperation in deep space exploration: A new diplomatic framework. *Journal of global science diplomacy*, 27-47.
- Rogers, A., & Kimura, H. (2022). *Artificial intelligence applications in space logistics management*. *Acta Astronautica*, 194, 321–339. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.03.002>
- Sáenz, C., Litago, J., Wiese, K., Recuero, L., Cicuéndez, V., & Palacios-Orueta, A. (2021). *Drought periods identification in Ecuador between 2001 and 2018 using SPEI and MODIS data*. *Engineering Proceedings*, 9(1), 24. <https://doi.org/10.3390/engproc2021009024>
- Sharma, K., et al. (2025). *Energy storage systems for space applications*. *Energy Reports*, 11, 100–120 (o similar; artículo de revisión). <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.117131>
- Silva, J. J. (2018, junio). *Rainfall monitoring network design using conditioned Latin Hypercube*. <https://dspacetest.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/30480/1/Trabajo%20de%20titulaci%C3%B3n.pdf?utm.com>
- Simmons, P. (2024). Polycentric governance for outer space: emerging trends and institutional models. *Governance and Technology Quarterly*, 75-93.
- Sun, H. X. (2022). *Research on the impact of asteroid mining on global equity*. Obtenido de arxiv: <https://arxiv.org/pdf/2211.02023>
- Torres, C. (2021). Limitaciones jurídicas del tratado del espacio Exterior en el siglo XXI. *Derecho Espacial Internacional*, 90-105.
- United Nations. (2015). *Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development*.
- United Nations. Obtenido de <https://sdgs.un.org/2030agenda> (FAIRTRADE INTERNATIONAL, 2023)

- Univiar, G. &. (2024). *International legal governance of space resources and the role of national frameworks: The case of china* . Obtenido de Chinese Journal oh International Law: <https://doi.org/10.1093/chinesejil/jmae024>
- UN-SPIDER. (s. f.). *Ecuadoran Institute for Meteorology and Hydrology (INAMHI)*. Recuperado de <https://www.un-spider.org/ecuadoran-institute-meteorology-and-hydrology-inamhi>
- World Economic Forum. (2024). *Space: The \$1.8 Trillion Opportunity for Global Economic Growth*. Obtenido de World Economic Forum: <https://www.weforum.org/publications/space-the-1-8-trillion-opportunity-for-global-economic-growth/>
- Zhang, Y., Wang, L., & Chen, M. (2021). *Blockchain-based traceability system for supply chain management*. *Journal of Industrial Information Integration*, 24, 100–115. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2021.100215>
- Zubieta, R., Getirana, A., Espinoza, J. C., Lavado-Casimiro, W., & Aragon, L. (2017). *Hydrological modeling of the Peruvian–Ecuadorian Amazon Basin using GPM-IMERG satellite-based precipitation dataset*. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21, 3543–3555. <https://doi.org/10.5194/hess-21-3543-2017>

Fundamentos de Administración, Comercio Exterior, Ética y Desarrollo Sostenible en la Era Espacial - Tomo 1



Live Working

EDITORIAL



ISBN: 978-9942-580-56-6



9 789942 580566

UNEMI
UNIVERSIDAD ESTATAL DE MILAGRO

 **InterCarga**
Integrated Logistics Services

UG
UNIVERSIDAD DE
GUAYAQUIL