



LIBRO II

DE LA TIERRA AL ESPACIO

Ciencia, Seguridad y el Papel de Colombia
en la Nueva Era Espacial

Editores Académicos:

Carlos Enrique Álvarez Calderón
Leidy Diana Girón Hernández



EMAVI
SELLO EDITORIAL

Catalogación en la publicación - Escuela Militar de Aviación “Marco Fidel Suárez”

De la Tierra al Espacio: Ciencia, Seguridad y el Papel de Colombia en la Nueva Era Espacial

De la Tierra al Espacio: Ciencia, Seguridad y el Papel de Colombia en la Nueva Era Espacial
/ Editores académicos: Álvarez Calderón, Carlos Enrique; Girón Hernández, Leidy Diana; -Santiago de Cali: Sello Editorial Escuela Militar de Aviación “Marco Fidel Suárez” EMAVI; 2025.

398 páginas; ilustraciones col, cuadros, gráficos; 17x24 cm.

Incluye bibliografía al final

1ra. Edición:

ISBN: 978-628-7865-04-4

ISBN (Digital): 978-628-7865-11-2

1.- Investigación espacial- Colombia 2. Tecnología e Innovación (CTeI) 3. Transferencia tecnológica

I. Salamanca Rodríguez, Edgar Alexander (prefacio); II. Rozo Cepeda, Yerim Andrés (prólogo); III. Corzo Zamora, Maria Alejandra (autor); IV. Celis Ceballos, Gustavo Adolfo (autor); V. Rodríguez Pirateque, German Wedgue (autor); VI. Giraldo Martínez, Guillermo Alfonso (autor); VII. Girón Hernández, Leidy Diana (autor); VIII. Flórez Zuluaga, Jimmy Anderson (autor); IX. Caro Jácome, Lady Adriana (autor); X. Buitrago Leiva, Jeimmy Nataly (autor); XI. Orjuela Rivera, Rosa Margoth (autor); XII. Estrada Villa, Erika Juliana (autor); XIII. Ramírez Segura, Bryan Felipe (autor); XIV. Rincón Cuta, Yeisson Alexis (autor); XV. Pauwels Romero, Carlos Alberto (autor); XVI. Gómez Durán, César Alexis (autor); XVII. Campos Chaparro, Cristhian Antonio (autor); XVIII. Sequeda Ramón, Joseph Néstor David (autor); XIX. Urrea Matallana, Andrés Felipe (autor); XX. Pineda Jiménez, Laura María (autor); XXI. Gaitán Serrano, Ervin (autor); XXII. García Vega, Oscar Armando (autor); XXIII. Duarte Alarcón, Jennifer (autor); XXIV. Colombia. Fuerza Aeroespacial Colombiana. Escuela Militar de Aviación “Marco Fidel Suárez” (EMAVI).

358 -de 21.

LC UG645.C7 .C67 2005

Catálogo SIBFuP 99139032400723



De la Tierra al Espacio: Ciencia, Seguridad y el Papel de Colombia en la Nueva Era Espacial

© Escuela Militar de Aviación “Marco Fidel Suárez” (EMAVI)

© EMAVI Sello Editorial

© Carlos Enrique Álvarez Calderón y Leidy Diana Girón Hernández (eds. académicos)



Esta publicación se desarrolló con el aval y apoyo institucional de la Escuela de Postgrados de la Fuerza Aeroespacial Colombiana - EPFAC, que facilitó los recursos necesarios para su realización.

Institución colaboradora

Dirección

Brigadier General Oscar Mauricio Gómez Muñoz

Escuadrón Investigación EMAVI

Carrera 8 # 58-67 (La Base) Cali-Colombia

Teléfono: +57 (2) 488 1000, Ext. 68841

Subdirección

Coronel Luz Stella Franco Yopez

Subdirectora y Jefe de Estado Mayor

Apoyo Gestión de Publicaciones Científicas

PS. Diana María Mosquera Taramuel

diana.mosquerat@emavi.edu.co

Comando Grupo Académico

Teniente Coronel Germán Andrés Arias Cortés

Corrección de Estilo:

Lorena Marcela Bustos Tamayo

Comandante Escuadrón Investigación y Jefe Sello Editorial

Mayor Héctor Fabio Calvo Valencia

Diseño y Diagramación Editorial:

Paola Forero Tamayo

Comandante Escuadrilla de Formación y Desarrollo Investigativo

Teniente Juan Pablo Contreras Sabogal

1ra. Edición: 100 ejemplares

Santiago de Cali, Valle del Cauca, 2025

Publicado en Colombia—Published in Colombia

Las instituciones editoras de esta obra no se hacen responsable de las ideas expuestas bajo su nombre, las ideas publicadas, los modelos teóricos expuestos o los nombres aludidos por los autores. El contenido publicado es responsabilidad exclusiva de los autores, no refleja la opinión de las directivas, el pensamiento institucional de las Universidades editoras, ni genera responsabilidad frente a terceros en caso de omisiones o errores.

El Sello Editorial de la Escuela Militar de Aviación “Marco Fidel Suárez” se adhiere a la filosofía de acceso abierto. Este libro está licenciado bajo los términos de la Atribución 4.0 de Creative Commons, que permite el uso, el intercambio, adaptación, distribución y reproducción en cualquier medio o formato, siempre y cuando se dé crédito al autor o autores originales y a la fuente.

LIBRO II

DE LA TIERRA AL ESPACIO

Ciencia, Seguridad y el Papel de Colombia
en la Nueva Era Espacial

Editores académicos:

Carlos Enrique Álvarez Calderón
TC. Leidy Diana Girón Hernández

Autores:

María Alejandra Corzo Zamora, Gustavo Adolfo Celis Ceballos, Oscar Armando García Vega, German Wedge Rodríguez Pirateque, Guillermo Alfonso Giraldo Martínez, Leidy Diana Girón Hernández, Jimmy Anderson Flórez Zuluaga, Adriana Caro Jácome, Jeimmy Nataly Buitrago Leiva, Rosa Margoth Orjuela Rivera, Erika Juliana Estrada Villa, Bryan Felipe Ramírez Segura, Jennifer Astrid Duarte Alarcón, Yeisson Alexis Rincón Cuta, Carlos Alberto Pauwels Romero, Carlos Enrique Álvarez Calderón, César Alexis Gómez Durán, Cristhian Antonio Campos Chaparro, Joseph Néstor David Sequeda Ramón, Andrés Felipe Urrea Matallana, Laura María Pineda Jiménez y Ervin Gaitán Serrano.



**FUERZA AEROSPAECIAL
COLOMBIANA**



**EMAVI
SELLO EDITORIAL**



**Consulta nuestras publicaciones también en el
Sistema de Información de Bibliotecas de la Fuerza Pública
- SIBFuP**

Contenido relacionado

<https://www.emavi.edu.co/es/investigacion/editorial-emavi>

Citanos:

Álvarez Calderón, C. E. y Girón Hernández, L. D. (Eds. académicos) (2025). *De la Tierra al Espacio: Ciencia, Seguridad y el Papel de Colombia en la Nueva Era Espacial*. EMAVI Sello Editorial.

Palabras clave: aeroespacial, Colombia, ciencia, innovación, logística, seguridad, sostenibilidad, tecnología.

CONTENIDO

Prefacio.....	7
----------------------	----------

Prólogo.....	9
---------------------	----------

Capítulo 1.

Exploración Espacial: Un enfoque Interdisciplinario	13
--	-----------

María Alejandra Corzo Zamora

/ Universidad Nacional de Colombia

MY. Gustavo Adolfo Celis Ceballos

/ Fuerza Aeroespacial Colombiana

Oscar Armando García Vega

/ Universidad Nacional de Colombia

Capítulo 2.

I+D+i Para el Desarrollo Espacial.....	51
---	-----------

TC. German Wedge Rodríguez Pirateque

TC. Guillermo Alfonso Giraldo Martínez

TC. Leidy Diana Girón Hernández

/ Fuerza Aeroespacial Colombiana

Capítulo 3.

Desafíos en la Transferencia Tecnológica para el Desarrollo Espacial	107
---	------------

TC. Guillermo Alfonso Giraldo Martínez

TC. German Wedge Rodríguez Pirateque

/ Fuerza Aeroespacial Colombiana

Jimmy Anderson Flórez Zuluaga

/ Instituto Tecnológico Metropolitano (ITM)

Capítulo 4.

Medio Ambiente, Desechos Espaciales y su Impacto en el Entorno Espacial	151
--	------------

MY. Adriana Caro Jácome

CT. Jeimmy Nataly Buitrago Leiva

/ Fuerza Aeroespacial Colombiana

Rosa Margoth Orjuela Rivera

/ Escuela de Postgrados de la Fuerza Aeroespacial Colombiana

Capítulo 5.
Tendencias Actuales y Futuras en Seguridad Operacional
Espacial.....203

María Alejandra Corzo Zamora

/ Universidad Nacional de Colombia

Erika Juliana Estrada Villa

/ Escuela de Postgrados de la Fuerza Aeroespacial Colombiana

Bryan Felipe Ramírez Segura

/ Escuela de Postgrados de la Fuerza Aeroespacial Colombiana

Capítulo 6.
Planeación Logística para el Desarrollo Espacial.....233

MY. Jennifer Astrid Duarte Alarcón

/ Escuela de Postgrados de la Fuerza Aeroespacial Colombiana

Yeisson Alexis Rincón Cuta

/ Escuela de Postgrados de la Fuerza Aeroespacial Colombiana

Capítulo 7.
Desafíos Técnicos y Políticos para Desarrollar la Capacidad
Nacional de Lanzamiento de Activos Espaciales desde
Territorio Colombiano.....267

TC. Carlos Alberto Pauwels Romero

Carlos Enrique Álvarez Calderón

/ Escuela Superior de Guerra “General Rafael Reyes Prieto”

Capítulo 8.
Colombia en la Antártida: Un Enfoque que Permitirá
Llegar a las Estrellas.....309

TE. Gómez Durán César Alexis

TE. Campos Chaparro Cristhian Antonio

ST. Sequeda Ramón Joseph Néstor David

ST. Urrea Matallana Andrés Felipe

Laura María Pineda Jiménez

/ Fuerza Aeroespacial Colombiana

Capítulo 9.
Colombia: Puerto de lanzamiento Espacial, una proyección
geoestratégica.....353

CR. (R) Ervin Gaitán Serrano

/ Escuela Superior de Guerra General “Rafael Reyes Prieto”

PREFACIO

El espacio ya no es un dominio exclusivo de las grandes potencias. En el siglo XXI, la exploración y utilización del entorno espacial se han convertido en pilares fundamentales para el desarrollo científico, tecnológico, económico y estratégico de las naciones. Colombia, con su ubicación privilegiada y sus capacidades emergentes en el ámbito aeroespacial, está llamada a desempeñar un papel cada vez más relevante en esta nueva era.

Este libro, *De la Tierra al Espacio: Ciencia, Seguridad y el Papel de Colombia en la Nueva Era Espacial*, es el resultado de un esfuerzo colectivo que busca consolidar una visión integral del futuro espacial colombiano. A través de sus capítulos, se presentan avances, retos y oportunidades en áreas clave como la investigación científica, la innovación tecnológica, la seguridad espacial y el desarrollo de infraestructura para la exploración y utilización del espacio exterior.

Desde la Fuerza Aeroespacial Colombiana, hemos asumido la responsabilidad de liderar y fomentar el conocimiento aeroespacial en nuestro país. La educación y la formación en estos temas no solo son un requisito estratégico para fortalecer nuestras capacidades nacionales, sino que también son una herramienta esencial para la proyección internacional de Colombia en el ámbito espacial. La creación de una cultura aeroespacial sólida requiere del compromiso de la academia, la industria y el Estado, trabajando de manera coordinada para impulsar la ciencia y la tecnología al servicio del desarrollo nacional.

Este libro es una invitación a la reflexión y a la acción. La exploración espacial ya no es una cuestión de futuro lejano, sino una realidad en la que Colombia debe integrarse con determinación y visión estratégica. Nuestra participación en la nueva economía espacial, en la seguridad y defensa del dominio aeroespacial, y en el aprovechamiento de las oportunidades científicas y tecnológicas dependerá del esfuerzo que hagamos hoy para fortalecer nuestras capacidades.

Agradezco y felicito a los autores de esta obra por su dedicación y por contribuir con su conocimiento a la construcción de un pensamiento

espacial colombiano. Estoy seguro de que este libro servirá como referencia fundamental para quienes deseen comprender y contribuir al papel de Colombia en el espacio.

BG. Edgar Alexander Salamanca Rodríguez
Jefe Jefatura Educación Aeronáutica y Espacial
Fuerza Aeroespacial Colombiana
2025

PRÓLOGO

En el siglo XXI, el acceso al espacio ya no es exclusivo de las grandes potencias. La globalización del conocimiento y la acelerada evolución tecnológica han abierto las puertas para que países emergentes como Colombia tracen su propia ruta en el ámbito espacial. Sin embargo, esta oportunidad conlleva grandes desafíos: la formación de talento humano, el desarrollo de infraestructura tecnológica, la seguridad espacial y la consolidación de una cultura aeroespacial son elementos esenciales para que Colombia no quede rezagada en esta nueva era.

Este libro, *De la Tierra al Espacio: Ciencia, Seguridad y el Papel de Colombia en la Nueva Era Espacial*, es un esfuerzo por articular los diversos aspectos del desarrollo científico espacial colombiano. A través de una estructura multidisciplinaria, los capítulos abordan desde los fundamentos científicos y tecnológicos hasta los retos estratégicos y políticos que enfrenta el país.

El Capítulo 1, “Exploración Espacial: Un enfoque Interdisciplinario”, establece la base conceptual sobre cómo la integración de distintas disciplinas científicas es clave para la exploración espacial. Se presentan avances en física, biología, ingeniería y medicina aeroespacial, así como su impacto en las misiones espaciales y en la vida cotidiana.

El Capítulo 2, “I+D+i Para el Desarrollo Espacial”, aborda la importancia de la investigación, el desarrollo y la innovación en la construcción de una industria espacial nacional. Se analizan las estrategias y modelos exitosos en otros países y se proponen rutas para que Colombia fortalezca su ecosistema de innovación en el sector aeroespacial.

El Capítulo 3, “Desafíos en la Transferencia Tecnológica para el Desarrollo Espacial”, explora uno de los mayores retos para cualquier nación emergente en la industria espacial: la transferencia tecnológica. Se examinan las barreras, oportunidades y estrategias para que el país logre absorber, adaptar y desarrollar nuevas tecnologías en el ámbito aeroespacial.

El Capítulo 4, “Medio Ambiente, Desechos Espaciales y su Impacto en el Entorno Espacial”, analiza el creciente problema de la basura espacial y su impacto en la sostenibilidad de las operaciones espaciales. Además,

se discuten las políticas internacionales y las posibles contribuciones de Colombia en este ámbito.

El Capítulo 5, “Tendencias Actuales y Futuras en Seguridad Operacional Espacial”, se centra en los riesgos y desafíos de la seguridad espacial, considerando tanto amenazas naturales como artificiales. Se examinan aspectos como el tráfico espacial, el control de satélites y la protección de infraestructuras críticas en el entorno orbital.

El Capítulo 6, “Planeación Logística para el Desarrollo Espacial”, resalta la importancia de una adecuada planificación en la gestión de misiones espaciales, infraestructura de lanzamiento y desarrollo de capacidades nacionales en el sector. Se presentan experiencias internacionales y se analiza cómo Colombia podría estructurar su propio modelo logístico espacial.

El Capítulo 7, “Desafíos Técnicos y Políticos para Desarrollar la Capacidad Nacional de Lanzamiento de Activos Espaciales desde Territorio Colombiano”, aborda una de las metas más ambiciosas del país: la posibilidad de establecer un puerto espacial propio. Se examinan los aspectos técnicos, normativos y geopolíticos que influirían en este desarrollo.

El Capítulo 8, “Colombia en la Antártida: Un Enfoque que Permitirá Llegar a las Estrellas”, vincula la presencia del país en la Antártida con el desarrollo de capacidades espaciales. Se argumenta que la experiencia en ambientes extremos y la investigación en este territorio pueden ser un trampolín para futuras misiones espaciales.

El Capítulo 9, “Colombia: Puerto de lanzamiento Espacial, una proyección geoestratégica”, analiza el potencial geoestratégico de Colombia para establecer un puerto de lanzamiento espacial, destacando sus ventajas geográficas y las oportunidades para reducir brechas tecnológicas. Propone una hoja de ruta para fortalecer el desarrollo espacial nacional y posicionar al país como actor relevante en la región. Con ello, plantea una estrategia que impulsa la acción estatal para consolidar los intereses colombianos en el espacio ultraterrestre.

Colombia ha dado sus primeros pasos en el ámbito espacial con iniciativas como el programa FACSAT y la participación de la Fuerza Aeroespacial Colombiana en la investigación y el desarrollo tecnológico. Sin embargo, aún queda mucho por hacer para consolidar un ecosistema espacial robusto que articule el sector académico, gubernamental y privado. Este libro no solo

ofrece una radiografía de la situación actual, sino que también plantea un llamado a la acción. La construcción de una estrategia espacial colombiana requiere del compromiso de múltiples actores y del desarrollo de capacidades nacionales en ciencia, tecnología e innovación. Invitamos al lector a explorar estas páginas con la certeza de que el conocimiento y la visión estratégica aquí plasmados serán fundamentales para la construcción del futuro espacial de la nación.

CR. Yerim Andrés Roza Cepeda

Director

Escuela de Postgrados de la Fuerza Aeroespacial Colombiana

2025

CAPÍTULO 1.

Exploración Espacial: Un enfoque Interdisciplinario

María Alejandra Corzo Zamora¹
Universidad Nacional de Colombia

MY. Gustavo Adolfo Celis Ceballos²
Fuerza Aeroespacial Colombiana

Oscar Armando García Vega³
Universidad Nacional de Colombia

Resumen: El avance de la exploración espacial hacia un enfoque multidisciplinario amalgama las ciencias biomédicas, la ingeniería, las humanidades y las ciencias básicas. Este capítulo tiene como objetivo examinar los aportes de las ciencias básicas y aplicadas en el desarrollo espacial. Se llevó a cabo una revisión sistemática de alcance en SCOPUS siguiendo los lineamientos PRISMA ScR para identificar y contextualizar los estudios relevantes en este campo. Como resultado del cribaje se incluyeron en la revisión 90 artículos de 1691 registros de la búsqueda completa. Los resultados indican que la interrelación entre ciencias básicas y aplicadas es crucial para abordar los riesgos asociados a la vida en el espacio. Además, se

- 1 Candidata a Doctor en Fisiología de la Universidad de Valencia. Magíster en Fisiología y Salud Espacial del King's College London y Magíster en Fisiología de la Universidad Nacional de Colombia. Médico – Cirujano de la Universidad Militar Nueva Granada. Docente e Investigador de la Universidad Nacional de Colombia. Experta en temas espaciales. Antigua docente y e investigadora de la maestría en Seguridad Operacional de la EPFAC y antigua asesora del grupo de medicina aeroespacial de la Comisión Colombiana del Espacio. Código ORCID: 0000-0002-6462-6745. Contacto: macorzo@unal.edu.co
- 2 Mayor de la Fuerza Aeroespacial Colombiana. Especialista en Medicina Aeroespacial de la Universidad Nacional de Colombia. Médico de la Universidad Autónoma de Bucaramanga. Médico investigador de la Dirección de Medicina Aeroespacial de la Fuerza Aeroespacial Colombiana. Código ORCID: 0009-0003-0156-510X. Contacto: gustavo.celis@fac.mil.co
- 3 Doctor y magíster en Farmacología Universidad Autónoma de Madrid , médico de la Universidad Nacional de Colombia. Docente e Investigador de la Universidad Nacional de Colombia. Experto en investigación integrativa y documental en temas de medicina humana y farmacovigilancia. Código ORCID: 0000-0001-7584-7298. Contacto: oagarcia@unal.edu.co

destaca como los productos del desarrollo y la innovación tienen aplicaciones tanto en el espacio como en la Tierra en conjunto con las humanidades para la regulación de estas actividades y la educación como pilar para la creación de una sociedad espacial.

En conclusión, la exploración espacial requiere un enfoque interdisciplinario que incluya las ciencias básicas y aplicadas, las humanidades y la diplomacia, promoviendo la cooperación internacional y garantizando un desarrollo sostenible. Este enfoque no sólo es fundamental para el éxito de las misiones espaciales, sino que también contribuye al bienestar humano en la Tierra, estableciendo un marco ético y cultural que respete la diversidad y promueva el desarrollo equitativo en el nuevo espacio.

Palabras clave: New Space, Investigación espacial, Ciencias básicas, Ciencias aplicadas

Introducción

La exploración espacial requiere de un ecosistema cooperativo entre diferentes ciencias, tanto básicas como aplicadas para garantizar el desarrollo constante de los diferentes programas, y la sostenibilidad a largo plazo de la exploración, la seguridad de las misiones y las personas que participan de ella.

El interés por el cosmos y el espacio exterior viene desde los inicios de la humanidad. Los viajes no tripulados que iniciaron con el lanzamiento del satélite Sputnik I en 1957 y del Explorer I en 1958, contaron con la participación de disciplinas como la ingeniería, la química, la astrofísica, las matemáticas entre otras (Crawford, 2016). Con el advenimiento de los viajes tripulados, la necesidad de equipos interdisciplinarios se volvió aún más crítica, integrando campos como las ciencias de la salud y biomédicas en el diseño de misiones exitosas.

La exploración espacial ha evolucionado a través del tiempo, centrándose inicialmente en el desarrollo de tecnologías para aprovechar la órbita terrestre y en la astronavegación (Filho & Bezerra, 2021). Las ciencias fundamentales, como la ingeniería y la física continúan siendo pilares en este desarrollo, mientras que la comprensión del entorno espacial es crucial para el diseño de vehículos espaciales, de lanzamiento y exploración; así como para la seguridad y efectividad de las misiones (Erickson, 2010).

Es necesario conocer el entorno espacial y su ambiente para lograr que estos vehículos y sus tripulaciones lleguen más allá de la línea de Karman. Las ciencias básicas como la física básica y aplicada en torno a la astrofísica y la astronomía, han permitido conocer el riesgo del ambiente espacial, gracias al diseño y construcción de grandes telescopios y satélites para la observación de objetos espaciales, mediciones de niveles de radiación, monitoreo de fenómenos astronómicos y los criterios para la determinación de los materiales de los vehículos espaciales (Erickson, 2010).

Desde la primera misión espacial tripulada por la canina Laika a bordo del Sputnik II en 1957, se dieron los primeros pasos y observaciones para que el ser humano pudiese postularse como tripulante (Marov, 2024). El primer viaje tripulado por humanos fue realizado el 12 de abril de 1961 por el cosmonauta ruso Yuri Gagarin el cual orbitó la Tierra por 1 hora y 48 minutos (Marov, 2024); luego, el 5 de mayo de 1961 el astronauta norteamericano Alan Shepard fue lanzado al espacio (Green, 2024). Estos acontecimientos dieron inicio al programa de la NASA Géminis que intentó extender el número de días de permanencia en el espacio, lo cual se continuó con el programa Apolo hasta desarrollar el programa Skylab en los años 70's y el programa del trasbordador espacial que inició en la década de los 80's y que duró por 20 años (Green, 2024). Posterior al vuelo de Gagarin, Rusia lanzó 9 módulos a la órbita Terrestre por 11 años desde 1986 y construyó la Estación Espacial MIR (Ferraro et al., 2024; Marov, 2024).

Después de la segunda guerra mundial, estas actividades espaciales han sido una prioridad en las principales sociedades de occidente, permitiendo atraer a las mentes más brillantes e innovadoras de la ciencia. A sus inicios, los objetivos eran principalmente políticos para demostrar superioridad y fuerza, y progresivamente se transforma en un interés científico en busca de descubrir los secretos del Universo, de colonizar el espacio y más recientemente de explotar recursos en otros cuerpos celestes (Criscuolo et al., 2020).

Las misiones espaciales tripuladas fuera de la órbita de la Tierra fueron desarrolladas en el marco de las misiones Mercury, Gemini y Apollo liderados por la NASA. Desde la última misión en este contexto en 1972, múltiples misiones tanto tripuladas como no tripuladas se han realizado con diferentes objetivos tales como conocer la superficie de Venus, Marte y la Luna Titan de Saturno, junto a la exploración de Júpiter, Saturno, Urano, Neptuno y Plutón (Asner & Garber, 2018). El desarrollo de vehículos reutilizables como el trasbordador espacial, la fabricación de los telescopios Hubble y James Webb, el ingreso al espacio interestelar con la sonda Voyager I, la incorporación del turismo espacial, planes de colonización, minería espacial y

operaciones de seguridad nacional que permiten establecer nuevos horizontes en la exploración espacial (Tucker & Alewine, 2023).

La construcción y puesta en marcha en 1998 de la Estación Espacial Internacional (ISS: International Space Station) que orbita a 400 Km de la Tierra, abrió una era de colaboración científica internacional. Para Ferraro y Cols (2024), la era espacial 1.0 se dedicó a la exploración del universo, posteriormente la era 2.0 viene con las misiones Apollo, Soyuz y las misiones de la “carrera espacial, las cuales crean el camino para la era 3.0 donde la colaboración permite obtener beneficios en ciencia y exploración, finalmente, nos encontramos en la era 4.0 en la cual la participación de actores privados, operadores e industrias promueven la introducción de nuevos modelos de negocios y aplicaciones espaciales. Se espera que la era 5.0 sera una mezcla de tecnologías con aplicaciones terrestres y espaciales con inclusión de inteligencia artificial, machine learning y con un modelo de democratización del espacio como núcleo de trabajo (Ferraro et al., 2024). Se debe tener en cuenta que los desarrollos espaciales han traído numerosos beneficios a la humanidad de los cuales se destacan la creación de los monitores cardiacos implantables, tratamiento del cáncer, paneles solares, sistemas de purificación de agua, sistemas de cómputo mejorados que permiten monitoreos y búsquedas en escenarios de búsqueda y rescate, tecnologías que son spin-off de tecnologías espaciales (Bizzarri et al., 2022; Ferraro et al., 2024). Así mismo estas tecnologías han permitido el desarrollo de una cadena de suministros robóticos e industriales en el espacio (Metzger, 2016).

La exploración espacial de larga duración y del espacio profundo es un sueño que sigue vigente, y se ha ido creando la ruta para volverlo una realidad, toda vez que los vuelos de larga duración son de meses o años, lo cual se lograría con enviar humanos a Marte como base para la continuidad hacia el espacio profundo.

En el caso de las misiones tripuladas los humanos deben enfrentar tres grandes desafíos: los cambios fisiológicos derivados de la gravedad y campos electromagnéticos, la exposición a rayos cósmicos y otras radiaciones que incrementa el riesgo de carcinogénesis y mutagénesis y por último los retos endocrinos y psicosociales derivados del confinamiento, aislamiento y la alteración de los ritmos circadianos (Bizzarri et al., 2022; Ferraro et al., 2024).

El rápido crecimiento del sector privado espacial, los planes para regresar a la Luna, el objetivo de enviar tripulaciones a Marte y la presencia de 72 países con programas espaciales activos de los cuales 14 países cuentan con capacidades de lanzamiento genera el desarrollo de nuevas iniciativas por

parte de entusiastas en todo el mundo indicando que entramos en la “Era del Nuevo Espacio” (Tucker & Alewine, 2023).

La investigación en ciencias espaciales es necesaria para evaluar los diversos riesgos y desafíos del entorno espacial, tanto para misiones tripuladas como no tripuladas. Pero de igual forma crean una nueva dinámica socioeconómica en la cual entran otras disciplinas a realizar aportes desde sus bases académicas.

Es por esto que el nuevo escenario académico requiere de investigación interdisciplinaria atraída por una creciente atención por parte de agencias, universidades y actores tomadores de decisión en la educación superior, abriendo puertas para un espacio de crecimiento del entorno espacial, en el cual el trabajo interdisciplinar tiene más capacidades para resolver problemas y desafíos en donde cada disciplina por sí sola no podría ser del todo efectiva, y donde las Artes, Humanidades y Ciencias sociales entran a apoyar el tradicional dominio académico de la Ciencia, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas en el campo (Tucker & Alewine, 2024).

Esta investigación interdisciplinaria debe contar con la participación de ciencias básicas definidas como aquellas ciencias que investigan partiendo de preguntas teóricas que llevan a la construcción del conocimiento. Estas ciencias dan las herramientas para que las ciencias aplicadas desarrollen su función. El quehacer de las ciencias básicas se basa en la investigación experimental. Y de igual manera con las ciencias aplicadas que utilizan los resultados de las ciencias básicas para el desarrollo de aplicaciones que permitan la solución de problemas y necesidades en el sector espacial.

Por lo anterior el presente capítulo producto del proyecto Ciencias Básicas y Aplicadas en la exploración espacial de la Facultad de Medicina de la Universidad Nacional de Colombia, tiene como objetivo presentar una perspectiva de como las ciencias básicas y aplicadas interactúan en el ecosistema espacial.

Metodología

Para dar respuesta al objetivo planteado, se realizó una Revisión sistemática de alcance (Scoping review) siguiendo los direccionamientos PRISMA-ScR. Este tipo de revisiones tiene como objetivo realizar una contextualización de un tema poco explorado o para identificar la evidencia existente en un área de estudio, favoreciendo así nuevos campos de estudio (Lopez-Cortes et al., 2022).

Por lo anterior se planteó como pregunta de investigación ¿Cuáles son los aportes y campos de trabajo de las ciencias básicas y aplicadas en los programas espaciales?, basado en el tipo de pregunta PCC para revisiones de alcance, se establecieron criterios de inclusión y exclusión, y se configuraron las palabras claves para la búsqueda bibliográfica en SCOPUS los cuales se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Aspectos metodológicos utilizados para la revisión sistemática de alcance

Componentes pregunta PCC		
<i>Población</i>	<i>Concepto</i>	<i>Contexto</i>
Ciencias básicas Ciencias aplicadas	Aportes y campos de trabajo	Programa espacial
Criterios de inclusión	Criterios de exclusión	
Revisiones	No acceso a texto completo	
Artículos originales	Publicaciones en idioma diferente al inglés y español	
Publicaciones entre el 01 de enero de 2014 y el 30 de Julio de 2024	Publicaciones que no hagan referencia a aportes de las ciencias básicas y aplicadas en el programa espacial	

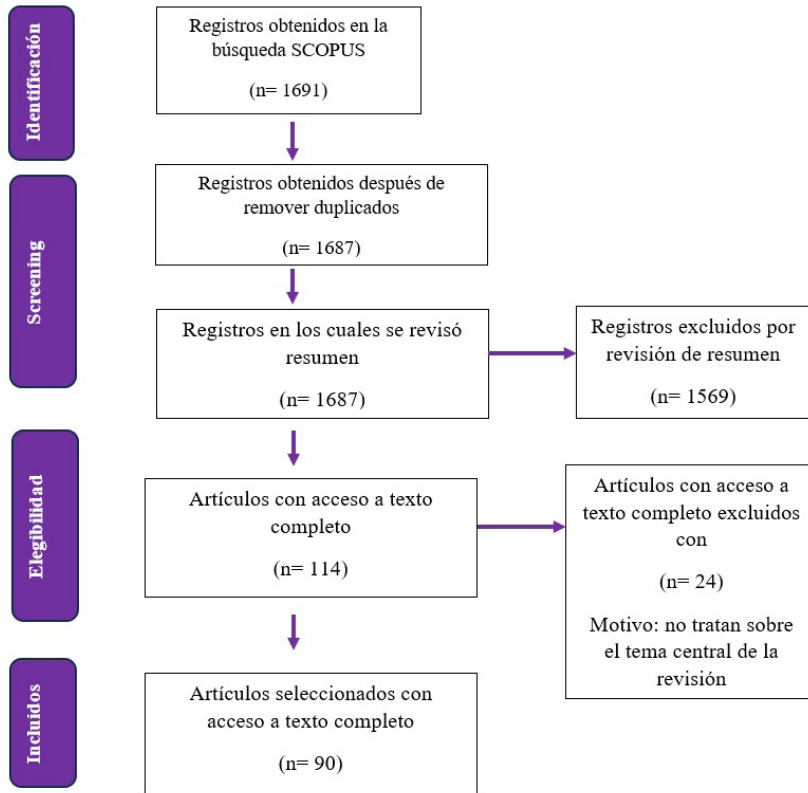
Fuente: elaboración propia.

Las palabras clave utilizadas fueron: *health sciences, biomedical sciences, chemistry, physics, education, art sciences, social sciences, nursing, biology, chemistry, engineering, pharmacology, economy* cruzadas con *Space Program* y como operador Boleano “AND”, con revisiones y artículos originales entre 2014 y 2024 publicados en inglés y español.

Resultados

Posterior al procesamiento de los registros encontrados en Scopus se incluyeron en la revisión 90 artículos. En la Figura 1 se describe el procesamiento de los registros siguiendo las directrices PRISMA.

Figuras 1. Diagrama de flujo para la selección de artículos según PRISMA Sc



Fuente: Elaboración propia.

Después de la selección de artículos que contó con la revisión de dos evaluadores, se creó una matriz bibliográfica con cada mezcla de términos de búsqueda e ideas clave de aporte.

Discusión

La discusión de los resultados se presenta en cinco secciones en las cuales se definieron según las ideas más importantes de cada set de palabras y campos de aplicación encontrados alineados con las aplicaciones en programas espaciales y ecosistema espacial (Tabla 2).

Tabla 2. *Agrupación de palabras clave para la construcción de secciones de presentación de resultados*

Palabras clave	Sección
<i>health sciences, biomedical sciences, nursing, pharmacology</i>	Ciencias biomédicas y médicas en la exploración espacial
<i>Biology, chemistry, engineering</i>	Consideraciones en Viajes Tripulados y Asentamientos Humanos
<i>Engineering, physics, chemistry</i>	Exploración del entorno espacial
<i>Education, art sciences, social sciences, economy</i>	Ciencias sociales, humanidades y arte en la exploración espacial

Fuente: elaboración propia.

1. Ciencias biomédicas y médicas en la exploración espacial

El bienestar de las tripulaciones en el espacio es fundamental para la prosperidad, seguridad y estabilidad en las misiones espaciales, por lo que se requieren acciones cooperativas para soluciones efectivas. Esto aplica tanto en la Tierra como en el espacio, donde la investigación, el desarrollo y la innovación juega un papel crucial (Evetts, 2014).

En el campo de la salud, se han desarrollado herramientas diagnósticas y dispositivos médicos para las actividades y competencias médicas como jeringas desechables, sensores analíticos, tecnologías para cultivos celulares e infraestructura para telemedicina y soporte médico remoto de uso importante para el abordaje médico y terapéutico en el ambiente espacial (Bizzarri et al., 2022).

Las ciencias biológicas y médicas se han integrado con la física y la ingeniería para abordar dinámicas complejas del entorno espacial, dando como resultado la Medicina Espacial, la cual se centra en preparar a los humanos para enfrentar los desafíos del espacio, basándose en fisiología ambiental y ocupacional (Grigor’ev et al., 2021).

Vivir y trabajar en el espacio ocasiona un proceso parecido de envejecimiento acelerado donde se presenta a una pérdida rápida de músculo y masa ósea, deterioro del estado cardiovascular, debilitamiento del sistema inmune y alteraciones del control de la presión arterial y de la coordinación neuromuscular. Estos cambios del cuerpo humano preocupan a la industria espacial, en la cual las agencias espaciales buscan de contramedidas para la

mitigación de estos riesgos debido a que las tripulaciones ubicadas en la órbita baja de la tierra a bordo de la ISS lo están experimentando en cortas estancias pero que en un futuro estarán enfrentadas a condiciones del espacio profundo durante meses o años (Evetts, 2014; Mian & Mian, 2023). Actualmente se están generando estrategias para la gestión de eventos médicos en misiones de espacio profundo (Robertson et al., 2020) que incluyen otras áreas de la medicina como la enfermería (Rivera et al., 2024), la nutrición y la fisioterapia entre otras. Estas situaciones han permitido que las soluciones desarrolladas para la gestión de novedades médicas en el espacio no solo sean aplicadas en el espacio sino también en el cuidado de la salud en la Tierra.

Las ciencias biomédicas en conjunto con las ciencias de la salud buscan establecer los riesgos y las contramedidas de las misiones espaciales tripuladas, lo que requiere de una investigación coordinada y multidisciplinaria e interdisciplinaria (Alwood et al., 2017).

Un ejemplo de esta coordinación se encuentra dentro del plan estratégico de NASA, la cual incluye una robusta investigación en ciencias básicas y aplicadas para realizar descubrimientos fundamentales, así como direccionar el conocimiento y los riesgos emergentes en la salud humana. Es así como en NASA, el portafolio de las Ciencias de la Vida está integrado por el programa de Biología Espacial, el Programa de Investigación Humana y las Operaciones Médicas, lo que al final se convierte en investigación traslacional (Alwood et al., 2017).

En este escenario se han identificado riesgos para la salud humana como son las alteraciones del ciclo circadiano producto de la duración del día y la noche entre estos se destacan cambios en la expresión génica, niveles de hormonas reguladoras como el cortisol, funciones de proteínas, alteraciones en la mineralización ósea, metabolismo, función mitocondrial, inflamación y función gastrointestinal entre otras (Afshinnekoo et al., 2020; Choukér et al., 2021).

Para el estudio de estos, se han recolectado muestras en humanos y se han realizado estudios con cargas biológicas lanzadas al espacio, entre los que se encuentran: células madre, bacterias, ratas, nemátodos, monos y moscas de frutas.

Los cambios básicos a nivel celular y molecular encontrados se establecen en seis grupos: Estrés oxidativo y su relación con el daño celular, daño del DNA, alteraciones mitocondriales, cambios epigenéticos y de regulación génica, dinámicas en la longitud de telómeros y cambios en el microbioma (Afshinnekoo et al., 2020).

Uno de los grandes desafíos de las investigaciones realizadas por las ciencias biomédicas es su bajo número de participantes, por lo que se ha optado por realizar estudios longitudinales, observando el comportamiento de características individuales con el paso del tiempo y registrando los cambios adaptativos en el espacio como en el estudio de los gemelos realizado por NASA o en condiciones de misiones análogas como la misión MARS-500, para lo cual la bioinformática ha permitido la realización de predicciones de series temporales de datos de expresión génica y molecular (Hao et al., 2022).

NASA dispone de la biblioteca de Genes o GeneLab Data Systems (GLDS) donde se pueden encontrar bases de datos de ómica relacionadas con estudios de radiación que contienen datos de variables relacionadas con presión atmosférica, ejercicio, nutrición, gravedad, temporalidad y datos sobre dosimetría los cuales pueden ser utilizados para resolver vacíos de estudios realizados en la Tierra y experimentos biológicos como los estudios de la década de los 90 (Beheshti et al., 2018).

Otras bases de datos relacionadas con ciencias de la vida espacial son el archivo de datos de las ciencias de la vida de NASA y los Archivos de datos Erasmus de la Agencia Espacial Europea, los cuales contienen 2659 y 2550 reportes respectivamente, esta búsqueda puede realizarse por especies, áreas de investigación, misiones, países y años (Wang et al., 2023).

La ISS ubicada a una altitud entre los 300 y 400 Km sobre la superficie terrestre, con una inclinación de 51.6°, está expuesta a rayos cósmicos compuestos desde protones hasta iones de hierro los cuales son provenientes de la galaxia y producto de muerte de estrellas y otras reacciones físicas, estos son objeto de estudio de la Astrofísica y la Astronomía; , la ISS también se encuentra expuesta a eventos de partículas solares, protones y electrones atrapados en los cinturones de Van Allen (Furukawa et al., 2020). La exposición a radiación estará presente en mayor proporción cuando se planeen misiones más allá de los cinturones de Van Allen, por lo cual las misiones a la Luna y Marte difieren de alguna forma con las desarrolladas en la ISS, por lo que el estudio de las dosis de radiación de estos trayectos, así como de las medidas de mitigación requerirán del manejo multidisciplinario entre la física, la química, las ciencias biomédicas, la medicina y la ingeniería.

Teniendo en cuenta que los factores nutricionales, el estado físico, la respuesta inmune, la reparación tisular, la tasa de envejecimiento y la sensibilidad a la radiación son factores individuales que responden al ambiente expuesto, se propone entregar a los astronautas servicios de medicina personalizada para prevenir y minimizar el impacto del vuelo espacial, asegurando un diagnóstico

efectivo y un tratamiento emergente de los problemas médicos presentados durante la misión (Pavez Lorié et al., 2021).

La baja movilidad de los astronautas en los espacios reducidos de las naves espaciales genera un desacondicionamiento físico y cardiovascular, estudios en sistemas análogos como el reposo en cama y las misiones análogas espaciales, han permitido el estudio de los procesos moleculares, locales y sistémicos, así como entender los cambios producidos en personas con vida sedentaria moderna en la Tierra y generar beneficios médicos para astronautas y personas en la Tierra (Evetts, 2014).

De igual forma, la química farmacéutica y la farmacología se encuentran estudiando los efectos que la microgravedad y el ambiente espacial puede tener en la estabilidad de los medicamentos, los sistemas de empaque, y como su almacenamiento a temperaturas criogénicas puede influir en su efectividad (Mehta & Bhayani, 2017).

La microgravedad representa desafíos no solo biológicos sino investigativos. El desarrollo y estudios en Chips de Laboratorio (LOC: Lab-on-Chip) han permitido avances en el estudio de la biología y fisiología celular en microgravedad y requieren de cooperación interdisciplinaria para el desarrollo de aplicaciones en medicina espacial (Krakos, 2024).

Otro avance del campo biomédico se encuentra relacionado con la ingeniería de tejidos, la cual se plantea como una solución para el manejo de eventos durante las misiones espaciales. Las tecnologías para cultivos celulares en condiciones de microgravedad simulada en la Tierra han experimentado un crecimiento significativo, estas emplean principios biológicos, como los sistemas de clinostatos 3D que generan momentos de caída libre, permitiendo el cultivo celular, favoreciendo su crecimiento y ensamblaje en tejidos funcionales. La condición de microgravedad provee una ausencia de sedimentación y convección permitiendo que las células crezcan en tres dimensiones, ofreciendo un entorno que se asemeja más a la realidad morfofisiológica humana. Entre los tejidos que se han cultivado en estas condiciones se encuentran las células endoteliales, cartílago y células tiroideas. Estos hallazgos permiten tener soluciones duales para la reconstrucción de tejidos tanto en el espacio como en la Tierra (Grimm et al., 2014).

2. Consideraciones en Viajes Tripulados y Asentamientos Humanos

El establecimiento de asentamientos humanos en la Luna y Marte es una de las metas a futuro de la exploración espacial. Estos proyectos requieren de innovación y preparación con un enfoque multidisciplinario para cumplir el la misión con los mínimos riesgos. En este contexto, es fundamental integrar elementos biotecnológicos que soporten el mantenimiento de la salud de los habitantes, que reduzcan los costos operativos e incrementen la resiliencia operacional (Berliner et al., 2021) Dado que los lanzamientos y el transporte presentan limitaciones de peso, estas misiones deben contar con los instrumentos y metodologías para ser autosuficientes con el menor número de implementos y herramientas.

El Programa *Artemis*, se enfoca en la participación científica y tecnológica multidisciplinaria con un alto componente de investigación con el objetivo de regresar a la Luna y establecer un asentamiento humano permanente, para lograrlo es fundamental diseñar e implementar medidas médicas y tecnológicas que mitiguen los riesgos operativos (Bizzarri et al., 2022).

Dado que el entorno espacial es inherentemente hostil, es necesario desarrollar estudios que analicen la interacción social, cultural, biológica y médica de las tripulaciones. Las misiones análogas espaciales se presentan como plataformas para realizar estas observaciones, replicando las condiciones cerradas, extremas y adversas del espacio con un costo menor y con una mayor muestra (Evetts, 2014; Sarma & Shelhamer, 2024) estas plataformas han permitido el desarrollo de protocolos que minimizan las desviaciones de las condiciones espaciales, permiten la detección de biomarcadores, la creación de monitores portátiles, sistemas de extracción de DNA para estudios en saliva, cabello, sangre y uña. Además, estudios en sociología, antropología y psicología han contribuido a predecir comportamientos y variaciones culturales en estos entornos (Sarma & Shelhamer, 2024).

Entre las necesidades críticas para la expedición a Marte se encuentran la alimentación, medicinas, y materiales de construcción considerando una misión de 500 días con tripulantes y dos trayectos de aproximadamente 210 días. Para abordar estas necesidades se proponen sistemas de biomanufactura destinados a la generación de agua y aire, así como reciclaje y purificación, en asociación con los Sistemas de Control Ambiental y de Soporte de Vida (Berliner et al., 2021). La integración de estas soluciones requiere la colaboración de las ciencias biológicas, químicas, médicas y de ingeniería mediante el desarrollo de unidades modulares operativas.

Sin embargo, desde el ámbito de la biología se realizan estudios en sistemas acoplados a la Estación Espacial Internacional, como el proyecto BIOMEX (Biology and Mars Experiment), en el que colonias secas del hongo *Cryomyces antarcticus* crecen en un análogo de regolito lunar y se exponen a 16 meses anclados a la ISS. El objetivo es investigar cómo se comportan los biomarcadores tras la exposición al ambiente espacial, lo que también permitirá determinar otros marcadores en la búsqueda de señales de vida (Cassaro et al., 2022).

Otro desafío significativo de la exploración espacial son las largas distancias de viaje del sistema solar, que hasta ahora solo han sido alcanzadas por exploradores robóticos. Sin embargo, se ha evidenciado que una interacción entre humanos y robots es necesaria para lograr mejores resultados debido a la flexibilidad cognitiva, adaptabilidad, experiencia, creatividad, intuición y la capacidad de tomar decisiones en tiempo real que las máquinas no poseen. Este tipo de misiones tripuladas y prolongadas debe de considerar los riesgos a los que se enfrenta la fisiología humana y sus sistemas de soporte vital. Una de las consideraciones que se tienen en cuenta actualmente son los sistemas de hibernación para reducir los requerimientos fisiológicos de los astronautas, lo que disminuirá la cantidad de suministros necesarios y mitigará efectos neuro comportamentales relacionados con el aburrimiento, la soledad y la agresión (Choukér et al., 2021)

En la ESA, se conduce un concepto de misión que busca establecer las necesidades, beneficios y potenciales impedimentos de inducir un “estado de torpor” el cual se caracteriza por una hibernación con bajo metabolismo y reflejos. El equipo de misión está conformado por grupos de biología e ingeniería para dar aproximaciones a este concepto. Desde el campo de la Biología se estudian los desafíos que conllevan la reducción del metabolismo en mamíferos y otras especies como plantas, hongos y pequeños organismos como el *C. Elegans* y aquellos organismos presentes en condiciones extremas como los tardígrados, y desde la ingeniería para el diseño de la arquitectura de la Misión, equipos y el uso de inteligencia artificial (Choukér et al., 2021).

Dentro de las misiones espaciales tripuladas, un factor de suma importancia son los sistemas de soporte de vida, lo que permite que las tripulaciones viajen dentro de los parámetros de seguridad y se garantice las condiciones para un desempeño físico y cognitivo óptimo, sistemas en los cuales participa fuertemente el campo de la ingeniería a través de dispositivos traslacionales que permitan proteger y mejorar la calidad de vida de las tripulaciones (Snyder et al., 2019).

Dentro de los sistemas de soporte de vida se encuentran los sistemas de control ambiental, atmósfera y agua, los cuales en un ambiente cerrado permiten mantener organismos (humanos, animales y/o plantas) en condiciones saludables a través de la generación de una condición estable que imite las condiciones terrestres. Dentro de los parámetros de soporte vital se incluyen temperatura, presión de aire, circulación de aire, composición del gas respirable humedad, suministro de agua potable y mecanismos para la remoción de toxinas, así como la producción de alimentos, y de una forma más amplia los suministros de sustancias con potencial farmacológico y para el diagnóstico médico, sistemas también conocidos como biorregenerativos (Vandenbrink & Kiss, 2016; Snyder et al., 2019) Esto conlleva al desarrollo de una cadena de producción de herramientas y suministros que llevan al establecimiento de la manufactura espacial (Snyder et al., 2019).

Gran parte de la investigación biomédica se ha centrado en los procesos biológicos y fisiológicos de los astronautas, y en menor proporción de los fenotipos que se pueden presentar tras la exposición al ambiente espacial. Los astronautas son seleccionados tras un riguroso proceso, pero el turismo espacial y el aumento de las compañías privadas con actividades espaciales tripuladas y transporte de pasajeros al espacio no realizan procesos de selección, generando una oportunidad para describir estos fenotipos y variaciones entre poblaciones (Criscuolo et al., 2020).

Los asentamientos humanos en ambientes extremos espaciales conllevan también a diseño de hábitats autosuficientes que provean alimentación, descanso y condiciones sanitarias adecuadas. En las últimas décadas ha aumentado el interés sobre como crecen las plantas en entornos de microgravedad para que provean parte de la alimentación y condiciones internas del hábitat especialmente para aquellas misiones de larga duración. Las plantas son de suma importancia para los Sistemas de Soporte Vital Biorregenerativos (BLSS: Bioregenerative Life Support Systems) el cual es un ecosistema artificial que se basa en la integración de procesos fisicoquímicos y biológicos para soportar las misiones de larga duración. Estos sistemas incluyen compartimentos interconectados en los cuales diferentes microorganismos son utilizados para el reciclaje de recursos y la producción de recursos como el agua, oxígeno y alimentos (De Pascale et al., 2021; De Micco et al., 2023).

La investigación en este campo inicia en los años 1960's con el experimento BIOS de Rusia y con el CELSS (Controlled-Ecological. Life Support System) realizado por NASA. NASA también contó con la cámara de Producción de Biomasa que funcionó hasta 2005. Actualmente, el Centro

Espacial Kennedy de la NASA ha llevado a cabo los experimentos Veggie y el Hábitat de plantas avanzado a bordo de la ISS. Japón en los años 1990's realizó investigación en sistemas cerrados en la Facilidad para Experimentos Ecológicos Cerrados (CEEF: Closed Ecological Experimental Facility) donde realizó aproximaciones en plantas, animales y humanos. En Europa la facilidad MELISSA (Micro-ecological Life Support System Alternative) tiene como objetivo la construcción de un hábitat autónomo para el espacio profundo y que suplemente aire fresco, agua y comida a través de un reciclaje microbiano de los desechos humanos como son la orina y el CO₂ (Maiwald et al., 2023).

Uno de los sitios más remotos y austeros que es utilizado como análogo espacial es la Antártida, al cual el Centro Espacial Alemán DLR llevo la facilidad EDEN ISS Mobile Test Facility (MTF) a la estación antártica Newmayer III. Las operaciones de esta facilidad se realizaron entre 2018 y 2022, esta está compuesta por dos elementos una sección de servicios y el hibernadero cada una del tamaño de un container. La estación en la primera temporada logró producir 268 Kg de comida fresca para la tripulación de la base (Maiwald et al., 2023).

En estos sistemas, los métodos de cultivo son realizados basados en los factores del espacio como son la gravedad reducida y la radiación ionizante que alteran procesos fisiológicos de forma directa e indirecta como por ejemplo su interacción con líquidos y gases (De Pascale et al., 2021) En la investigación en plantas se han utilizado más de 20 especies de 7 familias de *monocots* y *eudicots*, en las cuales se ha observado que la microgravedad no cambia el marco de desarrollo genéticamente programado y sus respuestas durante la ontogénesis es similar a la de la Tierra. Los cambios observados se encuentran a nivel de la organización de los organelos celulares, la peroxidación lipídica y la actividad antioxidante, los tiempos del ciclo celular, la expresión de genes y proteínas involucradas en procesos celulares como la señalización de calcio y lípidos, reacciones al estrés y metabolismo general. Entre las plantas recomendadas para la exploración espacial se encuentran los cereales y las leguminosas para garantizar una dieta balanceada (Kordyum & Hasenstein, 2021).

Las plantas también pueden proveer sustratos para materiales y actividades espaciales tales como es el caso de los biocombustibles, los bioplásticos y ser un recurso de principios activos para productos farmacéuticos con lo que sistemas a base de plantas pueden proveer otros servicios así como mantener la sostenibilidad en la Tierra (Morgan et al., 2024).

El desarrollo de estos hábitats para misiones del espacio profundo con la integración de soluciones de Telemedicina así como de sistemas autosuficientes, tienen aplicaciones para el espacio y para la vida en la Tierra, los cuales pueden apoyar la sostenibilidad de poblaciones ubicadas en ambientes extremos donde la consecución de recursos y sistemas básicos no es posible, generando en estas poblaciones desarrollo social y económico en donde la cooperación, la coordinación interdisciplinaria y multidisciplinaria se hace necesaria para el alcance de objetivos (Evetts, 2014).

Una preocupación creciente, de las entidades estatales y privadas frente a la exposición a la radiación en el espacio profundo las ha llevado a desarrollar de medidas para reducir la exposición de astronautas y a la investigación de medicamentos que permitan el manejo de condiciones relacionadas. Un ejemplo de esta cooperación es NASA, FDA (United States Food and Drug Administration), el Instituto de Investigación de Radiobiología de las Fuerzas Armadas de los Estados Unidos (AFRI) y la Universidad de Ciencias de la Salud de los Servicios Uniformados de los Estados Unidos (USUHS) las cuales en conjunto realizan investigación y desarrollo en contramedidas físicas como son escudos protectores, sistemas de alertas tempranas y dosimetrías, contramedidas médicas como profilaxis tratamiento para radiación específica sistemas secundarios afectados. Así mismo, medicamentos que permitan el control de síntomas como son antidiarreicos, antieméticos, antiinflamatorios, agentes antimicrobianos, factores recombinantes de crecimiento, agentes nutracéuticos como factores protectores, suplementos nutricionales, productos génicos, sistemas inmunomoduladores de bioingeniería y probióticos (Singh & Seed, 2022), entre los cuales el uso de fitoquímicos promete capacidades para la radioprotección (Jit et al., 2022).

3. Exploración del entorno espacial

La robótica de la mano con la ingeniería ha sido de importancia para la exploración del espacio desarrollando sus capacidades en minería, construcción y en tareas autónomas con poca participación de teleoperadores. El uso de robots en la industria espacial es necesario en las primeras etapas de la exploración, estos sistemas requieren de hardware, software y sistemas de monitoreo remoto para garantizar los resultados de las misiones (Metzger, 2016) La robótica ha permitido la exploración de superficies planetarias y diversos cuerpos celestes, también ha desarrollado sistemas de reparación y ensamblaje de grandes telescopios en órbita y la implementación de plataformas para investigación científica (Gao & Chien, 2017).

Otros sistemas como los globos estratosféricos han permitido que disciplinas como la astrofísica, la heliofísica y las ciencias planetarias puedan realizar investigaciones con diferentes cargas útiles como son magnetógrafos, cámaras multispectrales Infrarrojas, espectómetros entre otros y a bajo costo, generando desarrollos incrementales en objetivos telescópicos, sistemas de comando y control, poder y sistemas de soporte en Tierra (Alvarez et al., 2023).

Dentro de las misiones espaciales se encuentran las exploraciones para búsqueda de vida y conocimiento de las características geológicas y ambientales de otros cuerpos celestes y planetas. La Biología espacial se encarga de descubrir el origen de la vida en la Tierra, encontrar formas de vida extraterrestre, y como los organismos están afectados por el ambiente espacial. Algunos organismos que han sobrevivido a la exposición al ambiente espacial como son algunas bacterias, tardígrados, hongos, son motivo de estudio para entender estos fenómenos y conocer los mecanismos que pueden ser utilizados para proteger a otros organismos del ambiente espacial (Ferranti et al., 2021).

Teniendo como base los cambios fisiológicos que presentan los humanos durante la exposición al ambiente espacial, se han creado facilidades para el estudio de la microgravedad de la Biología en conjunto con la Ingeniería como sistemas análogos para investigación, estos incluyen el clinostato 1D/2D/RWV el cual tiene tres dimensiones como la levitación diamagnética que simula microgravedad compensando la gravedad a un nivel molecular a través del balanceo del peso de agua y los tejidos biológicos, creando parábolas, momentos de suspensión y utilizando las torres de caída libre para conducir experimentos orientados a la influencia de la microgravedad en la electrofisiología de las membranas biológicas y el comportamiento de ciliados y peces (Ferranti et al., 2021). Los resultados de estos estudios incluyen diferentes variables presentes en las condiciones espaciales tales como vibración y exposición a radiación los cuales sirven como controles para las investigaciones en el espacio (Vandenbrink & Kiss, 2016).

En el escenario espacial, la Biología utiliza los cubsats y nanosats con cargas útiles como en la misión Biosintel, en la cual un nanosatélite monitoriar el crecimiento microbiano en células de levadura en el espacio profundo, el efecto de la radiación ionizante (Padgen et al., 2023) y sistemas anclados a la ISS. También se utilizan los globos estratosféricos en el escenario espacial los cuales originalmente son utilizados por la meteorología desde su invención en el siglo 19 para el estudio de fenómenos ambientales (Klomchitcharoen et al., 2024).

La Astrobiología antes conocida como exobiología, estudia el origen, evolución y distribución de la vida en el Universo (Meurer et al., 2023). Este campo ha realizado investigaciones buscando indicios de vida extraterrestre orientados a componentes en el suelo que podrían sugerir posibilidades de vida orgánica, así como biofirmas orgánicas en conjunto con la química (Abrahamsson & Kanik, 2022). De igual manera, el programa SETI busca otras formas de vida extraterrestre desde la Tierra a través de observatorios o a través de vehículos robóticos (Gelís-Filho, 2024). De forma importante, la astrobiología busca entender como la vida en la Tierra funciona y evoluciona; lo cual se asocia a la ecología buscando establecer la relación de los organismos con sus ambientes. Esto deriva en la astroecología para entender como los organismos evolucionan según su trabajo y su dinámica de vida, lo que permite entender cómo evoluciona la vida en la Tierra (Meurer et al., 2023).

La ingeniería representa un pilar en la exploración espacial mediante los desarrollos realizados en los servicios en órbita de las naves espaciales, concepto que fue propuesto en la década de los 1960's y que se ha incrementado en el último siglo. Estos servicios son desarrollados en torno a las necesidades de cada misión e incluyen servicios de robótica en satélites geoestacionarios, bloques de construcción inteligentes e infraestructura espacial, vehículos modulares multimisión, depósitos para propelentes y sistemas de reabastecimiento en órbita (Li et al., 2019). La ingeniería aeroespacial como disciplina especializada sigue en constante evolución para el diseño y desarrollo de vehículos y sistemas para aplicaciones comerciales y militares, los cuales demandan mejoras en seguridad y eficiencia, por lo que en la actualidad se utiliza conceptos de Blockchain y aplicaciones de inteligencia Artificial para solventar estos desafíos (Abdulrahman et al., 2023).

Desde la astrofísica, la necesidad de nuevos sistemas de propulsión para la exploración espacial ha permitido que la astrofísica nuclear presente un crecimiento, este campo se deriva de la mezcla de la física nuclear y la astrofísica, busca entender los motores nucleares de objetos astronómicos y el origen de sus elementos químicos que pueden ayudar a los sistemas de exploración apoyados por la cosmoquímica y diferentes equipos desarrollados por la ingeniería (Schatz et al., 2022).

La química juega un papel decisivo en los tipos de materiales utilizados en los vehículos espaciales a fin de mantener el desempeño de estos y el manejo de los cambios térmicos del ambiente espacial. En este punto los materiales de cambio de fase (PCM) han jugado un rol de importancia en la gestión térmica de los componentes electrónicos y la disipación de altos niveles de

flujo de calor. Entre los materiales comúnmente utilizados se encuentran esponjas metálicas de aluminio y cobre, espumas metálicas de alta porosidad de aluminio y cobre, sistemas de relleno a base de fibra de carbón, capas metálicas y grafito los cuales pese a su buena gestión térmica presentan algunas falencias como el trinquete cíclico, cortocircuitos y la gestión de fases del PCM a medida que se realiza la transición por varias fuerzas G (Khan & Singh, 2024).

De igual manera, la química permite describir la composición de suelos y de potenciales amenazas en el entorno espacial de origen químico como son los vientos con polvo lunar que pueden ser volátiles (Lucey et al., 2022).

4. Educación y exploración espacial

Una parte del futuro de la humanidad yace en la exploración espacial, por lo que la educación en ciencias espaciales debe ser una prioridad de escuelas y universidades alrededor del mundo. Por lo anterior desde las ciencias de la educación, se ha visto el creciente número de programas STEAM (Science, technology, Engineering, Arts and Maths) áreas que proveen el conocimiento para transportar personas al espacio y mantener la vida en condiciones extremas (Ambrosius, 2023). Estos programas empiezan los cuales a nivel de educación básica primaria y secundaria llevan a los estudiantes a dirigir su interés por temas espaciales, estos incluyen clubes que trabajan estos temas de forma extracurricular y son esenciales para el desarrollo y sostenibilidad de la sociedad tecnológica moderna (Caldwell, 2015).

Los programas de educación pre y posgradual universitarios establecidos se encuentran principalmente orientados hacia la ingeniería aeroespacial mientras que pocos ofertan cursos relacionados con la economía, negocios, política, relaciones internacionales y leyes en el campo espacial, por lo que la implementación de cursos relacionados es una necesidad en los diferentes programas académicos (Borowitz, 2024). Estos cursos ofrecen una perspectiva amplia del contexto de las misiones especiales más allá de las ciencias y la ingeniería aeroespacial, que van a cubrir temas como la sostenibilidad, el logro de objetivos espaciales. Así mismo, deben ser realizados de forma transdisciplinar a programas académicos y sus aplicaciones como son la seguridad espacial, economía espacial y política espacial (Borowitz, 2024).

Una de estas experiencias se logra en escuelas de verano las cuales van desde campamentos hasta escuelas de investigación. Tal es el caso de la Escuela de Verano en Investigación relacionada con la Gravedad liderada por la Agencia Espacial Europea (ESA) en conjunto con la Asociación Europea de

Investigación en Baja Gravedad (ELGRA), la cual se lleva a cabo desde 2016 en el marco del Programa de Entrenamiento académico y de Aprendizaje; este programa busca promover temas de investigación en diferentes niveles en las ciencias físicas y de la vida, así como transferir conocimiento y experticia. Entre las actividades se incluyen experimentos e investigación, administración de proyectos, ciclo de vida del experimento y cátedras relacionadas en ciencias físicas y de la vida (Callens et al., 2021).

En el campo de las artes se observa un creciente interés por su participación en los programas espaciales, no solo como un mecanismo de difusión, sino también como un componente de la investigación que permita una integración con otras disciplinas científicas. Un ejemplo de ello es el trabajo realizado por el Grupo de temas en Artes y Ciencias de la Agencia Espacial Europea (ETTAS: ESA Topical Team Arts and Sciences), en el cual, se da participación periódica a artistas para que en conjunto con científicos de la ESA, desarrollen proyectos artísticos que permitan transmitir otros conceptos de las actividades espaciales, lo cual ha sido socializado en eventos de arte (Pell et al., 2014).

Otros campos que requieren aumento de su sensibilización en la educación son las ciencias sociales que incluyen las ciencias políticas, la política y administración pública, economía, sociología, psicología y antropología; ciencias que permiten la construcción de la sociedad en este caso en un contexto espacial que en el modelo STEAM no se incluye. Así mismo, escasa bibliografía corresponde a política espacial, astro política, astro sociología y economía espacial (Ambrosius, 2023), generando la necesidad de integración de estos campos con cursos relacionados con análisis de datos, habilidades técnicas y competencias personales como pensamiento estratégico, liderazgo, comunicación concisa, negociación y resolución de conflictos los cuales son necesarios para el nuevo ambiente espacial (Luthi et al., 2023)

Los laboratorios espaciales interdisciplinarios en Universidades están en aumento, con el objetivo de familiarizar a los estudiantes con las ciencias espaciales. La Universidad de Oxford, Harvard, King's College London, la Universidad de Western Sydney y la Universidad de Houston, entre otras, son un ejemplo de esta interacción. La Universidad de Western Australia en cooperación con la Universidad de Houston y su centro internacional Sasakawa de Arquitectura espacial en donde estudiantes sin formación previa en ciencias espaciales participan de actividades académicas y de desarrollo tecnológico, al tiempo que adquieren habilidades en Proyectos Basados en Aprendizaje complejos, estos proyectos que fomentan el trabajo en equipo, ofrecen oportunidades futuras en el sector espacial. Así mismo, la arquitectura espacial desarrollada en estos programas está orientada a crear ambientes de

bienestar para los astronautas en misiones de larga duración, abarcando áreas como necesidades básicas, sostenibilidad, materiales, espacio físico, factores psicosociales y salud física y mental (Alexander & Bannova, 2021).

Pese a los esfuerzos de la educación e investigación en STEAM, existen brechas entre el entendimiento público, la educación y los investigadores lo que se refleja en la aceptación social de las actividades espaciales por lo que iniciativas de inmersión en actividades espaciales abiertas al público general es de importancia en el establecimiento de una cultura espacial (Caldwell, 2015; Piila et al., 2021). Así mismo, las facilidades para misiones análogas espaciales permiten el acercamiento con actividades educativas e inmersivas asociadas para el acercamiento a las escuelas y Universidades (Carrière et al., 2022) en conjunto con la gamificación de misiones espaciales (Peng et al., 2017) y el aprendizaje basado en proyectos con la presentación de desafíos abiertos en contextos espaciales en las aulas que pueden ser desarrollados con el apoyo de agencias espaciales (Vincenti, 2022).

5. Ciencias sociales, humanidades y arte en la exploración espacial

La investigación espacial también ha sido partícipe en el desarrollo de nuevos intereses en las ciencias sociales, arte y humanidades debido a la creciente mirada social hacia el espacio lo que ha creado una nueva cultura espacial. Estos intereses nacen de la presencia incremental de tecnologías espaciales en la vida diaria, el crecimiento de la diversidad de actividades humanas en el espacio de la mano con compañías privadas, y la configuración imaginativa del espacio exterior que permita un entendimiento del Universo, influenciado por la astrofísica (Dunnett et al., 2019). Su participación ha contribuido a aspectos legales, de reconocimiento social y educativo a diferentes niveles en desde las primeras misiones, así mismo han generado la creación de repositorios ilustrados y la distribución de contenido académico para los diferentes niveles educativos contribuyendo así a la cultura y economía espacial (Tucker & Alewine, 2024).

Estas disciplinas como la antropología, arqueología, filosofía, ética, sociología, turismo, lenguas, leyes, arquitectura y artes creativas tienen un rol importante en el sector espacial debido a que ofrecen métodos y teorías de cómo la gente acepta, usa e interactúa con la tecnología espacial, sistemas y ambiente espacial, lo que finalmente impacta en una investigación y diseño de misión efectiva, nuevas exploraciones y descubrimientos, desarrollo tecnológico y servicios de entrega y comunicaciones (Tucker & Alewine, 2024).

Se observa un alistamiento de capital y tecnología para el desarrollo de asentamientos humanos y poco atención se ha tenido sobre los sistemas sociales en los cuales las primeras misiones humanas a Marte dan visos de estas necesidades tanto psicológicas como sociales que deben ser considerado, es así como un libro publicado en 2019 por The Mars Society incluye 22 propuestas de como iniciar un asentamiento en Marte con 1000 personas de los cuales el 25 % enfatizan que los aspectos comunitarios deben ser prioridad. En este contexto problemas como la selección, adversa, la cultura, los sistemas de castigo y la sobrecarga pueden ser factores que alteren la dinámica social (Weinersmith et al., 2024).

La astrobioética surge como una necesidad intrínseca a la exploración espacial, constituyéndose en un campo interdisciplinario que integra la astrobiología y la ética de las misiones espaciales. Esta disciplina transdisciplinar se desarrolla a partir de las demandas identificadas en el vasto ámbito de la astrobiología, involucrando a investigadores de diferentes disciplinas. Su objetivo radica en comprender los conceptos que faciliten la exploración de nuevos escenarios espaciales, como Marte, y en la creación de hábitats como así como en el análisis de su impacto sobre la ecología de dichos entornos lo que se enmarca las políticas de protección planetaria (Chon-Torres, 2017).

El concepto de protección planetaria data de 1956 en el contexto del séptimo Congreso de la Federación Astronáutica Internacional en Roma y posteriormente en octubre de 1958 se desarrolla el primer código de conducta de protección planetaria desde el Comité de Investigación Espacial (COSPAR: Committee on Space Research) y actualmente aumenta su importancia por los planes de minería en la Luna los cuales aunque son de beneficio para la humanidad se debe realizar con responsabilidad, lo cual va anclado al concepto del humano como guardián de la vida en el Universo y a la Geoética (Chon-Torres, 2017).

Este contexto de exploración se ha suscitado el desarrollo de nuevas Teorías de Conservación desde las Ciencias Sociales a través del análisis entre el espacio exterior, la ciencia y la tecnología junto a una socialización terrícola en la cual los avances tecnocientíficos juegan un papel importante. La conservación ambiental se teoriza como una “nostalgia anticipatoria”, como una intervención en la producción y como una plataforma para el futuro de la mano con la vida criogénica lo que retorna a la Tierra en una mayor preocupación por actividades que conlleven a la preservación de la vida en nuestro planeta (Kroløkke & Larsen, 2024).

El manejo de la opinión pública y la incertidumbre que generan los programas espaciales es otro campo de acción de las ciencias sociales. Los desarrollos tecnológicos de los programas espaciales, los cuales son derivados de grandes inversiones de capital suelen generar opiniones divididas en la sociedad. Esto se suma a propuestas que contradicen usos restringidos o controlados de ciertos recursos como son la energía nuclear o sistemas de origen nuclear para los sistemas de propulsión necesarios para misiones de espacio profundo entre otros proyectos y propuestas que a lo largo de la historia espacial se han venido presentando (Dufay, 2023).

Este escenario sociopolítico y económico que compromete en algunos casos misiones como la ORION y NERVA en décadas anteriores, resalta la necesidad de que miembros de los equipos de comunicaciones reciban capacitación tanto política como técnica sobre las misiones. Así mismo, es esencial establecer un grupo dedicado a la gestión de la innovación y realizar una reflexión sobre el entorno político que facilite una mejor adaptabilidad administrativa. Esto incluye diversificar las fuentes de financiación de los proyectos espaciales a través de la cooperación interindustrial, lo cual contribuye a madurar el concepto de ecosistema financiero y al surgimiento de empresas en el nuevo espacio o New Space (Dufay, 2023; Ghidini et al., 2023). Además, estas iniciativas deben alinearse con los Objetivos de Desarrollo Sostenible para el 2030, en los que las Naciones Unidas reconocen el potencial de las ciencias espaciales para contribuir, de manera directa e indirecta, a su logro. Esto se logra a través de aportes en datos estadísticos, demográficos y ambientales, así como estrategia para disminuir los índices de pobreza y proveer soluciones en agricultura, aplicaciones en salud, acceso a telecomunicaciones para poblaciones remotas, reducción del riesgo de desastres y crisis humanitarias (Clegg et al., 2024). La manufactura aditiva también juega un papel crucial, no solo mediante la impresión 3D sino también a través de la inclusión de componentes primarios para el cumplimiento de misiones (Ghidini et al., 2023).

Un ejemplo del aporte a la economía y el desarrollo es India, donde la conformación de la Organización India de Investigación Espacial (ISRO) ha propiciado un crecimiento progresivo en la economía local. Se estima que la contribución del 2% a la economía global espacial registrada en 2024 aumentará al 8% para 2033, un crecimiento que implica la consecución de fondos de empresas privadas internacionales a través de startups indias (Deshpande et al., 2024). Esta nueva economía exige que las empresas adopten una responsabilidad corporativa que esté alineada con la legislación pública en el sector. Por lo tanto, es necesario actualizar técnicas y metodologías contables para reducir las barreras en el proceso de adaptación a esta nueva

economía, especialmente en las organizaciones híbridas (Di Tullio et al., 2024). Además, se debe mantener la innovación en el espacio exterior resultado de las cooperaciones público-privadas a través de clústeres de investigación e innovación (Rausser et al., 2023).

La creciente y más detallada entrega de imágenes de la Tierra y del Universo ha permitido que la Geografía enfoque sus esfuerzos en la realización de mapas del espacio exterior y de cuerpos celestes. Los geógrafos humanos modernos tienen en cuenta perspectivas sub-disciplinares que incluyen el compromiso establecido con conceptos de escala y la cultura post-moderna de la posibilidad de una geografía humana extra-terrestre (Dunnnett et al., 2019).

La geografía también se alimenta no solo de la geomorfología planetaria sino también de la ciencia interdisciplinaria como son los nuevos estudios del espacio exterior en el campo de la historia, sociología y antropología que permite a los geógrafos humanos realizar el giro hacia el espacio que motiva el entusiasmo en los habitantes de la Tierra. Esta situación también es evaluada por los geógrafos laborales y económicos que estudian como la industria espacial cambia los sectores productivos y los recursos que influyen en esta dinámica de la nueva economía espacial; así como por la geografía ambiental que mapea la polución y recursos naturales del espacio exterior (Dunnnett et al., 2019).

Las ciencias políticas también han evolucionado desde el lanzamiento del satélite Sputnik I en 1957, el cual generó preguntas tanto materiales como hipotéticas sobre la legislación y políticas espaciales. Esto desencadenó debates académicos y legales alrededor de la regulación espacial y gobernanza, así como sobre las implicaciones políticas y de seguridad de las actividades espaciales. En la actualidad, la política espacial ha migrado de un contexto de Guerra Fría a un entrono caracterizado por la dinámica de seguridad multipolar, la democratización y la polarización, en conjunto con una economía espacial emergente que incluye la participación de nuevos actores no tradicionales. Además, se han incorporado análisis cuantitativos provenientes de la estadística aplicada y las ciencias sociales computacionales, lo que permite reflexionar sobre el estado actual y considerar nuevos rumbos y campos en el estudio de la política espacial (Pomeroy, 2019).

De igual manera, las ciencias políticas enfrentan desafíos ante los nuevos tipos de relaciones espaciales que condicionan los desarrollos y economía derivada de los mismos, sin contar con la constante preocupación por la delimitación del aeroespacio y el espacio exterior en una constante determinación de independencia de algunos estados en el marco del establecimiento de límites

y la oposición de la comunidad internacional a los mismos (Apakhayev et al., 2018). Así como se ha enfrentado a nuevos escenarios de diplomacia como el generado por la construcción de la ISS y a futuro por el nuevo ecosistema espacial (Davis Cross & Pekkanen, 2023); sin contar los desafíos en política pública que permitan la regulación de relaciones sociales y de administración pública y privada que permita la creación de estrategias para alcances de objetivos públicos (Iryna et al., 2020).

Otro desafío legal y económico que se enfrenta son los sistemas de certificación de aplicaciones espaciales, las regulaciones en propiedad intelectual para que los desarrolladores puedan recibir frutos de las ganancias derivadas de sus innovaciones, regulaciones para la ubicación de nuevas bandas de frecuencia, así como las regulaciones necesarias para el uso y comercialización de los productos derivados de la minería espacial (Karski & Myszone-Kostrzewa, 2020).

Direcciones Futuras

El sector espacial está en plena expansión, con un fuerte desarrollo del turismo espacial y de plataformas para la investigación científica. Se proyectan estaciones en órbita baja y bases en la Luna lo que permitirá el envío de cargas biológicas y estudios celulares sobre los vuelos tripulados (Afshinnekoo et al., 2020). La Estación Espacial Internacional (ISS) sigue siendo un laboratorio crucial, aunque su futuro se reevalúa constantemente.

Desde 2003, China han avanzado con la estación espacial Tiangong, mientras que India ha logrado aterrizar un Rover en el Polo sur de la Luna. La llegada de empresas privadas como Space X y Blue Origin ha transformado los sistemas de lanzamiento y aterrizaje, así como el desarrollo de aplicaciones espaciales innovadoras (Kua et al., 2021).

La exploración del espacio especialmente hacia la Luna y Marte se vislumbra como objetivo alcanzable en el próximo siglo. Los motivos para esta exploración incluyen incentivos económicos y la posibilidad de establecer asentamientos espaciales (Szocik et al., 2021) arcan aspectos éticos, legales y médicos, que requieren atención cuidadosa (Tucker & Alewine, 2023).

La colonización de nuevos ambientes espaciales suscita dilemas éticos, incluyendo temas sobre mejoras genéticas y su reversibilidad. En este contexto, la astrobioética se vuelve fundamental para abordar estos temas,

especialmente en relación con los riesgos para la salud humana en el espacio, como la radiación y las posibles alteraciones reproductivas en las cuales la bioingeniería y la biología sintética tienen una creciente participación (Menezes et al., 2015; Szocik et al., 2021).

El programa *Artemis*, lanzado en 2022, marca el comienzo de una nueva era para la presencia humana en la Luna y, eventualmente en Marte. Este esfuerzo interdisciplinario de antropólogos, anatomistas, fisiólogos, especialistas en salud pública, endocrinología, genética entre otros, busca predecir las condiciones de asentamientos humanos en otros cuerpos celestes y sus repercusiones a nivel de evolución biológica, social, histórica y ambiental (Sarma & Shelhamer, 2024).

La biología espacial se centra en como los organismos responden a los estresores del ambiente espacial, lo que es crucial para el desarrollo de soluciones de bioingeniería y de aplicaciones de inteligencia artificial. (Sanders et al., 2023). De la mano, la economía espacial se encuentra en continua transformación, con nuevas cadenas de suministro y procesos de manufactura que enfrentan los retos logísticos y financieros más allá de la órbita terrestre baja (Snyder et al., 2019). Esta economía espacial se acompaña de aspectos sociales y políticos dentro del concepto de “La Era del Nuevo espacio en el cual entidades gubernamentales y agencias deben coordinar objetivos complejos. (Tucker & Alewine, 2023).

En este contexto, se requiere un crecimiento en la diplomacia y legislación espacial para fomentar la cooperación entre diversos actores y abordar posibles conflictos (Davis Cross & Pekkanen, 2023). La sostenibilidad en la economía espacial actual se basa en la utilización de recursos del sistema solar, lo que requiere un enfoque estratégico para el desarrollo de infraestructura que soporte actividades comerciales en el espacio y que permita también proveer de plataformas de investigación básica para universidades y centros de investigación y desarrollo (Crawford, 2016; Chavy-Macdonald et al., 2021).

La Luna se visualiza como una nueva Arca en la cual múltiples disciplinas tienen participación y varias de las cuales gracias a las observaciones realizadas con orbitadores lunares, sondas y rovers ha permitido reconocer características de la Luna no vistas con anterioridad, así como determinar fuentes de materiales de importancia para la sostenibilidad de la vida en la Tierra (Kroløkke & Larsen, 2024). Alrededor de este gran objetivo, también se diseña una dinámica de sistemas basada en negocios y planeamiento político,

y administración de los recursos lunares, así como conceptos de arquitectura y logística espacial (Chavy-Macdonald et al., 2021).

Conclusiones

La sinergia interdisciplinaria es esencial para la Exploración espacial, en el cual la convergencia de las ciencias básicas y aplicadas es esencial para el éxito de las misiones espaciales. Esta interrelación no solo permite el desarrollo de tecnologías innovadoras, sino que también mejora la eficacia de las operaciones en un entorno de microgravedad, donde los riesgos para la salud de los tripulantes son significativamente elevados.

Uno de los grandes impactos de la exploración espacial son los estudios biomédicos en salud humana, el cual continúa presentando avances significativos en tecnología médica y tratamientos que benefician a los astronautas en mejoras en la atención médica en la Tierra impactando en la salud pública.

La preparación para el futuro de la colonización espacial se encuentra en aumento, a medida que se acerca la posibilidad de establecer asentamientos humanos en la Luna y Marte, se hace imperativo abordar los desafíos éticos y de salud que surgen. La astrobioética debe jugar un papel central en la planificación de estas misiones, garantizando que las mejoras genéticas y las intervenciones médicas sean seguras y moralmente aceptables, así como sostenibles en el entorno espacial.

La creación de una cultura espacial en países emergentes como Colombia es crucial para el avance en el sector espacial. Fomentar programas educativos interdisciplinarios que integren ciencias biomédicas, ingeniería y humanidades no sólo prepara a los futuros líderes del espacio, sino que también genera un ecosistema robusto a nivel nacional y regional que puede competir a nivel global.

La exploración espacial presenta oportunidades únicas para el desarrollo de sistemas de biomanufactura que pueden ser aplicados tanto en el espacio como en la Tierra. La capacidad de producir alimentos y aire respirable en entornos extraterrestres es vital para la supervivencia de los astronautas y ofrece soluciones para poblaciones en situaciones de crisis en la Tierra, promoviendo así un enfoque sostenible y resiliente en la ciencia espacial.

Finalmente, la exploración espacial no solo es un desafío científico y tecnológico, sino que también requiere un enfoque humanístico y diplomático. La integración de las humanidades en la investigación espacial es esencial para comprender las implicaciones culturales, éticas y sociales de nuestra presencia en otros cuerpos celestes. Además, la diplomacia espacial se convierte en un pilar fundamental para fomentar la cooperación internacional, gestionar conflictos y establecer normas que regulen la explotación de recursos en el espacio. Este enfoque integral promueve un desarrollo más equitativo y sostenible de la exploración espacial, garantizando que la humanidad actúe como un guardián responsable del espacio, respetando tanto el patrimonio cósmico como las diversas perspectivas culturales que surjan de esta nueva era. La colaboración entre naciones, apoyada por un entendimiento profundo de las humanidades, permitirá construir un futuro espacial que beneficie a toda la humanidad.

Referencias bibliográficas

- Abdulrahman, Y., Arnautovic, E., Parezanovic, V., & Svetinovic, D. (2023). AI and Blockchain Synergy in Aerospace Engineering: An Impact Survey on Operational Efficiency and Technological Challenges. *IEEE Access*, 11, 87790–87804. Scopus. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3305325>
- Abrahamsson, V., & Kanik, I. (2022). In situ organic biosignature detection techniques for space applications. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 9. Scopus. <https://doi.org/10.3389/fspas.2022.959670>
- Afshinnikoo, E., Scott, R. T., MacKay, M. J., Pariset, E., Cekanaviciute, E., Barker, R., Gilroy, S., Hassane, D., Smith, S. M., Zwart, S. R., Nelson-Gonzalez, M., Crucian, B. E., Ponomarev, S. A., Orlov, O. I., Shiba, D., Muratani, M., Yamamoto, M., Richards, S. E., Vaishampayan, P. A., ... Beheshti, A. (2020). Fundamental Biological Features of Spaceflight: Advancing the Field to Enable Deep-Space Exploration. *Cell*, 183(5), 1162–1184. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2020.10.050>
- Alexander, S., & Bannova, O. (2021). University based interdisciplinary space lab: Designing for astronaut health and wellbeing. *Acta Astronautica*, 186, 382–395. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2021.05.043>

- Alvarez, E. B., Eaton, H. A., Carpenter, M. S., Carkhuff, B. G., & Bernasconi, P. N. (2023). APL's Contributions to Stratospheric Ballooning for Space Science. *Johns Hopkins APL Technical Digest (Applied Physics Laboratory)*, 36(4), 363–380. Scopus.
- Alwood, J. S., Ronca, A. E., Mains, R. C., Shelhamer, M. J., Smith, J. D., & Goodwin, T. J. (2017). From the bench to exploration medicine: NASA life sciences translational research for human exploration and habitation missions. *Npj Microgravity*, 3(1). Scopus. <https://doi.org/10.1038/s41526-016-0002-8>
- Ambrosius, J. D. (2023). Toward a Spacefaring Society: Enhancing Undergraduate General Education and Learning Outcomes with Space Policy Course Themes. *Space Policy*, 65. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.spacepol.2022.101535>
- Apakhayev, N., Omarova, A. B., Kussainov, S., Nurahmetova, G. G., Buri-bayev, Y. A., Khamzina, Z. A., Kuandykov, B., Tlepina, S. V., & Kala, N. S. (2018). Review on the outer space legislation: Problems and prospects. *Statute Law Review*, 39(3), 258–265. Scopus. <https://doi.org/10.1093/slr/hmx010>
- Asner, G. R., & Garber, S. J. (2018). *Origins of 21st-century space travel: A history of NASA's decadal planning team and the vision for space exploration, 1999-2004*. National Aeronautics and Space Administration. https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2019/05/origins_of_21st_century-tagged.pdf
- Beheshti, A., Miller, J., Kidane, Y., Berrios, D., Gebre, S. G., & Costes, S. V. (2018). NASA GeneLab Project: Bridging Space Radiation Omics with Ground Studies. *Radiation Research*, 189(6), 553–559. Scopus. <https://doi.org/10.1667/RR15062.1>
- Berliner, A. J., Hilzinger, J. M., Abel, A. J., McNulty, M. J., Makrygiorgos, G., Aversch, N. J. H., Sen Gupta, S., Benvenuti, A., Caddell, D. F., Cestellos-Blanco, S., Doloman, A., Friedline, S., Ho, D., Gu, W., Hill, A., Kusuma, P., Lipsky, I., Mirkovic, M., Luis Meraz, J., ... Arkin, A. P. (2021). Towards a Biomanufactory on Mars. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 8. Scopus. <https://doi.org/10.3389/fspas.2021.711550>
- Bizzarri, M., Fedeli, V., Piombarolo, A., & Angeloni, A. (2022). Space Biomedicine: A Unique Opportunity to Rethink the Relationships between

- en Physics and Biology. *Biomedicines*, 10(10). Scopus. <https://doi.org/10.3390/biomedicines10102633>
- Borowitz, M. (2024). Teaching social science aspects of space: A transdisciplinary approach. *Space Policy*, 67. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.spacepol.2023.101591>
- Caldwell, B. S. (2015). Spaceflight-relevant stem education and outreach: Social goals and priorities. *Acta Astronautica*, 112, 174–181. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2015.03.017>
- Callens, N., Carvil, P., Van Walleghe, M., & González-Cinca, R. (2021). ESA/ELGRA Gravity-Related Research Summer School: An Introduction to Microgravity and Hypergravity Research for University Students. *Microgravity Science and Technology*, 33(1). Scopus. <https://doi.org/10.1007/s12217-020-09849-1>
- Carrière, C., Pahud, K., & Gass, V. (2022). Use of space analog missions as an educational tool in primary schools. *Acta Astronautica*, 200, 562–573. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.07.042>
- Cassaro, A., Pacelli, C., Baqué, M., Cavalazzi, B., Gasparotto, G., Saladino, R., Botta, L., Böttger, U., Rabbow, E., de Vera, J.-P., & Onofri, S. (2022). Investigation of fungal biomolecules after Low Earth Orbit exposure: A testbed for the next Moon missions. *Environmental Microbiology*, 24(7), 2938–2950. Scopus. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.15995>
- Chavy-Macdonald, M.-A., Oizumi, K., Kneib, J.-P., & Aoyama, K. (2021). The cis-lunar ecosystem—A systems model and scenarios of the resource industry and its impact. *Acta Astronautica*, 188, 545–558. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2021.06.017>
- Chon-Torres, O. A. (2017). Astrobioethics. *International Journal of Astrobiology*, 17(1), 51–56. Scopus. <https://doi.org/10.1017/S1473550417000064>
- Choukér, A., Ngo-Anh, T. J., Biesbroek, R., Heldmaier, G., Heppener, M., & Bereiter-Hahn, J. (2021). European space agency's hibernation (torpor) strategy for deep space missions: Linking biology to engineering. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 131, 618–626. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2021.09.054>

- Clegg, S. R., Cunha, M. P. E., López, A., Sirage, E., & Rego, A. (2024). Tackling sustainable development goals through new space. *Project Leadership and Society*, 5. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.plas.2023.100107>
- Crawford, I. A. (2016). The long-term scientific benefits of a space economy. *Space Policy*, 37, 58–61. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.space-pol.2016.07.003>
- Criscuolo, F., Sueur, C., & Bergouignan, A. (2020). Human Adaptation to Deep Space Environment: An Evolutionary Perspective of the Foreseen Interplanetary Exploration. *Frontiers in Public Health*, 8. Scopus. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.00119>
- Davis Cross, M. K., & Pekkanen, S. M. (2023). Introduction. Space Diplomacy: The Final Frontier of Theory and Practice. *The Hague Journal of Diplomacy*, 18(2–3), 193–217. Scopus. <https://doi.org/10.1163/1871191x-bja10152>
- De Micco, V., Aronne, G., Caplin, N., Carnero-Diaz, E., Herranz, R., Horemans, N., Legué, V., Medina, F. J., Pereda-Loth, V., Schiefloe, M., De Francesco, S., Izzo, L. G., Le Disquet, I., & Kittang Jost, A.-I. (2023). Perspectives for plant biology in space and analogue environments. *Npj Microgravity*, 9(1). Scopus. <https://doi.org/10.1038/s41526-023-00315-x>
- De Pascale, S., Arena, C., Aronne, G., De Micco, V., Pannico, A., Paradiso, R., & Rouphael, Y. (2021). Biology and crop production in Space environments: Challenges and opportunities. *Life Sciences in Space Research*, 29, 30–37. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2021.02.005>
- Deshpande, D., Palit, S., & Hazra, S. (2024). Propelling Indian economy through space exploration and applications. *Current Science*, 127(1), 17–19. Scopus.
- Di Tullio, P., La Torre, M., Rea, M. A., Guthrie, J., & Dumay, J. (2024). Beyond the planetary boundaries: Exploring pluralistic accountability in the new space age. *Accounting, Auditing and Accountability Journal*, 37(5), 1283–1311. Scopus. <https://doi.org/10.1108/AAAJ-08-2022-6003>

- Dufay, A. (2023). Historical lessons of the Orion and NERVA projects: Managing public opinion and political uncertainty in space programs. *Acta Astronautica*, 211, 664–673. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2023.06.044>
- Dunnett, O., Maclaren, A. S., Klinger, J., Lane, K. M. D., & Sage, D. (2019). Geographies of outer space: Progress and new opportunities. *Progress in Human Geography*, 43(2), 314–336. Scopus. <https://doi.org/10.1177/0309132517747727>
- Erickson, L. K. (2010). *Space flight: History, technology, and operations* / Lance K. Erickson. Government Institutes.
- Evetts, S. N. (2014). Space life and biomedical sciences in support of the global exploration roadmap and societal development. *Space Policy*, 30(3), 143–145. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.spacepol.2014.08.001>
- Ferranti, F., Bianco, M. D., & Pacelli, C. (2021). Advantages and limitations of current microgravity platforms for space biology research. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(1), 1–18. Scopus. <https://doi.org/10.3390/app11010068>
- Ferraro, S., Dave, A., Cereda, C., Verduci, E., Marcovina, S., & Zuccotti, G. (2024). Space research to explore novel biochemical insights on Earth. *Clinica Chimica Acta*, 558. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.cca.2024.119673>
- Filho, P., & Bezerra, J. (2021). Space Age: Past, Present and Possible Futures. *Journal of Aerospace Technology and Management*, 13, e3421. <https://doi.org/10.1590/jatm.v13.1226>
- Furukawa, S., Nagamatsu, A., Neno, M., Fujimori, A., Kakinuma, S., Katsube, T., Wang, B., Tsuruoka, C., Shirai, T., Nakamura, A. J., Sakaue-Sawano, A., Miyawaki, A., Harada, H., Kobayashi, M., Kobayashi, J., Kunieda, T., Funayama, T., Suzuki, M., Miyamoto, T., ... Takahashi, A. (2020). Space Radiation Biology for “Living in Space”. *BioMed Research International*, 2020. Scopus. <https://doi.org/10.1155/2020/4703286>
- Gao, Y., & Chien, S. (2017). Review on space robotics: Toward top-level science through space exploration. *Science Robotics*, 2(7). Scopus. <https://doi.org/10.1126/scirobotics.aan5074>

- Gelis-Filho, A. (2024). Is there a universal limit to technological development? Evidences from astrobiology. *Futures*, 159. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2024.103379>
- Ghidini, T., Grasso, M., Gumpinger, J., Makaya, A., & Colosimo, B. M. (2023). Additive manufacturing in the new space economy: Current achievements and future perspectives. *Progress in Aerospace Sciences*, 142. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2023.100959>
- Green, J. L. (2024). Space travel across the decades and beyond: A brief history of NASA's space programme. *Journal of Physics: Conference Series*, 2877(1), 012046. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2877/1/012046>
- Grigor'ev, A. I., Orlov, O. I., & Baranov, V. M. (2021). Space Medicine: Scientific Foundations, Achievements, and Challenges. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 91(6), 626–629. Scopus. <https://doi.org/10.1134/S1019331621060022>
- Grimm, D., Wehland, M., Pietsch, J., Aleshcheva, G., Wise, P., Van Loon, J., Ulbrich, C., Magnusson, N. E., Infanger, M., & Bauer, J. (2014). Growing tissues in real and simulated microgravity: New methods for tissue engineering. *Tissue Engineering - Part B: Reviews*, 20(6), 555–566. Scopus. <https://doi.org/10.1089/ten.teb.2013.0704>
- Hao, Y., Lu, L., Liu, A., Lin, X., Xiao, L., Kong, X., Li, K., Liang, F., Xiong, J., Qu, L., Li, Y., & Li, J. (2022). Integrating bioinformatic strategies in spatial life science research. *Briefings in Bioinformatics*, 23(6). Scopus. <https://doi.org/10.1093/bib/bbac415>
- Iryna, L., Larysa, S., Larysa, K., Konstyantyn, B., & Viktoriia, T. (2020). PUBLIC POLICY AND SPACE ACTIVITIES: CONCEPTUAL APPROACHES. *Journal of Legal, Ethical and Regulatory Issues*, 23(2), 1–9. Scopus.
- Jit, B. P., Pattnaik, S., Arya, R., Dash, R., Sahoo, S. S., Pradhan, B., Bhuyan, P. P., Behera, P. K., Jena, M., Sharma, A., Agrawala, P. K., & Behera, R. K. (2022). Phytochemicals: A potential next generation agent for radioprotection. *Phytomedicine*, 106. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.phymed.2022.154188>
- Karski, K. A., & Myszone-Kostrzewa, K. (2020). Space activities: Economic and legal aspects. *Finance India*, 34(1), 59–74. Scopus.

- Khan, J., & Singh, P. (2024). Review on phase change materials for spacecraft avionics thermal management. *Journal of Energy Storage*, 87. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111369>
- Klomchitcharoen, S., Wechakarn, P., Tangwattanasirikun, T., Smerwong, N., Netraphathompornkij, P., Chatmeeboon, T., Nangsue, N., Thitasirivit, V., Kaweewongsunthorn, K., Piyanopharoj, S., Phumiprathet, P., & Wongsawat, Y. (2024). High-altitude balloon platform for studying the biological response of living organisms exposed to near-space environments. *Heliyon*, 10(6). Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27406>
- Kordyum, E., & Hasenstein, K. H. (2021). Plant biology for space exploration – Building on the past, preparing for the future. *Life Sciences in Space Research*, 29, 1–7. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2021.01.003>
- Krakos, A. (2024). Lab-on-chip technologies for space research—Current trends and prospects. *Microchimica Acta*, 191(1). Scopus. <https://doi.org/10.1007/s00604-023-06084-4>
- Kroløkke, C., & Larsen, J. H. (2024). Saved by the Moon: Imaginaries of Earthly Afterlife in Space. *Science Technology and Human Values*. Scopus. <https://doi.org/10.1177/01622439241255733>
- Kua, J., Loke, S. W., Arora, C., Fernando, N., & Ranaweera, C. (2021). Internet of things in space: A review of opportunities and challenges from satellite-aided computing to digitally-enhanced space living. *Sensors*, 21(23). Scopus. <https://doi.org/10.3390/s21238117>
- Li, W.-J., Cheng, D.-Y., Liu, X.-G., Wang, Y.-B., Shi, W.-H., Tang, Z.-X., Gao, F., Zeng, F.-M., Chai, H.-Y., Luo, W.-B., Cong, Q., & Gao, Z.-L. (2019). On-orbit service (OOS) of spacecraft: A review of engineering developments. *Progress in Aerospace Sciences*, 108, 32–120. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2019.01.004>
- Lopez-Cortes, O. D., Betancourt-Núñez, A., Bernal Orozco, M. F., Vizmanos, B., Lopez-Cortes, O. D., Betancourt-Núñez, A., Bernal Orozco, M. F., & Vizmanos, B. (2022). Scoping reviews: Una nueva forma de síntesis de la evidencia. *Investigación en educación médica*, 11(44), 98–104. <https://doi.org/10.22201/fm.20075057e.2022.44.22447>
- Lucey, P. G., Petro, N., Hurley, D. M., Farrell, W. M., Prem, P., Costello, E. S., Cable, M. L., Barker, M. K., Benna, M., Dyar, M. D., Fisher, E. A., Green, R. O., Hayne, P. O., Hibbitts, K., Honniball, C., Li, S.,

- Malaret, E., Mandt, K., Mazarico, E., ... Orlando, T. (2022). Volatile interactions with the lunar surface. *Geochemistry*, 82(3). Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2021.125858>
- Luthi, K. T., Aldrin, A., Wilson, K., & Solti, J. P. (2023). Future Directions of Space Education. *International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace*, 10(3), 1–16. Scopus. <https://doi.org/10.58940/2374-6793.1825>
- Maiwald, V., Kyunghwan, K., Vrakking, V., & Zeidler, C. (2023). From Antarctic prototype to ground test demonstrator for a lunar greenhouse. *Acta Astronautica*, 212, 246–260. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2023.08.012>
- Marov, M. (2024). Soviet/Russian planetary exploration: Historical highlights. *Journal of Physics: Conference Series*, 2877(1), 012048. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2877/1/012048>
- Mehta, P., & Bhayani, D. (2017). Impact of space environment on stability of medicines: Challenges and prospects. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 136, 111–119. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.jpba.2016.12.040>
- Menezes, A. A., Montague, M. G., Cumbers, J., Hogan, J. A., & Arkin, A. P. (2015). Grand challenges in space synthetic biology. *Journal of the Royal Society Interface*, 12(113). Scopus. <https://doi.org/10.1098/rsif.2015.0803>
- Metzger, P. T. (2016). Space development and space science together, an historic opportunity. *Space Policy*, 37, 77–91. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.spacepol.2016.08.004>
- Meurer, J. C., Haqq-Misra, J., & Mendonça, M. D. S. (2023). Astroecology: Bridging the gap between ecology and astrobiology. *International Journal of Astrobiology*, 23. Scopus. <https://doi.org/10.1017/S1473550423000265>
- Mian, A., & Mian, M. A. (2023). Space Medicine: Inspiring a new generation of physicians. *Postgraduate Medical Journal*, 99(1173), 763–776. Scopus. <https://doi.org/10.1136/pmj-2022-141875>
- Morgan, M. F., Diab, J., Gilliam, M., & Mortimer, J. C. (2024). Green horizons: How plant synthetic biology can enable space exploration and drive on Earth sustainability. *Current Opinion in Biotechnology*, 86. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2024.103069>

- Padgen, M. R., Liddell, L. C., Bhardwaj, S. R., Gentry, D., Marina, D., Parra, M., Boone, T., Tan, M., Ellingson, L., Rademacher, A., Benton, J., Schooley, A., Mousavi, A., Friedericks, C., Hanel, R. P., Ricco, A. J., Bhattacharya, S., & Santa Maria, S. R. (2023). BioSentinel: A Biofluidic Nanosatellite Monitoring Microbial Growth and Activity in Deep Space. *Astrobiology*, 23(6), 637–647. Scopus. <https://doi.org/10.1089/ast.2020.2305>
- Pavez Loriè, E., Baatout, S., Choukér, A., Buchheim, J.-I., Baselet, B., Delo Russo, C., Wotring, V., Monici, M., Morbidelli, L., Gagliardi, D., Stingl, J. C., Surdo, L., & Yip, V. L. M. (2021). The Future of Personalized Medicine in Space: From Observations to Countermeasures. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 9. Scopus. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.739747>
- Pell, S. J., Imhof, A. B., Waldvogel, C., Kotler, J. M., & Peljhan, M. (2014). Towards a cooperation between the arts, space science research and the European Space Agency—Preliminary findings of the ESA Topical Team Arts and Sciences (ETTAS). *Acta Astronautica*, 105(1), 181–191. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2014.08.015>
- Peng, C., Cao, L., & Timalsena, S. (2017). Gamification of Apollo lunar exploration missions for learning engagement. *Entertainment Computing*, 19, 53–64. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.entcom.2016.12.001>
- Piila, E., Salmi, H., & Thuneberg, H. (2021). Steam-learning to mars: Students' ideas of space research. *Education Sciences*, 11(3). Scopus. <https://doi.org/10.3390/educsci11030122>
- Pomeroy, C. (2019). The Quantitative Analysis of Space Policy: A Review of Current Methods and Future Directions. *Space Policy*, 48, 14–29. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.spacepol.2018.08.001>
- Rausser, G., Choi, E., & Bayen, A. (2023). Public–private partnerships in fostering outer space innovations. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 120(43). Scopus. <https://doi.org/10.1073/pnas.2222013120>
- Rivera, M. V., Vargas, M., Cornejo, J., Plascencia, P. V., Guillen, K., Maquera, E., Cornejo, J., Russomano, T., & Cinelli, I. (2024). Space Nursing for the Future Management of Astronaut Health in other Planets: A Literature Review. *Open Nursing Journal*, 18. Scopus. <https://doi.org/10.2174/0118744346289848240328074640>

- Robertson, J. M., Dias, R. D., Gupta, A., Marshburn, T., Lipsitz, S. R., Pozner, C. N., Doyle, T. E., Smink, D. S., Musson, D. M., & Yule, S. (2020). Medical Event Management for Future Deep Space Exploration Missions to Mars. *Journal of Surgical Research*, 246, 305–314. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2019.09.065>
- Sanders, L. M., Scott, R. T., Yang, J. H., Qutub, A. A., Garcia Martin, H., Berrios, D. C., Hastings, J. J. A., Rask, J., Mackintosh, G., Hoarfrost, A. L., Chalk, S., Kalantari, J., Khezeli, K., Antonsen, E. L., Babdor, J., Barker, R., Baranzini, S. E., Beheshti, A., Delgado-Aparicio, G. M., ... Costes, S. V. (2023). Biological research and self-driving labs in deep space supported by artificial intelligence. *Nature Machine Intelligence*, 5(3), 208–219. Scopus. <https://doi.org/10.1038/s42256-023-00618-4>
- Sarma, M. S., & Shelhamer, M. (2024). The human biology of spaceflight. *American Journal of Human Biology*, 36(3). Scopus. <https://doi.org/10.1002/ajhb.24048>
- Schatz, H., Becerril Reyes, A. D., Best, A., Brown, E. F., Chatziioannou, K., Chippis, K. A., Deibel, C. M., Ezzeddine, R., Galloway, D. K., Hansen, C. J., Herwig, F., Ji, A. P., Lugaro, M., Meisel, Z., Norman, D., Read, J. S., Roberts, L. F., Spyrou, A., Tews, I., ... Zingale, M. (2022). Horizons: Nuclear astrophysics in the 2020s and beyond. *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, 49(11). Scopus. <https://doi.org/10.1088/1361-6471/ac8890>
- Singh, V. K., & Seed, T. M. (2022). Armed Forces Radiobiology Research Institute/Uniformed Services University of the Health Sciences perspective on space radiation countermeasure discovery. *Life Sciences in Space Research*, 35, 20–29. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2022.09.004>
- Snyder, J. E., Walsh, D., Carr, P. A., & Rothschild, L. J. (2019). A Makerspace for Life Support Systems in Space. *Trends in Biotechnology*, 37(11), 1164–1174. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2019.05.003>
- Szocik, K., Shelhamer, M., Braddock, M., Cucinotta, F. A., Impey, C., Worden, P., Peters, T., Ćirković, M. M., Smith, K. C., Tachibana, K., Reiss, M. J., Norman, Z., Gouw, A. M., & Munévar, G. (2021). Future space missions and human enhancement: Medical and ethical challenges. *Futures*, 133. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2021.102819>

- Tucker, B. P., & Alewine, H. C. (2023). Everybody's Business to Know About Space: Cross-Disciplinarity and the Challenges of the New Space Age. *Space Policy*, 66. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.spacepol.2023.101573>
- Tucker, B. P., & Alewine, H. C. (2024). Solutions Looking for Problems? How Humanities, Arts, and Social Sciences can Inform the Space Sector. *Space Policy*, 67. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.spacepol.2023.101595>
- Vandenbrink, J. P., & Kiss, J. Z. (2016). Space, the final frontier: A critical review of recent experiments performed in microgravity. *Plant Science*, 243, 115–119. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2015.11.004>
- Vincenti, G. (2022). Integrating Open Challenges in the Curriculum: Lessons Learned from an Experience with NASA. *Informatics in Education*, 21(4), 695–731. Scopus. <https://doi.org/10.15388/infedu.2022.29>
- Wang, S., Wang, J., Zeng, X., Wang, T., Yu, Z., Wei, Y., Cai, M., Zhuoma, D., Chu, X.-Y., Chen, Y. Z., & Zhao, Y. (2023). Database of space life investigations and information on spaceflight plant biology. *Planta*, 258(3). Scopus. <https://doi.org/10.1007/s00425-023-04213-0>
- Weinersmith, K. L., Weinersmith, Z. A., Abramitzky, R., & Lehr, J. (2024). To Each According to Their Space-Need: Communes in Outer Space. *Space Policy*, 67. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.spacepol.2023.101592>

CAPÍTULO 2.

I+D+i Para el Desarrollo Espacial^{4*}

TC. German Wedge Rodríguez Pirateque⁵

TC. Guillermo Alfonso Giraldo Martínez⁶

TC. Leidy Diana Girón Hernández⁷

Fuerza Aeroespacial Colombiana

Resumen: El presente capítulo analiza el contexto del sector espacial como un campo estratégico para la seguridad, la innovación y el desarrollo económico de los Estados; en este escenario, potencias como Estados Unidos, Rusia y China consolidaron el espacio como ámbito de competencia geopolítica y tecnológica, mientras que en América Latina países como Brasil y Argentina fortalecieron sus capacidades mediante políticas sostenidas; en contraste, Colombia presenta un rezago que limita su protagonismo en la economía

^{4*} Capítulo de libro resultado del proyecto de investigación “Desarrollo Espacial en Colombia y aportes de la Fuerza Aeroespacial Colombiana”, del grupo de investigación “GICMA” de la Fuerza Aeroespacial Colombiana, categorizado en A por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (Minciencias) y registrado con el código COL140489. Los puntos de vista y los resultados de este capítulo pertenecen a los autores y no reflejan necesariamente los de las instituciones participantes.

⁵ Teniente Coronel de la Fuerza Aeroespacial Colombiana. Doctor en Ingeniería Mecánica y Mecatrónica, Universidad Nacional de Colombia. Magíster en Ingeniería Mecatrónica, Universidad Militar Nueva Granada, Especialista en Gerencia Educativa, Universidad de la Sabana, Ingeniero Electrónico, Universidad Los Libertadores, Licenciado en Diseño Tecnológico, Universidad Pedagógica Nacional, Colombia. Código ORCID: 0000-0002-8617-0558. Contacto: german.rodriguez@fac.mil.co.

⁶ Teniente Coronel de la Fuerza Aeroespacial Colombiana. PhD en Gestión Tecnológica e Innovación de la Universidad Autónoma de Querétaro. Magíster en Administración de Negocios del Prime Business School de la Universidad Sergio Arboleda, Administrador Aeronáutico de Escuela Militar de Aviación. Se ha desempeñado como subdirector de transferencia de tecnología y especialista operacional estructuración y seguimiento programas de ciencia tecnología e innovación de la FAC. Código ORCID: 0000-0002-0788-9151. Contacto: guillermo.giraldo@fac.mil.co.

⁷ Teniente Coronel de la Fuerza Aeroespacial Colombiana. Postdoctora en Pensamiento Complejo con mención en Pensamiento Complejo en la Formación Castrense de la Universidad Multiversidad Mundo Real Edgar Morin de México, Doctora en Ciencias de la Educación de la Universidad Cuauhtémoc México. Magíster en Educación con énfasis en evaluación y gestión de la Universidad Externado de Colombia, especialista en gerencias de proyectos educativos de la Universidad Cooperativa de Colombia, docencia universitaria de la Universidad Cooperativa de Colombia, legislación Educativa de la Universidad Autónoma de Colombia Licenciada en Educación Preescolar de la Universidad Incca de Colombia. Código ORCID: 0000-0001-8960-5548. Contacto: leidy.giron@fac.mil.co.

espacial. El problema central identificado fue la ausencia de una estrategia nacional sólida que articulara la ciencia, la tecnología y la innovación (CTeI) con los intereses de defensa y desarrollo, lo que, sumado a la baja inversión en investigación, la fragmentación institucional y la falta de programas de largo plazo, reforza la brecha frente a los países líderes. El propósito del estudio fue diseñar un marco estratégico que fortaleciera la soberanía tecnológica de Colombia y orientara a la Fuerza Aeroespacial en la construcción de ventajas competitivas. Para lo cual, la metodología se estructuró en dos fases complementarias: en la primera se caracterizaron tendencias globales, regionales y nacionales, identificando brechas en inversión, capacidades científicas, infraestructura y coordinación interinstitucional; en la segunda se generaron estrategias mediante el uso de herramientas prospectivas y el análisis morfológico, que permitieron diseñar el Hexágono Estratégico de CTeI, integrado por seis ejes: reingeniería organizacional, programas estratégicos, talento humano, coordinación de capacidades, cooperación internacional y producción tecnológica. Los resultados combinaron diagnóstico y propuestas, ofreciendo así una hoja de ruta para fortalecer el sector espacial colombiano en defensa, economía y ciencia. Finalmente, el estudio planteó como retos para futuros investigadores la atención a la ciberseguridad espacial, la gestión de desechos orbitales, la integración de sistemas de constelaciones con servicios duales y la formulación de marcos regulatorios que posibiliten la inserción de Colombia en la gobernanza espacial global con mayor solidez.

Palabras clave: Ciencia, Tecnología e Innovación (CTeI), Desarrollo espacial, Sector espacial, capacidades espaciales, estrategia, reingeniería.

Introducción

El resultado del trabajo en Investigación, Desarrollo e Innovación (I+D+i), como base del Sistema de Ciencia Tecnología e Innovación de la Fuerza Aérea Colombiana (SCTeI) (DICTI, 2018), busca impactar de manera positiva y propositiva sobre el concepto de capacidades en programas de ciencias aéreas y espaciales en Colombia, en especial en los planes, programas y proyectos futuros del sector aeroespacial colombiano, ya que estos deben responder al crecimiento y avance tanto de la industria, como la academia y el estado mismo, mediante la estructuración y alineación de los núcleos temáticos con los que se deben fundamentar los programas a nivel documental y lógicamente a nivel práctico.

En este sentido, se aportan estrategias para la formalización y desarrollo de capacidades mediante el fomento de los lineamientos del SCTeI, formulación, ejecución y seguimiento de proyectos, así como a la materialización de requisitos para el cumplimiento de estándares internacionales, para la articulación de las funciones y medios de desarrollo en el sector. Y en términos generales en el soporte de capacidades para aplicar las ciencias aeronáuticas y aeroespaciales en el diario vivir de país, con el conocimiento y técnica suficiente para el cumplimiento de retos y desafíos que en dichas áreas demanda el desarrollo tecnológico mundial.

Finalmente, se busca aportar a la estructuración y soporte de los proyectos espaciales y la estructuración de programas en ciencias aeroespaciales, mediante la generación de doctrina en el diseño de misiones espaciales, control de operaciones espaciales, diseño de sistemas y ejecución de pruebas para el aprovechamiento de las capacidades espaciales en órbita, caracterización de sistemas espaciales y uso de tecnologías de punta para la proyección de la tecnología espacial, con lo cual se pueda vincular el eje de investigación de los planes y programas en ciencias aeroespaciales que a su vez apoyen la relación de la triple hélice o Universidad, Empresa, Estado, donde la Fuerza Aérea Colombiana juega un papel protagonista para el impulso y desarrollo de dichas ciencias en Colombia.

Metodología

El desarrollo del estudio se estructuró en dos fases principales, cada una con métodos, técnicas, instrumentos y herramientas específicas que permitieron organizar y orientar el análisis del sector espacial.

Fase 1: Análisis del Estado del Arte

Objetivo: caracterizar el desarrollo espacial en los niveles global, regional y nacional.

- **Método:** revisión documental y bibliográfica.
- **Técnicas:** análisis de contenido y comparación de tendencias.
- **Instrumentos:** bases de datos académicas, documentos de política pública (CONPES, OCDE, ONU, agencias espaciales).
- **Herramientas:** matrices de clasificación por niveles (global, regional, nacional), esquemas comparativos de políticas y tecnologías.

- **Resultados:** identificación de avances en potencias espaciales, capacidades regionales en América Latina y esfuerzos colombianos como el programa FACSAT.

En esta fase, los criterios de selección incluyeron documentos oficiales (CONPES, ONU, OCDE), literatura académica y técnica sobre ciencia, tecnología e innovación (CTeI), así como experiencias de países líderes en el sector espacial (EE. UU., Rusia, China, Francia y Japón), referentes regionales (Brasil, Argentina y México) y el caso colombiano. Se seleccionaron tecnologías clave como comunicaciones satelitales, propulsión espacial y observación terrestre, por su incidencia en seguridad, defensa y desarrollo económico. Como criterios de exclusión, se descartaron fuentes sin rigor académico o institucional, países con participación marginal en el sector espacial y desarrollos tecnológicos muy incipientes o de baja aplicabilidad al contexto nacional.

Las categorías de análisis se estructuraron en tres niveles: global, regional y nacional, abarcando tendencias tecnológicas, políticas públicas, cooperación internacional y capacidades institucionales. Las bases de datos utilizadas fueron bibliográficas y documentales, incluyendo repositorios académicos y fuentes gubernamentales. La muestra del estado del arte incluyó programas espaciales internacionales, experiencias latinoamericanas (como la Misión Espacial Completa brasilera y la CONAE en Argentina) y el programa colombiano FACSAT como caso central, lo que permitió construir una línea de base comparativa para identificar brechas y oportunidades.

Fase 2: Generación de Estrategias Prospectivas

Objetivo: Proyectar escenarios y definir estrategias para fortalecer la Ciencia, Tecnología e Innovación (CTeI) en el sector espacial colombiano, con base en la caracterización desarrollada en sus diferentes niveles.

1. Análisis estructural

- Método: MIC MAC.
- Técnicas: evaluación de influencias y dependencias.
- Instrumentos: matrices de variables.
- Herramientas: software MIC MAC para identificar variables estratégicas.

2. Análisis de actores

- Método: MACTOR.
- Técnicas: construcción de matrices de influencia y convergencia.
- Instrumentos: tablas de ponderación de actores.
- Herramientas: software MACTOR para visualizar relaciones de poder e influencia.

3. Análisis morfológico

- Método: Peter Schwartz (escenarios).
- Técnicas: planteamiento de hipótesis de futuro.
- Instrumentos: cuadros de escenarios posibles.
- Herramientas: ejes morfológicos para identificar alternativas de desarrollo.

4. Determinación de estrategias

- Método: integración de resultados de los tres análisis.
- Técnicas: construcción del escenario apuesta.
- Instrumentos: hexágono estratégico de CTel.
- Herramientas: esquemas gráficos de articulación de capacidades y hojas de ruta estratégicas.

En esta fase, los **criterios de selección** se centraron en variables estratégicas de CTel relevantes para Colombia, priorizando aquellas con influencia directa en el desarrollo espacial, como formulación de proyectos, gestión de innovación, gestión tecnológica y políticas institucionales. Se incluyeron actores clave con capacidad de decisión o influencia (FAC, Gobierno, Congreso, universidades, empresas del GSED como CODALTEC, INDUMIL y CIAC). Como **criterios de exclusión**, no se consideraron actores con baja incidencia en la definición de políticas o proyectos espaciales, ni variables con impacto marginal en la construcción de escenarios de futuro.

Las **categorías de análisis** se definieron a partir de tres metodologías: análisis estructural (MIC MAC), análisis de actores (MACTOR) y análisis morfológico (Peter Schwartz), lo que permitió clasificar variables en función de su influencia y dependencia, así como proyectar escenarios posibles. La **base de información** estuvo constituida por estudios nacionales e internacionales de prospectiva, planes de desarrollo y documentos de política sectorial. La **muestra de análisis** correspondió a un conjunto de variables estratégicas

y actores institucionales, cuya interacción permitió formular el **Hexágono Estratégico de CTel**, integrando reingeniería organizacional, programas estratégicos, talento humano, coordinación de capacidades, cooperación internacional y producción tecnológica como propuesta de ruta para el sector espacial colombiano.

Resultados de las perspectivas del dominio espacial

Contexto Global

El desarrollo tecnológico para abordar el contexto del dominio espacial se plantea desde el punto de vista global, regional y nacional, analizando los aspectos de la ciencia, la tecnología e la Innovación de lo que están haciendo diferentes países en términos de las tendencias para el desarrollo de la Ciencia y la Tecnología en el dominio del espacio.

A nivel global las ciencias espaciales apuntan hacia el desarrollo de la especie en otro planeta buscando capacidades y posibilidades de sustentabilidad y movilidad en otros planetas. De ahí el hecho de que múltiples organizaciones y con ellas los países líderes en el tema espacial como EEUU, Francia, Rusia, Japón y actualmente y con gran sinergia la China, aborden las tecnologías necesarias para la conservación de la especie humana y el desarrollo de hábitat alternativos a las condiciones del planeta tierra.

En este contexto y de manera paralela se están consolidando tecnologías alternativas para el uso y aprovechamiento del espacio ultraterrestre, tales como sistemas satelitales, medios de propulsión, bases de lanzamiento y todo lo relacionado con capacidades en tierra para sistemas de prueba y procesos de formación y competencias en la temática espacial.

La perspectiva espacial a nivel global, tiene a su vez un panorama ligado a la búsqueda de soberanía del espacio, a pesar de los acuerdos establecidos por Naciones Unidas donde se han puesto en común acuerdo que dicho espacio es un escenario libre de confrontaciones, sin embargo los cambios tecnológicos y las capacidades subordinadas al manejo de la información han dispuesto la participación activa de sistemas satelitales con los cuales se puedan visualizar amenazas a nivel de ciberseguridad y ciberdefensa, con los cuales potencias mundiales como China y Estados Unidos lideran la carrera para el posicionamiento de equipos con cubrimiento de áreas suficientes en caso de amenazas desplegadas desde dichos escenarios.

En términos generales, la perspectiva global trae consigo la disposición de nuevas tecnologías para el cubrimiento en comunicaciones, vigilancia y control de territorios con diferentes capacidades de censado y manejo de la información necesario para situaciones de emergencia tanto ambientales como con amenazas bélicas que puedan ser identificadas de manera temprana con dichas tecnologías. Además, trae consigo también la exploración espacial y la posibilidad de descubrir nuevos hallazgos que permitan ampliar el conocimiento de la evolución y la dinámica del espacio frente al planeta tierra y sus posibilidades de existencia como lo muestra la Figura 1.

De acuerdo con Leloglu & Kocaoglan (2008), las políticas espaciales en el mundo buscan que los países asciendan en la pirámide del sector espacial, lo que implica un incremento gradual de la capacidad tecnológica, así como la inserción del país en eslabones cada vez más sofisticados de la cadena de valor de dicho sector.

Para lograr esto, una política espacial debe tener al menos dos pilares: (i) la definición de estrategias tanto por el lado de la demanda, por ejemplo, incrementando la apropiación de estas tecnologías; como por el lado de la oferta, por ejemplo, identificando potencialidades y mejorando las capacidades tecnológicas del país, que lo conduzcan a incrementar su inserción en la cadena de valor⁸, y (ii) la definición de la política espacial como política de Estado, de tal manera que le otorgue un carácter de largo plazo a la política y trascienda los gobiernos de turno.

8 Vale la pena mencionar que varios países de América Latina se encuentran hoy en día en el segundo escalón, el de operadores de sistemas satelitales, y unos pocos han logrado llegar al cuarto escalón de manufactura de satélites, componentes y equipos en Tierra. Como operadores satelitales se encuentran Brasil, desde la década de 1980; México, desde 1980 (Sistema Satelital Morelos); Argentina, desde la década de 1990 (Sistema de Satélites ARSAT); Venezuela, desde 2007 (Satélite VENESAT-1 Simón Bolívar); y Bolivia, desde 2013 (TKSAT-1 Túpac Katari). De otro lado, Brasil, México y Argentina están participando en el segmento de manufactura.

Figura 1. *Pirámide del sector espacial global*

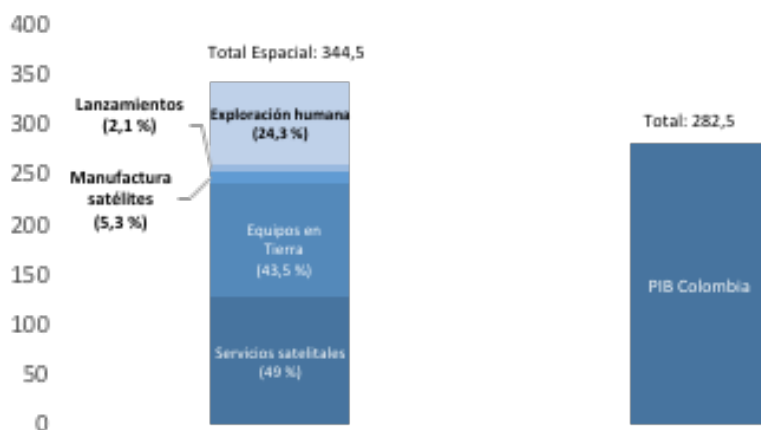


Fuente: DNP (2017), adaptado de Lologlu & Kocaoglan (2008).

La política pública espacial debe partir por reconocer que estas tecnologías son un medio para aumentar la competitividad de los países, y de esta forma impulsar el crecimiento económico. Tres grandes tendencias del sector espacial en el mundo confirman esta visión. En primer lugar, estas tecnologías ya no se restringen al campo militar, como lo fue principalmente en el contexto de la Guerra Fría, sino que, sin desvirtuar la importancia que tienen y seguirán teniendo para la seguridad y defensa, se han convertido en transversales para la economía y el sector público (OCDE, 2004; 2005; 2008; 2013). Segundo, los inversores y empresas privadas encuentran en la industria espacial un espacio cada vez más amplio y atractivo para el desarrollo de sus actividades, a tal punto que la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) ha acuñado el término “economía espacial” para referirse a las actividades productivas de este sector (OCDE, 2012; Satellite Industry Association (SIA), 2017). Tercero, el acceso a los beneficios del espacio ya no está restringido a un club exclusivo de países, sino que estos se han “democratizado” y cada vez más países participan en la economía espacial, buscando insertarse en diferentes eslabones de la cadena de valor, de acuerdo con sus potencialidades (OCDE, 2014; Space Foundation, 2014). Tomado Documento CONPES.

Una aproximación al tamaño de la economía espacial en el mundo la provee la *Satellite Industry Association* (SIA)⁹. Según la SIA (2017), los ingresos del sector espacial se dividen en una parte no comercial (de exploración del espacio y proyectos satelitales adelantados exclusivamente con capacidades y fondos públicos) y una parte satelital comercial (que incluye proyectos satelitales adelantados por actores privados o público-privados). Como se observa en la Figura 2, el sector espacial obtuvo ingresos mundiales por USD 344,5 miles de millones en 2016 (22 % más grande que el PIB de Colombia), de los cuales específicamente el sector satelital comercial obtuvo ingresos por USD 208,3 miles de millones (lo que representa 76 % del sector espacial y 92 % del PIB de Colombia). Los ingresos de la parte satelital comercial se pueden dividir de la siguiente manera: industria de lanzamientos, USD 5,5 (2 %); manufactura de satélites, USD 13,9 miles de millones (4 %); equipos en tierra¹⁰, USD 113,4 (33 %); servicios satelitales¹¹, que tiene la mayor parte de los ingresos por USD 127,7 (37 %); y otros (24 %).

Figura 2. Ingresos del sector espacial (2016)



Fuente: SIA (2017).

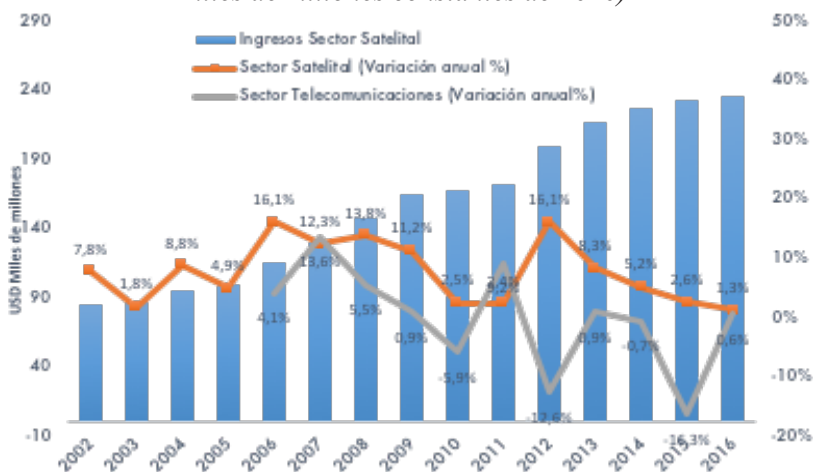
9 Otras fuentes de información son Space Foundation y la OCDE. Sin embargo, SIA ofrece más detalle sobre la composición de los ingresos y genera reportes con una serie temporal más larga (desde 2001).

10 Equipos en tierra incluye el consumo de equipos para GNSS con el 75 % de los ingresos (USD 84,6 miles de millones), seguido del consumo de equipos para televisión, radio y banda ancha satelital con 16% (USD 18,5 miles de millones).

11 Servicios incluye consumo de televisión, radio y banda ancha satelital con una participación del 82 % (USD 104,7 miles de millones), y servicios fijos, es decir, servicios de administración de sistemas satelitales y alquiler de transpondedores con el 14 % (USD 17,4 miles de millones).

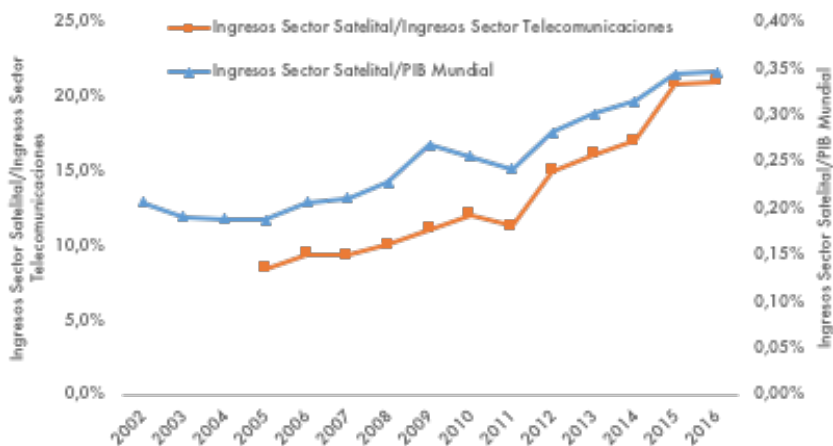
Al analizar la evolución del sector satelital en el tiempo, se evidencia su resiliencia ante la crisis económica de finales de la década pasada. Como muestra la Figura 3, a pesar de la desaceleración en el período de la crisis económica mundial que se inició en 2008, el sector mantuvo su crecimiento en cifras positivas, y en promedio entre 2002 y 2016 tuvo un crecimiento real de 4,78 % al año. A diferencia del sector satelital, otros sectores de la economía, como el de las telecomunicaciones, no ha tenido la misma evolución. El crecimiento del sector de las telecomunicaciones tuvo una fuerte contracción entre 2007 y 2010, que coincide con el período más crítico de la crisis económica mundial, llegando incluso a cifras de crecimiento negativo (-5,9 % en 2010). Entre 2005 y 2016, el sector de las telecomunicaciones creció -0,13% en promedio anual.

Figura 3. Ingresos mundiales en la industria satelital 2005-2016 (USD miles de millones constantes de 2010)



Nota. Se utilizó el Índice de Precios al Consumidor (IPC) de la OCDE a precios de 2010 para deflactar la serie de ingresos. Fuente: SIA (2017).

Una consecuencia del mayor crecimiento de los ingresos del sector satelital con respecto al sector de telecomunicaciones y al PIB mundial es la mejora en la posición relativa del sector, tal como se observa en la figura 4. En 2005, los ingresos del sector satelital equivalían aproximadamente al 8 % de los ingresos de telecomunicaciones, mientras que en 2017 esta cifra ascendió al 21 %. Por su parte, en 2002 los ingresos del sector satelital equivalían aproximadamente al 0,20 % del PIB mundial y pasaron a representar alrededor de 0,35 % en 2015.

Figura 4. *Ingreso relativo sector satelital*

Fuente: SIA (2016) y Statista.

En términos de capital humano, el sector espacial requiere de profesionales altamente calificados, con avanzados niveles de entrenamiento en ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas (Space Foundation, 2014). Según estimaciones de la OCDE (2014) en la Figura 5, el sector espacial empleó a nivel global al menos 900.000 personas en 2013, incluyendo gerentes públicos de programas espaciales (agencias espaciales, departamentos espaciales en entidades públicas o privadas), la industria manufacturera (construcción de cohetes, satélites, sistemas en Tierra), y proveedores de servicios (de telecomunicaciones comerciales). Esta cifra es conservadora pues no incluye otros actores importantes que, de manera directa o indirecta, desempeñan un rol en los programas espaciales. Tal es el caso de universidades y entidades militares que trabajan en este tipo de programas. Según la OCDE (2014), la mayor parte de los empleados están en Estados Unidos (350.000), Rusia (200.000) y Europa (60.000).

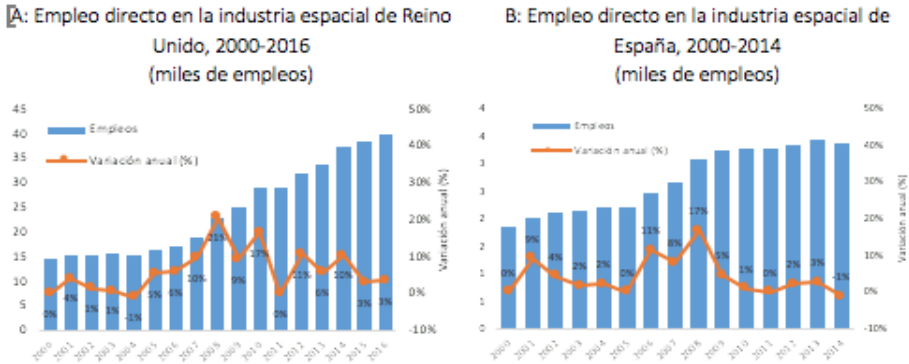
Figura 5. Empleos en el sector espacial civil a nivel mundial (2013)



Fuente: OCDE (2014).

Así mismo, estudios de caso como el del Reino Unido y España muestran la importancia del sector espacial como generador de empleo. De acuerdo con UK Space Agency (2016), el empleo directo en el sector espacial en el Reino Unido ha crecido 7 % promedio anual, tres veces más que el crecimiento del empleo en la economía en general (1,8 %) (Panel A de la Figura 6). Por su parte, el empleo en España (Panel B de la Figura 6), aunque en volumen es mucho menor que el del Reino Unido, se evidencian tasas de crecimiento positivas, lo cual es notable ya que este país ha sido uno de los más golpeados por la crisis económica mundial.

Figura 6. Empleo directo en la industria espacial en Reino Unido y España

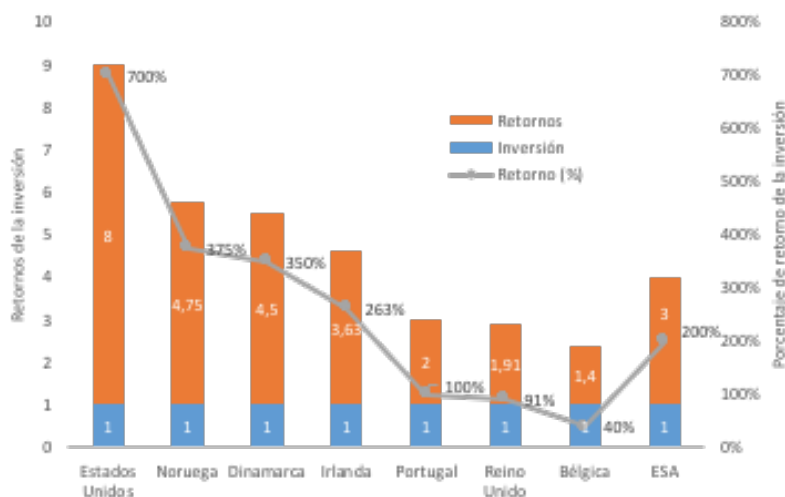


Fuente: UK Space Agency (2016) y TEDAE (2015).

En la democratización del espacio, el reconocimiento de que la inversión en proyectos espaciales tiene un importante efecto multiplicador sobre la

economía ha generado el interés de los países de formular políticas públicas para explotar los beneficios de este sector. Por ejemplo, en la figura 7, en países como Estados Unidos el retorno de la inversión es de 700 %; en Dinamarca y Noruega, mayor al 300 %; en Irlanda, de 263 %; en Portugal de 100 %; en Reino Unido de 90%; en Bélgica de 40 %; y para la Agencia Espacial Europea el retorno de la inversión es del 200 %.¹²

Figura 7. Retornos de la inversión de programas espaciales. Cifras en unidades monetarias de cada país



Fuente: OCDE (2014). El dato de Europa (Agencia Espacial Europea) proviene de Leloglu, E. Kocaoglan (2008), y el de Estados Unidos de Space Foundation.

3.1.1 Países destacados

a. *EEUU*

Existen claras amenazas para dominio estadounidense del espacio, incluyendo el aumento de partículas basura en el espacio, los cambios climatológicos inducidos, la creciente facilidad para ingresar al espacio y los potenciales ciberataques. Sin embargo todas estas amenazas representan oportunidades

¹² Vale la pena aclarar que, como lo señala la OCDE (2014, p. 80), los resultados de estas evaluaciones tienen un propósito ilustrativo y no para hacer comparaciones entre países, ya que para cada evaluación se han usado diferentes métodos y se han realizado en diferentes años. Por lo tanto, hoy en día se habla de una democratización del tema espacial. Es decir, este ya no es exclusivo de las grandes potencias, sino que cada vez más países buscan la manera de apropiarse tecnologías espaciales y de participar de la economía del espacio, incluidos varios de América Latina que, con diferentes niveles de éxito, se han insertado en la cadena de valor de este sector.

para la Fuerza Aérea Estadounidense para modernizar todos sus servicios espaciales, por ejemplo los temas espaciales polémicos o de rivalidad como el espectro electromagnético, son oportunidades para cooperaciones internacionales con el fin de mejorar la exactitud de los sistemas de posicionamiento globales (GPS), desarrollar protocolos para cibercoperación y generar nuevos espectros electromagnéticos para control y comunicaciones, todas estas problemáticas representan oportunidades de mejora y cooperación internacional.

Las líneas de investigación de la fuerza aérea de los estados unidos están enfocadas a tres pilares fundamentales; la vigilancia global, el alcance y el poder globales en el aire, espacio y ciberespacio abarcando todas las posibles variables y aun teniendo en cuenta que pueden ser vulnerables en ambientes militares, económicos y políticos, pero utilizando la “ventaja”; la preparación, resiliencia y sensibilidad.

b. China

El programa espacial chino ha hecho grandes avances en la última década. Se ha convertido en el tercer país capaz de hacer lanzamientos controlados al espacio. Detrás de todo este gran logro, hay que resaltar que china pretende establecer una gran red satelital para aplicaciones civiles y militares.

Sus interferencias satelitales y pruebas de antisatélite han provocado la atención internacional. Este desarrollo generó implicaciones políticas, económicas, militares y psicológicas hacia todo el mundo. Tal como lo establece en la carta blanca del espacio; todos sus avances y hallazgos científicos y serán para promover el progreso social y de la civilización humana y de esta manera encontrar las demandas de la construcción económica, los desarrollos científicos y tecnológicos, la seguridad nacional y el progreso social.

Actualmente China enfoca sus líneas de investigación en su robusto programa espacial donde incluye investigación en búsquedas espaciales, desarrollo y producción de vehículos de lanzamiento espacial, y una variedad de sistemas de satélites y programas espaciales.

Tecnologías recurrentes

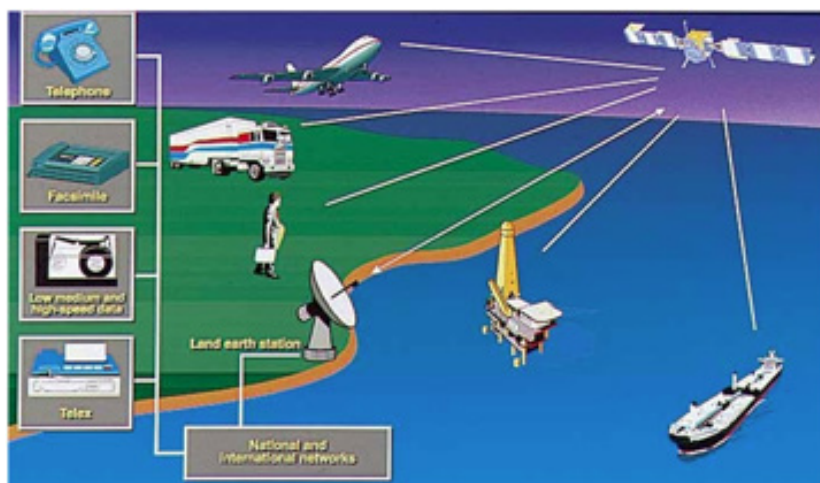
a. Comunicaciones satelitales

Para entender el concepto debemos saber que, en las comunicaciones por satélite, las ondas electromagnéticas se transmiten gracias a la presencia en

el espacio de satélites artificiales situados en órbita alrededor de la Tierra como lo muestra la figura 8. Un satélite actúa básicamente como un repetidor situado en el espacio: recibe las señales enviadas desde la estación terrestre y las reemite a otro satélite o de vuelta a los receptores terrestres, de esta manera podemos concluir que las comunicaciones satelitales se han visto inmersas en las telecomunicaciones modernas y es una manera fácil de verlo como elementos de poder espacial. Sabemos que existen dos principales categorías para el poder espacial en términos de comunicación por satélite las cuales son; las comunicaciones satelitales de voz y las redes satelitales habilitadas, ambas contribuyen con las operaciones militares modernas de una manera muy profunda, así mismo generan un significativo mayor impacto en las guerras irregulares que en las guerras convencionales.

Las primeras aplicaciones enfocadas a las órbitas satelitales de la tierra determinan que una señal de radio puede ser dirigida a un satélite en órbita para ser repetida o devuelta a otro punto sobre la superficie de la tierra. Las múltiples repeticiones entre la superficie de la tierra y los satélites en órbita permiten a los usuarios comunicarse uno a otros desde posiciones opuestas en la superficie de la tierra, teniendo en cuenta que solo utilizando un satélite se puede genera un incremento exponencial en cuanto a eficacia de comunicaciones comparado con un radio transmisor terrestre. Cerca del 42% sería el incremento en eficacia de comunicaciones utilizando sistemas satelitales lo cual significaría una ventaja bastante considerable.

Figura 8. *Sistemas Satelitales*



Fuente: Pratt, T., Bostian, C., & Allnutt, J. (2003). *Satellite Communications*. Wiley.

b. Propulsión espacial

Los vuelos espaciales son sin duda un suceso memorable y probablemente el logro más audaz de la humanidad en el siglo XX. Empezó de repente en 1950 y tuvo un crecimiento explosivo en las dos décadas siguientes. Durante un periodo de más de 50 años de vuelos espaciales, muchas cosas han cambiado. Las naves espaciales son barcos lujosos comparados con las cápsulas de mercurio que llevaron a los primeros astronautas americanos al espacio. Hoy en día hay miles de satélites en órbita que forman un pilar fundamental en el sistema de comunicaciones de la Tierra, sin embargo, hay una sola cosa que no ha cambiado mucho con el paso de tiempo: la forma en la que funcionan los cohetes, en otras palabras, la propulsión de los cohetes que siguen siendo sustancias químicas. Mientras los diferentes tipos de combustible han sido utilizados, y los cohetes actuales son más avanzados tecnológicamente que sus predecesores, los conceptos básicos de propulsión espacial resultan siendo los mismos.

El sistema de propulsión de un cohete incluye todas las partes que constituyen el motor: tanques, propulsores y las mangueras del cohete. La función principal del sistema de propulsión es producir empuje, que es la fuerza que moverá el cohete a través del aire y el espacio, como lo muestra la Figura 9. Varios sistemas de propulsión generan empuje de diferentes maneras, pero siempre basándose en la tercera ley de Newton. Una derivación de la ecuación de empuje muestra que la cantidad de empuje generado depende principalmente de la masa que va a través del motor y en la velocidad de salida del gas.

La tecnología de propulsión espacial puede ser dividida en 3 principales categorías en donde se enfocan las líneas de investigación: propulsión de escape (de la superficie de la tierra a la órbita) propulsión en el espacio (en la órbita) y la propulsión espacial profunda (desde la órbita hacia el espacio exterior).

Figura 9. Distancias Espaciales

Distance (km)	Space	Observation
0	Escape Propulsion	Earth
50		End of stratosphere
160	International Space Station	Beginning of Low Earth Orbit
406		International Space Station at at orbital altitude between 330
2,000		
20,200		End of Low Earth Orbit – beginning Medium Earth Orbit
35,786		
384,000	Deep-space	Parking lot – where gravitational effects of Sun and Earth sal- ance o ult
1,500,000		
384,000		Venus
38,700,000		Curiosity rover – landed on Ma- rs(August 2012)
55,700,000		Mercury
88,200 0,000		Sun
1,200,000,000		Jupiter
1,580,000,000		Saturn
2,580,000,000		Uranus
4,500,000,000		Pluto
78,60,000,000		Neptune
16,600,000,000	Termention shock	Outer solar system
12,560,000,000		Wind of electrically charged particles becomes denser, ad hotter and slower
21,240,000,000		
21,240,000,000	Termination shock	wiod out of marcos regilatorios tue poșibilitie la governanza

Fuente: Vallerani, M. (2017). Introduction to Space Safety Regulations and Standards.
Springer.

Contexto Regional

Partiendo de la perspectiva global, a nivel regional se destacan los avances y aplicación de tecnologías en países como México, Argentina, Brasil y en términos generales los países suramericanos, los cuales están desarrollando alianzas estratégicas para ejercer soberanía espacial mediante el posicionamiento de tecnologías satelitales, con países como la China, Rusia, Canadá entre otros, con los que se dispone de recursos estratégicos para la observación terrestre y las comunicaciones, capacitando personal operativo de las tecnologías y generando a su vez trasferencia de conocimiento útil para el

desarrollo de capacidades propias como lo busca hacer Colombia también con la prospectiva de uso espacial a detallarse en la perspectiva local.

Las tecnologías empleadas para la búsqueda de información útil para la inteligencia militar pasan por los recursos propios de cada país y de los acuerdos de cooperación en esta materia con los países más desarrollados, en particular con los Estados Unidos. Muchos países de la región poseen capacidades espaciales propias con las cuales están en capacidad de hacer búsqueda y análisis de información relevante. En el campo de las imágenes países como Argentina, Brasil, Venezuela, Chile, Perú cuentan con sus propios satélites de observación de la tierra (EO). Asimismo, se siguen empleando los medios aeronáuticos tripulados y no tripulados y los medios humanos para la búsqueda y análisis de información relevante para sus intereses, no obstante, la ausencia de un conflicto bélico como el presente en Colombia orienta esta búsqueda de información hacia los intereses nacionales. (Villamizar, R., 2014). El espacio ultraterrestre: seguridad y defensa en América Latina. *Revista de la Escuela Superior de Guerra – CEESEDEN*. Bogotá: ESDEGU

Por otro lado, los países que han avanzado en temas espaciales han definido la política espacial explícitamente como una política de Estado, de máxima prioridad para los intereses del país y estratégica para su desarrollo. La Tabla 1 muestra algunos ejemplos de cómo algunos países expresan dicha prioridad nacional en sus políticas espaciales.

Tabla 1. *El sector espacial como política de Estado: casos de Estados Unidos, Reino Unido, Argentina y México*

País	Normativa
Estados Unidos	U.S. National Space Policy (2010): “The conduct of U.S. space programs and activities shall be a top priority...”
Reino Unido	National Space Policy (2015): “Government recognises that space is of strategic importance to the UK because of the value space programmes deliver back to public services, national security, science and innovation, and the economy”.
Argentina	Decreto 532 (2005): “Declárase al desarrollo de la actividad espacial como política de Estado y de prioridad nacional. Apruébese el Plan Espacial Nacional 2004-2015. Establécese que este Plan y las acciones previstas para dicho período revisten el carácter de Plan Estratégico de la Comisión Nacional de Actividades Espaciales”.

País	Normativa
México	Decreto (2010), mediante el cual se dan a conocer las Líneas Generales de la Política Espacial de México: "...La Política Espacial de México se define como una política de Estado, que trasciende coyunturas políticas o económicas. Su finalidad es traducir el desarrollo científico, tecnológico e industrial aeroespacial del país en nuevos nichos de oportunidad, situar a México en la competencia internacional del sector y ayudar a generar más y mejores empleos...".

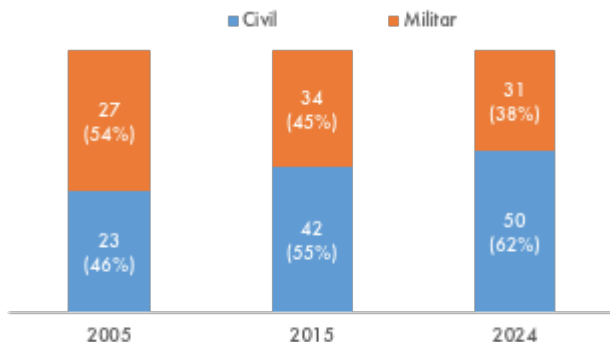
Fuente: DNP (2017).

En términos regionales, se han establecido planes de gobierno asociados a la adquisición de tecnologías espaciales, capaces de cubrir las necesidades básicas de cobertura de los territorios con los cuales se pueda considerar un mínimo nivel de presencia espacial, particularmente en asocio con empresas prestadoras de servicios de venta de equipos, diseños de misión y lanzamientos para el posicionamiento de las cargas útiles en el espacio. Dichas cargas han cobrado relevancia en términos de los satélites de pequeña escala denominados en su categoría como tipo CubeSat, los cuales han venido siendo el mecanismo de acceso a la tecnología espacial por parte de países en vía de desarrollo, como se puede apreciar a nivel regional, especialmente en razón a la democratización del espacio y a las diferencias significativas a nivel presupuestal que permite la aplicación de dichas tecnologías por sus bajos costos en comparación con satélites monolíticos de gran escala, que demandan muchos más recursos y restringen su acceso a economías de baja escala.

Según cifras de *Space Foundation*¹³, como lo muestra la figura 10, el presupuesto público en Investigación y Desarrollo (I+D) para temas espaciales con aplicaciones civiles ha adquirido cada vez mayor participación en el presupuesto total espacial con respecto al presupuesto militar. En 2005, el presupuesto total fue alrededor de USD 50 mil millones, de los cuales 46 % fue destinado a temas civiles y el 54 % a militares. En 2015, la participación del sector civil ya era mayor: el presupuesto total fue aproximadamente USD 76 mil millones, de los cuales el civil tuvo una participación del 55 % *versus* 45% del militar (Al-Ekabi *et al.*, 2017), y según estimaciones de *Euroconsult*, el presupuesto total ascenderá a USD 81 mil millones a 2024 con una participación del ámbito civil de aproximadamente el 62 %.

13 Space Foundation es una organización no gubernamental fundada en 1983 en Colorado, Estados Unidos, con el objetivo de promover la cultura sobre temas espaciales a nivel mundial.

Figura 10. *Presupuesto público en I+D espacial civil versus militar a nivel mundial, 2005, 2015 y 2024, (USD miles de millones)*



Fuente: Al-Ekabi et al., 2017 y proyecciones de Euroconsult.

El aumento del presupuesto en temas civiles se explica por la transversalidad y ventajas que los tres principales servicios satelitales -comunicaciones, observación de la Tierra y navegación satelital- tienen para la economía y el sector público. Por ejemplo, en el tema de comunicaciones, la comunicación vía satélite es más eficiente para llegar a zonas apartadas del país y de baja densidad poblacional, pues, a diferencia de tecnologías terrestres como la fibra óptica, su despliegue no depende de estas variables¹⁴. De esta forma, las comunicaciones vía satélite, como complemento de tecnologías terrestres, posibilitan la cobertura total del territorio y población de un país, lo cual ayuda a cerrar brechas regionales y sociales de acceso a Internet y comunicaciones¹⁵ (Booz & Co, 2017).

Las tecnologías de observación de la Tierra, a través de la captura de imágenes satelitales con diferentes tipos de resolución, permiten estudiar el territorio con gran detalle y en menor tiempo sin los obstáculos que implica la geografía cuando dicha labor se hace de manera terrestre¹⁶. Por ejemplo, hoy en día se conoce como “agricultura de precisión” la gestión de tierras agrícolas con

¹⁴ Mientras que el despliegue de la fibra óptica requiere de una red compleja de infraestructura terrestre que puede ser difícil de desarrollar en zonas apartadas, la comunicación satelital requiere de la instalación de antenas VSAT (Very Small Aperture Terminal) -las cuales pueden ser más asequibles-, y la comunicación de estas con un satélite de comunicaciones para proveer Internet a una región. Esto reduce la complejidad del despliegue de infraestructura en el territorio.

¹⁵ Para una revisión del efecto positivo de las comunicaciones en diversas formas de bienestar ver: García Zaballos & Lopez-Rivas (2012), Wagner, David & García Zaballos (2014) y Banco Mundial (2016).

¹⁶ Para una revisión de aplicaciones socioeconómicas de imágenes satelitales ver: Sandborn & Engstrom (2016), Taubenbock & Kraff (2014) y Duque, Patiño, & Betancourt (2016).

base en la observación y medición de la calidad de los suelos con base en imágenes satelitales.

Las tecnologías de navegación satelital son también hoy en día una herramienta casi indispensable para la vida diaria. Por ejemplo, aplicaciones de teléfonos móviles como *Waze*, *Uber* y *Tapsi*, entre muchas otras, son un valor agregado de señales satelitales de sistemas de posicionamiento global GNSS. De esta forma, las tecnologías satelitales de navegación contribuyen a la optimización de la movilidad en los diferentes modos de transporte privado. Por otra parte, si bien las tecnologías espaciales son cada vez más importantes en diferentes áreas civiles, no se puede desconocer la relevancia que tienen para la seguridad y defensa.

Desde la perspectiva militar, la tecnología espacial ha jugado un importante rol de multiplicador y habilitador de la fuerza. En los conflictos modernos el principio de masa¹⁷ ha tenido un papel secundario, siendo precedido por la habilidad para detectar, sincronizar, comunicar y responder de forma rápida para ejecutar operaciones basadas en efectos¹⁸, para lo cual las tecnologías espaciales, y satelitales en particular, desempeñan un rol relevante gracias a las ventajas de las comunicaciones satelitales y el monitoreo terrestre mediante imágenes satelitales.

Es de destacar que, aunque Colombia no posee capacidad autónoma para el acceso y explotación del espacio, las capacidades del sector defensa y seguridad se han podido desarrollar gracias a activos con un fin comercial administrado por civiles. La interdependencia entre los sistemas civiles y militares es un fenómeno internacional. Países como Estados Unidos, que cuenta con gran cantidad de activos de uso militar, dependen cada vez en mayor medida de los rápidos cambios tecnológicos que ofrece el sector civil, y ha obtenido beneficios de las fuerzas del mercado que derivan de una mayor competencia.

Los retos que en materia de seguridad enfrenta Colombia pueden tomar muchas formas y abarcar aspectos como el político, social, económico y militar a lo largo y ancho del territorio, lo cual requiere la explotación de recursos espaciales para su adecuado funcionamiento. La OCDE ha documentado ampliamente el rol que en el mundo el sector de defensa y seguridad ha desempeñado en el avance tecnológico, y las capacidades

¹⁷ El principio de masa consiste en la capacidad para desplegar y concentrar poder de combate superior al del enemigo en el punto y momento decisivos.

¹⁸ Operaciones basadas en efectos es un concepto para la conducción de operaciones en el que se consideran efectos directos, indirectos y de cascada como resultado de la aplicación combinada de instrumentos militares, políticos, económicos y psicológicos

tecnologías espaciales para ejercer tareas como el mando y control, la generación de inteligencia, el planeamiento de operaciones, el control y monitoreo de cultivos ilícitos, la vigilancia de fronteras, el control del espacio aéreo, entre otras (OCDE, 2012).

En el ámbito mundial, sigue siendo de gran relevancia la adquisición de información de inteligencia a través de sistemas de alta tecnología dentro de los cuales se mencionan los sistemas satelitales, tanto de comunicaciones como de observación de la tierra en sus diferentes espectros. Sin embargo, las capacidades de contra poder desarrolladas con el fin de inhabilitar o destruir estos sistemas tecnológicos (satélites) han llegado a niveles reales de aplicación. Es así como el Departamento de Defensa de los Estados Unidos DoD (2016) reportó: “China lanzó un objeto en el espacio en trayectoria balística con un pico de altitud cercano a los 30,000 km, lo cual es prueba de su tecnología de misiones contra espaciales en órbitas geo síncronas”. Ante esta realidad las Fuerzas Militares del mundo vienen buscando alternativas a emplear ante una eventual pérdida de comunicaciones a través de tecnologías satelitales dada la gran dependencia actual.

Cabe mencionar que esta capacidad contra espacial puede afectar todos los sistemas satelitales en órbitas LEO como los de observación de la tierra y en órbitas MEO como los sistemas de GPS. De otra parte, la búsqueda de información de inteligencia por medios aeronáuticos sigue siendo de gran uso en especial a través de los sistemas aeronáuticos remotamente tripulados (RPA), con mayor alcance, mayor autonomía, mayor altitud, estos sistemas son una fuente fiable y relativamente económica de hacer búsqueda de información en ambientes hostiles sin poner en riesgo a los tripulantes.

De igual manera, se evidencia la dimensión cibernética como un lugar útil para la captura de información que puede ser de uso en inteligencia militar, asimismo, esta dimensión se presenta como el campo de batalla de las guerras futuras. Dice Gibson (2013):

Las operaciones cibernéticas son el aspecto más importante de los conflictos militares en el siglo 21, pero desafortunadamente también están entre los menos entendidos. Abarcan una amplia gama de situaciones que van hasta el complicado esfuerzo de defender la red informática. La batalla continua por el dominio de la red entre atacantes y defensores se puede entender como un juego complejo; este punto de vista ha llevado al surgimiento de los principios de la teoría de juegos aplicado a los escenarios de guerra cibernética. La teoría de juegos con su capacidad de proporcionar un análisis

matemático es un elemento que ayuda a aumentar las capacidades defensivas. (pp. 213 y 215)

Para nadie es un secreto que en Suramérica uno de los países con mayor influencia en la parte espacial es Brasil, desde sus orígenes en 1957 hasta la creación de la “Misión Espacial Completa brasilera (MECB)” en 1979, y posterior a eso desde la creación de la MECB hasta la creación de la Agencia Espacial Brasileira (AEB) en 1994, finalizando en las actividades espaciales que se realizan en el presente.

Se crea el ministerio de ciencia, tecnología e innovación (MCTI) en 1985 con el fin de controlar actividades del instituto nacional de estudios espaciales a través de la subsecretaría de coordinación de las unidades de estudio, con su principal misión; desarrollar tecnologías y satélites para contribuir con la exploración del espacio.

El 14 de octubre de 1999 el primer satélite de la cooperación entre china y Brasil, CBERS-1, fue lanzado con éxito desde china, y CBERS-2 lanzado con éxito igualmente el 21 de octubre de 2003 proporcionan a ambos países la capacidad de monitorear sus actividades y eliminar todo tipo de ayuda externa como los satélites Landsat (satélites norteamericanos). Basados en el éxito obtenido con los satélites CBERS 1 y 2, ambos países renuevan su cooperación para desarrollar y lanzar el CBERS 3 y 4 con avances tecnológicos significativos que no solo incorporaban sistemas actualizados, también brindaba utilidades tanto militares como civiles por ejemplo la toma de imágenes satelitales.

Por su parte la visión estratégica Argentina, similar al concepto de grandeza de Brasil generó una competición por desarrollos espaciales entre los dos países. En 1960 se crea la Comisión Nacional de Investigaciones Espaciales CNIE bajo la dirección de la Fuerza Aérea Argentina.

Así como Brasil, argentina empezó a trabajar mucho antes en tecnologías espaciales principalmente con los cohetes de sonda y teniendo en cuenta que su total fabricación fue en Latinoamérica. El 23 de diciembre de 1969 se convirtió en el cuarto país en el mundo en enviar un simio al espacio y devuelto sin problemas. El 29 de agosto de 1996 fue lanzado al espacio el satélite “Victor” desde Rusia y se convirtió en el primer satélite completamente diseñado, construido y calificado para volar por profesionales argentinos.

Contexto Nacional

Generalidades

En el entorno nacional el aumento de la brecha Tecnológica entre los países en vía de desarrollo y los países desarrollados, se encuentra enmarcada por las diferencias de las economías en los sectores industriales y la calidad de la mano de obra. Consigo que la globalización actual de los capitales y las mercancías en general se les han reducido barreras de entrada y salida a cualquier economía del mundo a través de herramientas como acuerdos internacionales que permiten el desarrollo del libre mercado (Moya & David, 2014). Adicionalmente, debido a que la movilidad de las personas, el intercambio y generación de conocimiento se ven limitados por restricciones migratorias y derechos de propiedad intelectual, han venido fortaleciendo y ampliando el desbalance que genera la brecha científica y tecnológica entre los países, y a su vez el fortalecimiento de las economías del conocimiento de los países desarrollados.

Por tal motivo y analizando el sector de Seguridad y Defensa de Colombia como esta brecha cada vez más se ampliaba decide a través del Ministerio de Defensa Nacional crear el Grupo Social y Empresarial de Defensa, GSED, como una organización que agrupa diecinueve (19) entidades que apoyan la misión de las Fuerzas Militares y la Policía Nacional en Colombia. Dichas entidades cuentan con una amplia oferta de servicios de educación, transporte, recreación, vivienda y producción de equipos y elementos de uso militar y civil. De las cuales cuatro cumplen funciones Industriales COTECMAR, INDUMIL, CIAC y CODALTEC con el fin de fortalecer el desarrollo y crecimiento económico del Sector de Seguridad y Defensa del País. Y con las cuales las Fuerzas han venido trabajando para el desarrollo de nuevas tecnologías que brinden una ventaja militar encada uno de los ámbitos en el que se desarrollan.

Sin embargo, la inversión pública de Colombia en I+D con respecto al PIB es de las bajas del mundo ubicándose al lado de países como Kuwait o Kazajistán generando menos de 500 investigadores por millón de habitantes que permitan desarrollar proyectos innovadores que alimenten la industria nacional.

En cuanto a la Universidades se cuenta con grana captación y acercamiento con varias instituciones educativas fuertes en las aéreas de ingeniería y con las cuales se han realizado acuerdos de entendimiento para I+D+i entre las que se destacan la Universidad Nacional, la Universidad Sergio Arboleda, la Escuela Colombiana de Ingeniería “Julio Garavito”, la Universidad del Valle, La Universidad de Antioquia, La universidad Pontificia Bolivariana,

la Universidad Militar Nueva Granada, las cuales se encuentran renqueadas dentro de las mejores universidades del país de acuerdo a las pruebas Saber Pro realizadas por el ICFES (Revista Dinero, 2017).

Lo anterior le permite al sector acceder con conocimientos especializados que pueden fortalecer las redes de conocimiento requeridas para el desarrollo de proyectos de I+D+i aeroespaciales pero que a la fecha no reportan casos de éxitos en la integración con el sector en la generación de productos que se reflejen en el mercado.

En cuanto al sector empresarial probado se cuentan con alianzas estratégicas el Clúster Aeroespacial Colombiano (conformado por 11 empresas) y la Asociación Colombiana de Productores Aeroespaciales (conformado por 17 empresas) los cuales le han estado produciendo piezas aeronáuticas para la Fuerza Aérea Colombiana y la CIAC, y se encuentran buscando abrir mercados, pero requieren fortalecer sus capacidades para ofrecer servicios tipo exportación, debido a que en la actualidad la gran mayoría de sus ingresos son producidos por el mercado local.

En el Valle del Cauca la Fuerza Aérea se encuentra impulsando la creación de un Clúster Aeroespacial con el fin de apoyar el desarrollo científico de la región, asimismo creo el programa de sustitución de importaciones con el cual se busca promover la industria nacional y reducir costos con la adquisición de suministros que no afectan la seguridad del vuelo. Por tal motivo se crea el CETAD y se produce un listado de productos el cual es entregado a la industria nacional con el fin de generar la oportunidad del mercado y se crea la Sección de Certificación Aeronáutica que normaliza y certifica productos aeronáuticos, para el fomento y desarrollo de la industria aeronáutica a través de la integración de las capacidades de la Fuerza Aérea Colombiana y la Aeronáutica Civil (Sección Certificación Aeronáutica para la Defensa, 2018).

Así mismo la falta de desarrollo de mercados innovadores que permitan fomentar el fortalecimiento de economías basadas en el conocimiento y la generación de activos intangibles, producto de la creación de tecnologías aeroespaciales; por consiguiente, de acuerdo con el informe de Capital Intangible en las cadenas globales de valor, los activos intangibles en la actualidad representan 1/3 del valor de los productos que llegan al mercado. Valor que no se ve reflejado en la gran mayoría de productos de economías en proceso de desarrollo, por sus bajas capacidades para generar tecnologías innovadoras (Organización Mundial de la Propiedad Intelectual, 2017); es por estos antecedentes que se presenta la oportunidad de fortalecer los procesos de generación de tecnologías con un alto grado de innovación para fortalecer la

triada Universidad-Empresa-Estado con la generación de activos intangibles a través de proyectos de I+D+i aeroespaciales para el sector defensa que permitan un desarrollo económico y social a través de la generación de conocimiento.

Sin embargo, el sector de Seguridad y defensa no se ha podido conectar de forma eficiente con las universidades para la obtención del recurso humano idóneo y suficiente con la formación pertinente que permitan alcanzar logros destacables y sostenidos que rompan barreras del conocimiento para el desarrollo de proyectos de I+D+i Aeroespaciales.

Así mismo las universidades como entidades generadoras de conocimiento se ven relegadas por la falta de generación de resultados de Investigación que les permita posicionarse y ser reconocidas como formadoras de profesionales con las últimas tendencias del conocimiento que retribuyan a la sociedad graduandos con un gran potencial transformador e innovador que contribuyan al desarrollo de la economía de la nación y la industria aeroespacial. De igual forma no genera procesos de transferencia de conocimiento de forma eficiente que se vean reflejados en el desarrollo de economías y sociedades del conocimiento.

En cuanto al sector empresarial son los responsables de llevar todos los productos a mercados nacionales e internacionales, pero carecen en la actualidad de sistemas de ciencia y tecnología versátiles y eficientes para alcanzar logros de alto impacto que les permita globalizarse, asimismo carecen conocimiento especializado, para generar proyectos de I+D+i que les permita potencializarse en la generación de productos innovadores para mercados locales e internacionales.

Por lo tanto, a pesar de contar con capital de riesgo para generar nuevas unidades empresariales no poseen en muchas ocasiones el activo intelectual que les permita enfocar sus inversiones en proyectos de I+D innovadores que les abran camino en otras industrias o generar nuevos mercados. Consigo que no hay confianza plena entre los actores de la Triple Hélix.

Por consiguiente, la falta de conexión entre el sector productivo y las universidades ha sido también por la falta de estimulación del estado a través de política e inversión pública para generar una sociedad y economía basada en el conocimiento que permita la generación de riqueza para mejorar la calidad de vida de sus ciudadanos.

Las relaciones que se presentan entre las universidades, empresas y el Estado son fundamentales para poder plantear proyectos de gran impacto dentro de

la industria aeroespacial los cuales requieren del uso de ciencias complejas, las cuales abarcan el conocimiento de punta que se encuentran distribuidos dentro de los tres actores nacionales e internacionales, lo anterior debido a que la relación de triple hélix cumple con todas las características para ser tratado como un sistema complejo (conectados, interdependientes, diversos, adaptativos, dependientes) (Hillbert, 2013).

El análisis de las relaciones entre los actores de la triple hélice requiere de la revisión de un gran número de parámetros y variables con un alto grado de libertad (Maldonado, 2014), para comprender o explicar las conexiones cuyos vínculos generan información no visible entre los actores de la Triple Hélice. Esto anexo a los procesos de creatividad, I+D+i que se deben realizar para crear productos para la industria aeroespacial, indica que la relación de la triada debe aceptarse como un sistema complejo para poder ser analizada con mayor precisión.

Así mismo la baja inversión pública y privada, y la inadecuada utilización de estrategias como los offset enfocados a la generación de proyectos a largo y mediano plazo que integren a los actores de la Triple Hélice para generar capacidades tecnológicas a través de transferencias de tecnologías verticales y horizontales de compañías de la industria aeroespacial internacional y que se encuentren alineadas a una estrategia tecnológica para el fortalecimiento innovador del sector.

Por lo anterior hace falta una estrategia integradora que permita conectar la universidad, la empresa y el estado para la generación de proyectos de I+D+i Aeroespaciales de Seguridad y Defensa que permitan desarrollar tecnologías innovadoras que generen una ventaja militar optimizando las variables de tiempo, costo y alcance; y que a su vez le permita a la triada verse beneficiada con las bondades de cada uno de sus actores, y de esta fortalecer el Sector de Seguridad y Defensa de Colombia para generar utilidad y valor agregado a la economía nacional.

En la actualidad se presenta una infraestructura de ciencia y tecnología desconectada que no se encuentra articulada con el fin de obtener resultados que permitan el desarrollo de una ventaja militar y tecnológica permita el desarrollo económico del país, es importante que como Fuerzas militares se empieza a introducir el concepto, ya afianzado por países desarrollados en que el desarrollo de la ciencia y la tecnología en Defensa, le aporta al desarrollo tecnológico y a la generación de innovaciones que permiten el crecimiento de la economía nacional a través de la generación de productos de uso dual.

Así mismo, debemos generar una apertura hacia la industria nacional y las entidades universitarias con el fin de fortalecer el desarrollo de los proyectos estratégicos y generar una hoja de ruta a corto, mediano y largo plazo que permita la obtención de resultados de alto valor agregado.

Dominio del Espacio

En el entorno local o nacional, los esfuerzos de búsqueda de información útil para la FAC se centran en las capacidades tecnológicas fundamentadas en satélites de observación de la tierra no propios con los cuales se realiza la captura de imágenes de acuerdo a los intereses de búsqueda y el procesamiento a través de herramientas propias. Los medios aeronáuticos tripulados y no tripulados siguen siendo de vital importancia para la búsqueda de información, así mismo, las fuentes humanas y los equipos de escaneo del espectro electromagnético empleado en las telecomunicaciones. La FAC viene trabajando en el desarrollo de sus propias capacidades satelitales enfocadas en primera mediada a obtener autonomía en la captura de imágenes útiles para ser empleadas en inteligencia militar, es así como a finales de 2018 a través de un operador de lanzamientos espaciales puso en órbita el nanosatélite FACSAT1, con capacidad de capturar imágenes de baja resolución y comandando de forma autónoma por la Fuerza; este es el primer paso para dar continuidad a un programa de desarrollo tecnológico que permitirá adquirir capacidades en el desarrollo de activos espaciales mediante pequeños satélites de observación de la tierra y más adelante con satélites de comunicaciones.

Tomando en cuenta que a nivel regional una de las apuestas más significativas es el acceso al espacio mediante los sistemas satelitales de pequeña escala, Colombia no es ajena a dichas iniciativas y por esto se ha formulado e iniciado su programa espacial FACSAT, con el cual se busca el desarrollo de la perspectiva local en donde se potencien diferentes ejes estratégicos para el acceso a las tecnologías espaciales, la comprensión y apropiación de conceptos útiles para el escalonamiento del proceso tecnológico asociado al ejercicio de soberanía del espacio ultraterrestre.

El programa espacial FACSAT, que nivel nacional es la apuesta del estado a la carrera espacial local, se compone de tres fases y en particular parte de una necesidad académica e investigativa que permita hacer uso de estas tecnologías y abra el panorama de posibilidades para el desarrollo de capacidades a nivel nacional, en cuanto a procesos de formación, desarrollo industrial,

formulaciones documentales y legales y demás líneas de acción que demanda el tema espacial para ser afrontado y contextualizado en las necesidades de estado para apoyar el desarrollo rural y urbano Colombiano.

A nivel nacional se plantean los siguientes objetivos para el desarrollo del sector espacial en Colombia.

Objetivo general:

Generar las condiciones habilitantes para que el sector espacial contribuya a la productividad, diversificación y sofisticación del aparato productivo del país.

Objetivos específicos:

- OE 1. Crear las condiciones para establecer una visión estratégica y de largo plazo de la política para el desarrollo espacial.
- OE 2. Generar las condiciones habilitantes para dimensionar y resolver las barreras de entrada a la iniciativa privada basada en tecnologías espaciales.
- OE 3. Generar un entorno institucional que promueva la articulación entre actores e instancias.

Las iniciativas públicas en Colombia en materia espacial no cumplen con estos dos pilares señalados anteriormente. Primero, han tenido un alcance limitado, y segundo, no han podido trascender los gobiernos de turno. Estas limitaciones se han dado, en parte, por la falta de una cultura espacial en el país. Además, actualmente en el país no existen cifras sólidas sobre la demanda y la oferta de servicios satelitales, y tampoco existe ningún estudio basado en evidencias sobre las posibles potencialidades del país en este sector. A continuación, se explican estas limitaciones.

El alcance reducido de las iniciativas públicas en temas espaciales en Colombia se evidencia al analizar el objetivo de los tres grandes proyectos satelitales que ha tenido el país (Tabla 2). Tal como se presentó en los antecedentes del presente documento, estas iniciativas estaban orientadas a satisfacer necesidades específicas en materia de comunicaciones y de imágenes satelitales, pero no a implementar estrategias para mejorar la productividad y competitividad del país con base en estas tecnologías.

Tabla 2. *Proyectos de adquisición de satélites en Colombia y su respaldo de política pública*

Proyecto de adquisición de satélite	Documento CONPES	Problema por resolver	Período en el cual se intentó realizar la compra del satélite
Adquirir un satélite de comunicaciones	Documento CONPES 1421 (1977) <i>Proyecto de un satélite colombiano para comunicaciones domésticas.</i>	Mejorar las telecomunicaciones del país; y segundo, hacer uso de la órbita geoestacionaria	1977-1982
Adquirir un satélite de comunicaciones (SATCOL)	Documento CONPES 3579 (2009) <i>Lineamientos para implementar el proyecto satelital de comunicaciones de Colombia.</i> Documento CONPES 3613 (2009) <i>Complemento al CONPES 3579 de 2009</i> Documento CONPES 3651 (2010) <i>Modificación del CONPES 3579 de 2009</i>	Resolver las limitaciones de oferta de servicios satelitales que dificultaban la prestación de servicios de comunicaciones en las zonas apartadas del país, así como temas de seguridad y defensa	2009-2010
Adquirir un satélite de observación de la Tierra (SOTCOL)	Documento CONPES 3683 (2010) <i>Lineamientos para la formulación del Programa Nacional de Observación de la Tierra.</i>	Deficiencias en el acceso a imágenes para lo cual se propuso la adquisición de un satélite de observación de la Tierra	2010-2012

Fuente: Dirección de Desarrollo Digital – DNP (2020).

El Documento CONPES 1421 *Proyecto de un satélite colombiano para comunicaciones domésticas*, expresaba dos objetivos: mejorar las telecomunicaciones del país; y hacer uso de la órbita geoestacionaria que, como se mencionó en los antecedentes, Colombia en esa época reclamaba como propia. Por su parte, el Documento CONPES 3579 *Lineamientos para implementar el proyecto Satelital de Comunicaciones de Colombia* planteaba resolver las limitaciones de oferta de servicios satelitales que dificultaban la prestación de servicios de comunicaciones en las zonas apartadas del país, así como su uso para temas de seguridad y defensa. Finalmente, el Documento CONPES 3683 *Lineamientos para la formulación del Programa Nacional de Observación de la Tierra que incluya el diseño de un programa satelital colombiano*, planteaba las deficiencias en el acceso a imágenes para lo cual se propuso la adquisición de un satélite de observación de la Tierra. Lo

anterior muestra que la política relacionada con el sector espacial ha tenido un limitado alcance.

Colombia no cuenta con el liderazgo del sector espacial nacional, ni con la Cooperación Internacional suficiente, a pesar de que la mayoría de los países del mundo cuentan con Agencias Espaciales, tanto de iniciativa pública como de iniciativa privada. Se cree que, desde el sector privado, el Gobierno, La Academia y La Industria son fundamentales en la dinámica del desarrollo espacial. Y desde el mismo sector privado se quiere acelerar y transformar la participación de todos los actores que conforman el ecosistema espacial en nuestro país. Es así como se ve la necesidad de generar desarrollo del sector espacial en Colombia desde un punto de vista pragmático, que permita la generación de proyectos de impacto social, que vinculen el capital humano nacional.

Por medio de la comisión colombiana del espacio se crea la puerta de acceso para que Colombia fortalezca el conocimiento sobre la Tierra y el espacio exterior, mediante la utilización de tecnologías modernas que permitan, por una parte, la conectividad y comunicación con todo el territorio nacional empleando directa e indirectamente las tecnologías espaciales de telecomunicaciones, así como la implementación y aprovechamiento de tecnologías aplicadas a la navegación terrestre, aérea, fluvial y marítima; y por otra el uso de información proveniente de sensores remotos para la observación de la Tierra, de manera tal que aumenten la productividad, eficiencia y competitividad de los diferentes sectores de la economía que demandan información geoespacial. Está conformada por una plenaria, una secretaria ejecutiva, grupos de trabajo y comités técnicos. La plenaria es presidida por el vicepresidente de la república siendo este el máximo órgano de decisión y coordinación.

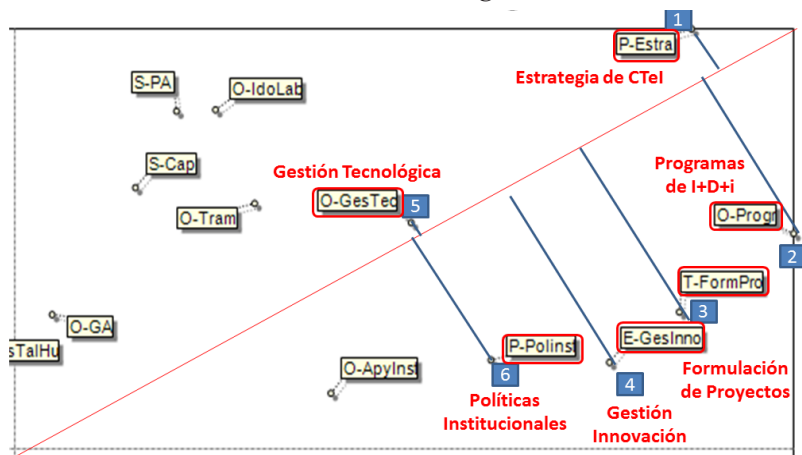
El sector espacial en la actualidad cuenta con infraestructura para el desarrollo de tecnologías espaciales, las universidades no cuentan con el conocimiento necesario en estas áreas para el desarrollo de esta industria que pueda apoyar el desarrollo de proyectos de defensa en esta área.

El desarrollo de este tipo de tecnologías requiere de presupuestos elevados y un programa a largo plazo financiado por el gobierno nacional para la obtención de la infraestructura y el capital humano que se requiere. Entendiéndose la posición geoestratégica que tiene el país y las ventajas militares y civiles que genera poder acceder al espacio bajo propios medios.

4.2 Variables estratégicas

Con el gráfico anterior, se determinó la zona de enlaces, como lo muestra la Figura 12, en la cual la dependencia es suficientemente fuerte para que la Dirección de Ciencia, Tecnología e Innovación, y el Comando de la Fuerza Aérea Colombiana pueda trabajar en estas variables y su influencia tiene la importancia necesaria para generar transformaciones importantes en el proceso, por su impacto estratégico.

Figura 12. *Influencia y dependencia indirecta-Estado Futuro I+D+i / Variables Estratégicas*

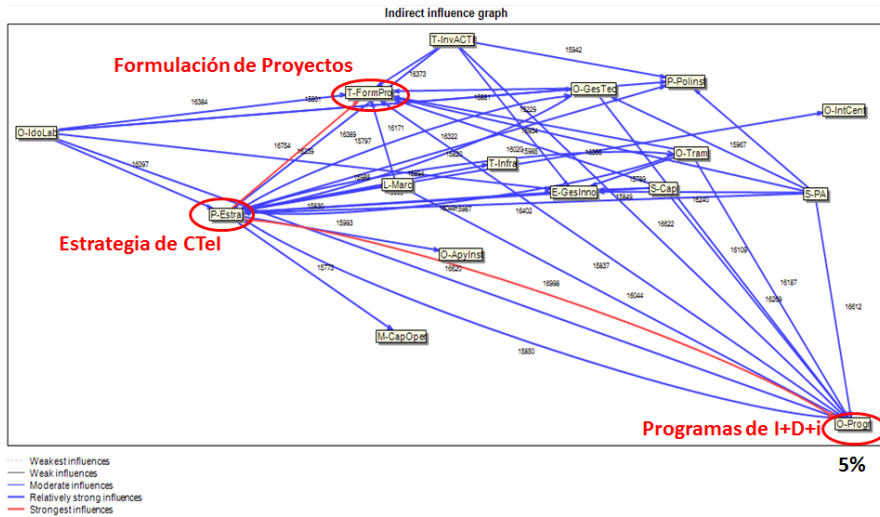


Fuente: elaboración propia.

A partir del análisis de este cuadrante se establecieron las siguientes variables estratégicas, como aparecen en la Figura 13:

1. Estrategia de CTel
2. Programas de I+D+i
3. Formulación de proyectos
4. Gestión de Innovación
5. Gestión tecnológica
6. Políticas institucionales

Figura 13. *Influencia indirecta- Variables Estratégicas*



Fuente: Elaboración propia.

A partir de esta gráfica se concluye:

- El desarrollo de una estrategia de Ciencia, Tecnología e Innovación, es la variable más influyente en la mayoría de las variables, principalmente en los programas de I+D+i y la Formulación de Proyectos, coherentemente debido a que estos dos factores deben estar desarrollados con base a uno varios objetivos institucionales y se deben desarrollar para dar cumplimiento a la estrategia que se plantee.
- Muchas variables como el perfil académico e infraestructura influyen en gran parte de las variables de enlace hecho que se debe tener en cuenta para fortalecer el desarrollo de las mismas.
- La variable de programas estratégicos influye en diferentes aspectos, como capacitación, infraestructura, gestión tecnológica y la gestión de la innovación entre otras. Obligando a una reestructuración de esta variable para agilizar el proceso de transformación del sistema de Ciencia, Tecnología e Innovación.
- La formulación de proyectos es una variable que es influenciada por otras variables del sistema debido a que al momento de generar la formulación de un proyecto se deben tener en cuenta las capacidades actuales y las que se requieren en un futuro.

Estado actual variables estratégicas

Como se muestra en la Tabla 3, se realiza una definición del estado actual de las que se definieron como variables estratégicas.

Tabla 3. *Variables y objetivos estratégicos*

N°	Nombre largo	Nombre corto	Definición	Grupo	Objetivos estratégicos
1	Estrategia de CTeI	P-Estra	Conjunto de las acciones que realizan los grupos de trabajo de manera consensuada para la resolución de problemas o la mejora continua del SCTeI, para la consecución de recursos de infraestructura, personal y financieros para la ejecución de la hoja de ruta de los programas de I+D+i.	Político	Fomentar el conjunto de acciones que realizan los grupos de trabajo de manera consensuada para la resolución de problemas o la mejora continua del SCTeI, para la consecución de recursos de infraestructura, personal y financieros para la ejecución de la hoja de ruta de los programas de I+D+i.
2	Programas de I+D+i	O-Progr	Programas de I+D+i de acuerdo con objetivos estratégicos de la FAC, para el dominio del Aire y el Espacio liderados por la FAC	Organizacional	Desarrollar los programas de I+D+i de acuerdo a objetivos estratégicos de la FAC para el dominio del espacio, el Aire y el ciberespacio liderados por la FAC

N°	Nombre largo	Nombre corto	Definición	Grupo	Objetivos estratégicos
3	Formulación de Proyectos	T-FormPro	Capacidad de Formulación de Proyectos de I+D+i con todos los criterios técnicos que permitan disminuir riesgos de fracaso y aumentar las posibilidades de éxito	Tecnológico	Desarrollar las capacidades de Formulación de Proyectos de I+D+i con todos los criterios técnicos y económicos que permitan disminuir riesgos de fracaso y aumentar las posibilidades de éxito
4	Gestión Innovación	E-GesInno	Proceso para llevar al mercado las tecnologías producidas por la FAC con aplicación dual que permita el desarrollo económico y social del país.	Económico	Diseñar el proceso para llevar al mercado las tecnologías producidas por la FAC con aplicación dual que permita el desarrollo económico y social del país.
5	Gestión Tecnológica	O-GesTec	Conjunto de conocimientos y actividades capaces de generar valor por medio de un uso tecnológico eficaz, que permitan una producción y administración más efectiva en la ejecución de sus tareas y por ende se aumente la competitividad organizacional en el mercado.	Organizacional	Establecer el conjunto de procesos para gestionar el conocimientos y actividades capaces de generar valor para la creación de tecnologías militares de uso dual, que permitan una producción y administración más efectiva en la ejecución de tareas y recursos que aumenten la competitividad organizacional de la FAC.

N°	Nombre largo	Nombre corto	Definición	Grupo	Objetivos estratégicos
6	Políticas Institucionales	P-Polinst	Lineamientos políticos institucionales de la FAC a corto, mediano y largo plazo, en el que se planeen, desarrollen y gestionen actividades en pro de la ciencia, la tecnología y la Seguridad y Defensa que redunden en el cumplimiento de los objetivos e intereses nacionales	Político	Formalizar los lineamientos políticos institucionales de la FAC a corto, mediano y largo plazo, en el que se planeen, desarrollen y gestionen actividades en pro de la ciencia y la tecnología para la Seguridad y Defensa de la nación en los ámbitos del aire, el espacio y el ciberespacio, que redunden en el cumplimiento de los objetivos e intereses nacionales

Fuente: elaboración propia.

Con base en las variables, la matriz de influencias y dependencias entre actores se desarrollan también las convergencias entre tres actores principalmente: Gobierno, Congreso y Comando de la Fuerza Aérea Colombiana. Identificando que estos tres actores son los que generan una mayor influencia a los objetivos estratégicos, ya que cuentan con la suficiente ponderación para alterar el sistema de Ciencia, Tecnología e Innovación y determinar el rumbo los programas de CTel, en su sostenibilidad, financiación y direccionamiento.

Entre los actores que presentan convergencias más débiles, están las instituciones como los países Alineados y no alineados, los clústeres aeronáuticos, los fabricantes y proveedores de la FAC, las organizaciones internacionales civiles y militares, CAF, COP, COA, JEA, DICTI MDN. Esto refleja que, si bien pueden ser importantes en relación con los objetivos estratégicos, su posición puede ser tanto favorable como desfavorable dependiendo del contexto, que se vean más vulnerables a actores como los de fuerte convergencia.

Como conclusión es importante buscar estrategias para contrarrestar las posibles amenazas que representan actores para el cumplimiento de los objetivos estratégicos de la FAC en los temas de Ciencia, Tecnología e Innovación, para poder alcanzar el escenario apuesta. Como el asignar la responsabilidad de la toma de decisiones sobre estos temas en la FAC al nivel más alto de la organización (COFAC).

Resultados Análisis morfológico

El objetivo de realizar este análisis morfológico es encontrar escenarios posibles a través del planteamiento de hipótesis en función a las variables estratégicas como se relaciona a continuación en la Tabla 4.

Tabla 4. Hipótesis de futuro a partir de las variables estratégicas

Variables estratégicas	Actual Escenario 0: Challenger	H-1 Columbia - Laika	H-2 Laika - Gagarin	H-3 Amstrong
Estrategia de CTeI	No se tiene estrategia específica para la guía de los programas 10%	Se desarrolla en 50% cuando la FAC logre crear e implementar la estrategia para el desarrollo de la I+D+i y la generación de una ventaja militar con el fortalecimiento del poder aéreo nacional.	Se desarrolla en 70% Cuando el MDN en coordinación con la FAC, adopte la estrategia para la generación de una ventaja militar a través del I+D+i, disponiendo los medios y desarrollando las capacidades necesarias (infraestructura y equipos, personal y recursos económicos)	Se desarrolla en 85% cuando se den las condiciones de una estrategia nacional de defensa en I+D+i, liderada por el MDN y las entidades relacionadas en cada una de las apuestas nacionales estratégicas que se planteen.
	Los programas no tienen hojas de ruta ni están orientados bajo objetivos estratégicos 10%	Se desarrollan al 30% mediante el financiamiento, presupuesto y desarrollo de investigadores FAC	Se desarrollan al 60% mediante la vinculación e integración de universidades	Se desarrollan al 80% con la integración del sector empresarial, universidades y apuestas nacionales que promuevan la participación de la TRIPLE HELICE en I+D+i.
Formulación de Proyectos	40%, Se tienen procesos, procedimientos, instructivos, guías y formatos útiles para la formulación y desarrollo de proyectos	Se desarrollan al 50% formulando proyectos a corto, mediano y largo plazo con el financiamiento FAC	Se desarrollan al 60% formulando proyectos a corto, mediano y largo plazo con el financiamiento FAC y otras organizaciones e instituciones nacionales e internacionales integrando la participación de las universidades y centros de investigación.	Se desarrollan al 80% con la formulación de proyectos entre actores del sector empresarial, universidades y apuestas nacionales que conformen la TRIPLE HELICE en I+D+i, donde la FAC actúe como líder de proyecto e inversionista de capital de riesgo a nivel nacional e internacional, para obtener tecnologías y conocimiento que permitan generar ventajas militares con el fortalecimiento del componente físico del poder aéreo.
	Identificación aleatoria de necesidades para la formulación de proyectos a corto plazo.	Se desarrollan al 50% formulando proyectos a corto, mediano y largo plazo con el financiamiento FAC y la alineación a las hojas de ruta de los programas estratégicos.	Se desarrollan al 60% formulando proyectos a corto, mediano y largo plazo con el financiamiento FAC y otras organizaciones e instituciones nacionales e internacionales integrando la participación de las universidades y centros de investigación.	Se desarrollan al 80% con la formulación de proyectos entre actores del sector empresarial, universidades y apuestas nacionales que conformen la TRIPLE HELICE en I+D+i, donde la FAC actúe como líder de proyecto e inversionista de capital de riesgo a nivel nacional e internacional, para obtener tecnologías y conocimiento que permitan generar ventajas militares con el fortalecimiento del componente físico del poder aéreo.

Variables estratégicas	Actual Escenario 0: Challenger	H-1 Columbia - Laika	H-2 Laika – Gagarin	H-3 Amstrong
Gestión Innovación	20%, Se tienen procedimientos en construcción para llevar al mercado tecnologías desarrolladas por la FAC.	Se desarrollan al 40% mediante el diseño, implementación y apropiación de un modelo de innovación para la FAC, que vincule la propiedad intelectual como base para el desarrollo de capacidades de comercialización de tecnologías.	Se desarrollan al 60% con la alineación de productos resultado del modelo de innovación FAC, que sean entregados al Departamento de Transferencia de Tecnología (DTT-MDN) para su alistamiento y posterior comercialización.	Se desarrollan al 80% con la generación de recursos de forma sistemática a través de los activos de propiedad intelectual desarrollados por la FAC, y que mediante la transferencia de tecnologías se puedan generar ingresos y utilidades para el crecimiento del sistema nacional de ciencia, tecnología e innovación, así como el fortalecimiento del sector productivo aeronáutico y espacial colombiano.
	40%, Se tienen procedimientos para la generación de productos de I+D, además de las gestiones para asignación de recursos, a través de la formalización de doctrina en el concepto de gestión.	Se desarrollan al 50% mediante la reestructuración organizacional del sistema de ciencia, tecnología e innovación de la FAC, donde se depuren, diferencien y se integren las capacidades de los centros con las capacidades de la FAC, para generar procesos de I+D eficientes.	Se desarrollan al 70% mediante el fortalecimiento de la infraestructura del capital humano y la asignación de recursos de forma recurrente, que permitan el aseguramiento y desarrollo de productos tecnológicos desde los centros de investigación definidos.	Se desarrollan al 80% con la formulación y ejecución de proyectos entre actores del sector empresarial, universidades y apuestas nacionales que conformen la TRIPLE HELICE en I+D+i, generando inversión de riesgo para obtener la ventaja militar requerida.

Variables estratégicas	Actual Escenario 0: Challenger	H-1 Columbia - Laika	H-2 Laika – Gagarin	H-3 Amstrong
Políticas Institucionales	Se tiene el documento del modelo de investigación donde se expone la doctrina básica para la I+D+i, (MAINV) 20%	Se desarrollan al 40% mediante la socialización e interiorización del MAINV, como apropiación de cultura institucional investigativa dentro de las IES y los GRUTE, así como la programación y presupuestación anual para el desarrollo de los programas de estratégicos.	Se desarrollan al 60% mediante la formalización de la estrategia en I+D+i por parte del comando de la Fuerza, además de la alineación del conocimiento que produce la Fuerza a la estrategia de C'Tel, con la convergencia de necesidades hacia los centros de investigación para su formulación y desarrollo de proyectos.	Se desarrollan al 80% mediante la formulación e implementación de políticas para el desarrollo del sector aeronáutico y espacial con la TRIPLE HELICE.

Fuente: elaboración propia.

Ruta de escenario en los ejes de Peter Schwartz

A través de este método se busca ubicar los 4 escenarios futuros posibles y determinar la ruta para el escenario apuesta como lo muestra la Figura 14. Se analizaron las variables estratégicas y se agruparon en dos grupos de direccionamiento donde confluyen las variables de la siguiente manera:

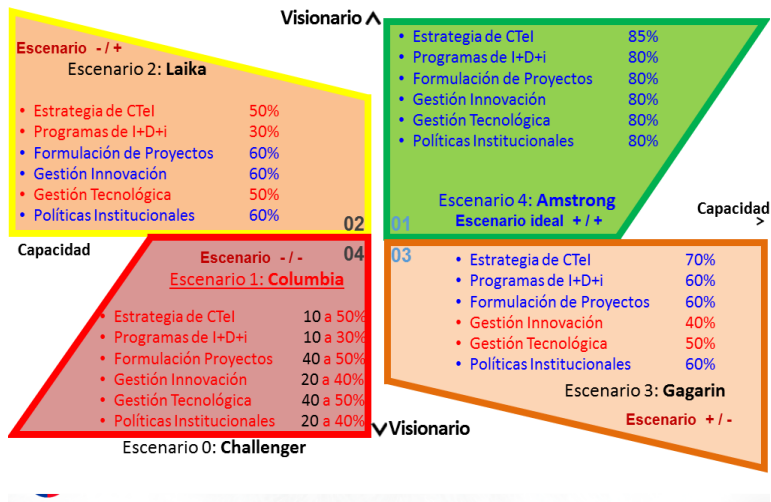
Figura 14. Ejes de Peter Schwartz de I+D+i



Fuente: elaboración propia.

Obteniendo con esto una proyección de los escenarios como se muestra en la Figura 15, donde se pueden observar los porcentajes posibles de cumplimiento de los objetivos de cada variable estratégica por cada uno de los escenarios planteados, así:

Figura 15. Relación porcentual de los Ejes de Peter Schwartz de I+D+i



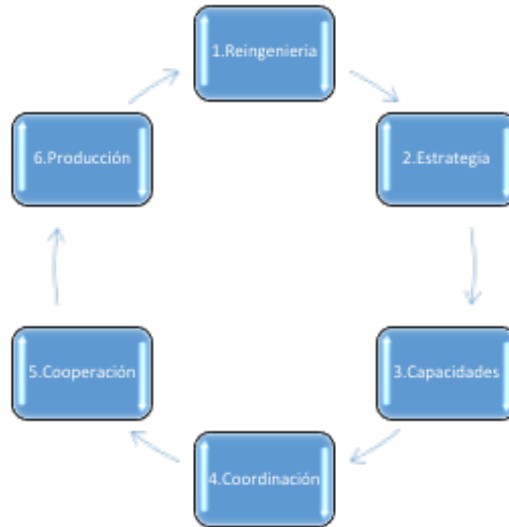
Fuente: elaboración propia.

Estrategias

Con el fin de alcanzar el objetivo de proyectar los resultados e impacto del SCTeI hacia el desarrollo espacial y teniendo en cuenta el análisis estructural realizado, el juego de actores y los escenarios propuestos, se establecen seis estrategias para alcanzar los objetivos que afectan las variables estratégicas, como lo muestra la Figura 16.

Como resultado del estudio prospectivo, se plantea el Hexágono de la Estrategia CTel, en los siguientes vértices de trabajo:

Figura 16. *Hexágono de la Estrategia en I+D+i*



Fuente: elaboración propia.

- 1. Reingeniería:** Reingeniería organizacional de la CTel.
- 2. Estrategia:** Análisis, Diseño, Desarrollo, Implementación y Evaluación (ADDIE) de programas estratégicos y hojas de ruta a corto (2-5 años), mediano (5-10 años) y largo plazo (10-20 años).
- 3. Capacidades:** Asignación del talento humano especializado, adecuación de infraestructura física y tecnológica, dotación de equipos y herramientas.
- 4. Coordinación:** Coordinación e integración de capacidades a través de un inventario tecnológico para el fomento, formulación, desarrollo y evaluación de proyectos acorde a los programas estratégicos y metas de corto, mediano largo plazo en **CTel**.
- 5. Cooperación:** Generación y desarrollo de alianzas estratégicas para la cooperación y el trabajo colaborativo a nivel nacional, regional e internacional mediante la formalización de redes tetralaterales, entre universidad, empresa, estado y sociedad, (TETRAHELICE)
- 6. Producción:** Producción tecnológica mediante la eficiencia en la transferencia de tecnología, estimulación a la investigación y generación de ingresos al **CTel**.

De acuerdo con los resultados obtenidos y tomando como base el ***Hexágono de la Estrategia CTeI***, a continuación, se detallan los aspectos a desarrollar en cada una de las estrategias para su desarrollo e implementación.

- Estrategia de Reingeniería

Reingeniería organizacional de la CTeI.

Se propone la creación del Departamento de Estado Mayor de Ciencia, Tecnología, e Innovación, que cumpliría la siguiente misión y se estructuraría como se expone a continuación:

- a. Observatorio de Ciencia y Tecnologías Aeroespaciales para la Defensa**
- b. Centro de I+D en Seguridad y Defensa Aeroespacial**
- c. Centro de Tecnologías Espaciales**
- d. Dirección Implementación e Ingeniería Concurrente**
- e. Dirección de Gestión Tecnológica**
- f. Dirección Desarrollo de la Industria Aeroespacial**

- Estrategia ADDIE

Se propone el Análisis, Diseño, Desarrollo, Implementación y Evaluación (ADDIE) para los programas estratégicos establecidos en el Manual de Investigación de la Fuerza Aérea MAINV, pero enfocados en unas hojas de ruta que permitan la obtención de logros a corto (2-5 años), mediano (5-10 años) y largo plazo (10-20 años).

Para esto se propone trabajar en la creación de las hojas de ruta con personal experto a nivel nacional e internacional de las instituciones de educación superior, empresarios, centros de investigación, la CIAC, INDUMIL, CODALTEC y personal de entidades del gobierno como MINCIENCIAS, Ministerio de Industria y Comercio y el Ministerio de Educación. Este trabajo requiere de un equipo especializado por parte de la fuerza con conocimiento en cada uno de los programas que lidere el desarrollo de las hojas de ruta de forma incluyente con la participación de diferentes actores para lograr un fuerte apoyo de la sociedad, y de esta forma garantizar el flujo continuo de recursos.

- Estrategia de Capacidades

Se plantea la creación de una comisión de exploración compuesta por empresarios, universidades y personal de la FAC, que realice visitas a diferentes países referentes en CTel como Brasil, EEUU, Reino Unido, Francia, China. Para determinar cuál podría ser el mejor modelo para integrarnos entre la triada Universidad, Empresa y Estado, evaluar qué infraestructura, personal e inversión se requerirá para el desarrollo eficiente de los programas de CTel. Asignación del talento humano especializado, adecuación de infraestructura física y tecnológica, dotación de equipos y herramientas de forma sostenible para generar un funcionamiento sistemático y sostenible de la Ciencia, la Tecnología y la Innovación en la Fuerza Aérea, que permitan generar ventajas militares para el dominio del Aire, el Espacio y el Ciberespacio, llegando a otorgarle al Sistema de Ciencia, Tecnología e Innovación las siguientes capacidades.

Capacidades SCTel

- Validación de adquisiciones tecnológicas de la FAC
- Articulación de los actores de la triple hélice y realización de alianzas estratégicas para CTel
- Control de los créditos OFFSET para la obtención de capacidades en CTel para estimular la independencia tecnológica y el crecimiento
- Prospectiva de tecnologías a corto, mediano y largo plazo
- Estructuración y desarrollo de programas estratégicos de CTel y sus hojas de ruta.
- Desarrollo, seguimiento y control de proyectos estratégicos de I+D+I
- Alistamiento para transferencia de tecnologías de la FAC
- Implementación de tecnología en la FAC
- Generar ventajas militares a través del fortalecimiento del componente físico del poder aéreo
- Liderar los procesos necesarios para impulsar la independencia tecnológica de la FAC.

- Estrategia de Coordinación

Coordinación e integración de capacidades a través de un inventario tecnológico de la Fuerza Aérea Colombiana para el fomento, formulación, desarrollo y evaluación de proyectos acorde a los programas estratégicos y metas de corto, mediano largo plazo en CTel.

Alineación del conocimiento producido en los Grupos Técnicos y CAMAN con el sistema de CTel, para determinar productos innovadores y con oportunidad de comercializar para realizar la protección de propiedad intelectual y estimular a los generadores del conocimiento con beneficios generados por los procesos de comercialización.

Utilizar el mecanismo de los OFFSET para enfocarse en el desarrollo de los programas de CTel adquirir capacidades de CTel y crear capacidades centralizadas para generar independencia tecnológica, autonomía institucional y proteger los recursos de los colombianos al evitar la salida de divisas hacia el exterior, fortaleciendo el compromiso social de la FAC al reinvertir estos recursos en el desarrollo de la industria nacional, las universidades, la ciencia y la tecnología, que retorna a la FAC mediante el fortalecimiento del componente físico del poder aéreo nacional y la generación de nuevas tecnologías de fácil acceso que crean ventajas militares.

- Estrategia de Cooperación

Generación y desarrollo de alianzas estratégicas para la cooperación y el trabajo colaborativo a nivel nacional, regional e internacional mediante la formalización de redes tetralaterales, entre Universidad, Empresa, Estado y Sociedad, (TETRA HÉLICE), que permita el apoyo de estos actores y la perdurabilidad en el tiempo.

Generar una política institucional que se debe reflejar a nivel ministerial y gubernamental para el desarrollo del sector aeronáutico y espacial en el país, cobijado bajo el concepto de generación de riqueza al estimular el proceso de Ciencia, Tecnología e Innovación que integre los actores de la Triple Hélice, genere puestos de trabajo e ingreso de divisas a la economía nacional y afianzar las economías y sociedades del conocimiento en el país.

Establecer una oficina en el ministerio de defensa para promover la conexión con el sector empresarial y las universidades de forma eficiente que tenga la capacidad de tomar decisiones de asociación alineadas a los programas del SCTel, así mismo que permita establecer contacto para disponer de instalaciones y recursos de la FAC en beneficio del desarrollo de las actividades científicas y desarrollo económico e industrial del sector aeroespacial.

- Estrategia de Producción

Producción tecnológica mediante la eficiencia en la transferencia de tecnología, estimulación a la investigación y generación de ingresos al CTeI, usando el modelo de transferencia establecido por el MDN por la DTT, y la generación de convenios de comercialización, fortaleciendo la cooperación comercial y el crecimiento de la economía al estimular la industria nacional.

Establecer un modelo de Gestión de la Innovación eficiente que permita la generación de activos de propiedad intelectual de uso dual transferibles a la industria.

Conclusiones

El estudio confirma que el desarrollo espacial es un factor estratégico para la seguridad, la competitividad y el progreso científico. Mientras potencias globales y algunos países latinoamericanos han convertido la actividad espacial en política de Estado, Colombia aún enfrenta limitaciones como la baja inversión en I+D+i, la ausencia de una estrategia nacional de largo plazo y la débil articulación entre universidad, empresa y Estado. Programas como FACSAT representan un avance, pero resultan insuficientes frente a los desafíos del entorno internacional.

La fase de caracterización permitió identificar tendencias globales, regionales y nacionales, así como las brechas que enfrenta Colombia en materia de capacidades espaciales. Con base en ello, la fase de generación de estrategias aportó un marco prospectivo para superar dichas limitaciones, mediante la aplicación de metodologías como MIC MAC, MACTOR y el análisis morfológico. El resultado fue la formulación del Hexágono Estratégico de CTeI, que integra seis líneas clave: reingeniería organizacional, programas estratégicos, talento humano, coordinación de capacidades, cooperación internacional y producción tecnológica.

De esta manera, el estudio no solo diagnostica la situación actual, sino que propone rutas concretas para fortalecer la soberanía tecnológica y la competitividad del país. Se recomienda consolidar una Estrategia Nacional de Desarrollo Espacial como política de Estado, incrementar la inversión en I+D+i, impulsar la formación de capital humano especializado y fomentar la

cooperación internacional. Asimismo, se debe preparar al país frente a los nuevos retos globales: megaconstelaciones satelitales, ciberseguridad espacial, gestión de desechos orbitales y explotación de recursos extraterrestres.

Adicionalmente, el Sistema de Ciencia, Tecnología e Innovación (SCTeI) de la Fuerza Aeroespacial Colombiana debe estructurar una estrategia basada en programas estratégicos que cuenten con hojas de ruta tecnológicas claras, orientadas a obtener logros y ventajas militares en el corto, mediano y largo plazo. Para ello, se requiere una partida presupuestal anual que garantice continuidad y sostenibilidad, así como una reestructuración estratégica que coloque al SCTeI bajo la dirección del Comando de la Fuerza, asegurando la asignación de personal, infraestructura y recursos que respalden su impacto transversal en el cumplimiento de la misión institucional.

El éxito de estos programas depende de fortalecer la integración con los actores de la triple hélice nacional —universidades, empresas y Estado— generando proyectos conjuntos que impulsen el crecimiento de la industria aeronáutica y espacial, fomenten nuevas compañías de base tecnológica, creen empleo y reduzcan la dependencia de importaciones. En este proceso, la FAC debe desempeñar un rol protagónico en la economía del conocimiento, estimulando la innovación y la sustitución de repuestos y componentes que pueden desarrollarse en el país. Además, la participación de la CIAC, CODALTEC, INDUMIL, clústeres y cámaras de comercio permitirá consolidar una visión país y posicionar a estas compañías como líderes de la industria aeroespacial nacional.

Finalmente, el SCTeI debe transformar las variables y actores dominados en un sistema generador de conocimiento continuo, sostenible y perdurable, apoyado por relaciones de interdependencia con empresas del sector defensa. Este esfuerzo debe complementarse con el fortalecimiento de una Dirección de Transferencia de Tecnología (DTT), que permita dinamizar la comercialización de activos de propiedad intelectual y generar ingresos adicionales. De esta forma, la FAC no solo consolidará ventajas tecnológicas y militares, sino que también contribuirá al desarrollo económico y a la consolidación de Colombia como actor relevante en la industria aeroespacial.

En conclusión, la integración de la caracterización con la propuesta estratégica ofrece un camino estructurado y viable para que Colombia transforme el espacio en un motor de innovación, defensa y desarrollo económico.

Referencias bibliográficas

- Air Force Research Laboratory. Accedido 3 de mayo de 2019. <https://afresearchlab.com/>.
- Andress, J., & Winterfeld, S. (2011). The Cyberspace Battlefield. *Cyber Warfare*, 19–36. <https://doi.org/10.1016/b978-1-59749-637-7.00002-2>
- Álvarez, J., & Walls, B. (2016). Constellations, Clusters, and Communication Technology : Expanding Small Satellite Access to Space.
- Cabello, E. C. (2001). Los sistemas de mando y control: una visión histórico-prospectiva. *Boletín de Información*, (271), 3.
- Campbell, 2018; CARI, 2013; Chen, Tan, & Yang, 2012; De & Ciberseguridad, 2016; ENISA, 2019; Force & Command, 2019; Goodman, Kirk, & Kirk, 2007; Haddow, Bullock, & Coppola, 2017; Herrera & Maennel, 2019; Latina & El Caribe, 2018; Lu et al., 2018; Pastrana, Tapiador, Orfila, & Peris-Lopez, 2015; Robinson, Jones, Janicke, & Maglaras, 2018; SENATICS, 2017)
- Campbell, P. (2018). Generals in Cyberspace: Military Insights for Defending Cyberspace. *Orbis*, 62(2), 262–277. <https://doi.org/10.1016/j.orbis.2018.02.006>
- CARI. (2013). Ciberdefensa-Ciberseguridad Riesgos y Amenazas. *Cari. Org.* Retrieved from http://www.cari.org.ar/pdf/ciberdefensa_riesgos_amenazas.pdf
- C4ISR Architecture Working Group (AWG) C4ISR Architecture Framework Version 2.0. (1997). Retrieved from <https://www.afcea.org/education/courses/archfwk2.pdf>
- Chen, H., Tan, Z., & Yang, G. (2012). Discussion on “Outstanding Engineers” Training Program for Information Security Major in China. *IERI Procedia*, 2, 868–872. <https://doi.org/10.1016/j.ieri.2012.06.184>
- Daniela, L., & Rojas, T. (2018). El Ciberespacio Como Escenario Estratégico De Seguridad Y, 1–37.
- DARPA. Accedido 1 de mayo de 2019. <https://www.darpa.mil/about-us/about-darpa>.

- DCTA. Accedido 1 de mayo de 2019. <http://www.cta.br/index.php/uni-dades-subordinadas>.
- Department of Defense. (2018). *Military and Security Developments Involving the People's Republic of China 2018*. Recuperado de <https://media.defense.gov/2018/Aug/16/2001955282/-1/-1/1/2018-CHINA-MILITARY-POWER-REPORT.PDF>
- De, O., & Ciberseguridad, L. A. (2016). Ciberseguridad ¿Estamos preparados en América Latina y el Caribe? Mejorando vidas. Retrieved from www.observatoriociberseguridad.com
- Elyssa Pachico. (2019). 3 recomendaciones para la lucha de Colombia contra el crimen cibernético, 1–5.
- ENISA. (2019). *ENISA Threat Landscape Report 2018*. <https://doi.org/10.2824/622757>
- European Commission. (2017). The New European Interoperability Framework | ISA2. Retrieved August 20, 2018, from https://ec.europa.eu/isa2/eif_en
- Federation of American Scientist. (2019). Intercontinental Ballistic Missiles. Recuperado 7 de mayo de 2019, de <https://fas.org/nuke/intro/missile/icbm.htm>
- Force, A., & Command, S. (2019). Twenty-First Century Deterrence in the Space War-Fighting Domain, 34–49.
- FAC, (2018). Manual del modelo de investigación del sistema educativo de la Fuerza Aérea Colombiana, (MAINV) FAC 6-05 (Público), Primera Edición. Dirección de Ciencia, Tecnología e Innovación, 1–73.
- Gibson, Alan S. USAF. Applied hypergame theory for network defense. Department of the air force air university. Air force institute of technology. Wright-Patterson Air Force Base, Ohio. 2013.
- Government of India Ministry of Communications and Information Technology New Delhi. (2015). Interoperability Framework for e-Governance (IFEG) in India. New Delhi. Retrieved from: <http://egovstandards.gov.in/sites/default/files/InteroperabilityFramework-Fore-Governance%28IFEG%29 Ver.1.0.pdf>
- Goodman, S. E., Kirk, J. C., & Kirk, M. H. (2007). Cyberspace as a medium for terrorists. *Technological Forecasting and Social Change*, 74(2), 193–210. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2006.07.007>

- Internacional Metalmecánica. (2019). Los materiales aeroespaciales del futuro. Recuperado 7 de mayo de 2019, de <http://www.metalmecanica.com/temas/Los-materiales-aeroespaciales-del-futuro+122195>
- Haddow, G. D., Bullock, J. A., & Coppola, D. P. (2017). *Emergency Management and the Terrorist Threat. Introduction to Emergency Management*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-803064-6.00009-3>
- Herrera, L. C., & Maennel, O. (2019). A comprehensive instrument for identifying critical information infrastructure services. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 25, 50–61. <https://doi.org/10.1016/j.ijcip.2019.02.001>
- Hurst, J. (2019). Small Unmanned Aerial Systems and Tactical Air Control. *Air and Space Power Journal*, 33(1), 19–33. Retrieved from <https://www.airuniversity.af.edu/ASPJ/Display/Article/1743940/volume-33-issue-1-spring-2019/>
- INECO. Consultada en 30-04-2019 en <https://www.ineco.com/webineco/mercados/navegacion-aerea/sesar-cielo-%C3%BAnico-europeo>
- Justicia, M. de I. y de, Exteriores, M. de R., Nacional, M. de D., Comunicaciones, M. de T. de la I. y las, Seguridad, D. A. de, Planeación-DJSG-DIFP-DIES-OI, D. N. de, & General, F. (2016). Política Nacional de Seguridad Digital. *CONPES 3854 - Política Nacional de Seguridad Digital*, 91. Retrieved from <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econmicos/3854.pdf>
- Latina, A., & El Caribe, Y. (2018). Protección De La Infraestructura Crítica En Liang, S. X., Reibling, L. A., Betts, J., Liang, S. X., Reibling, L. A., & Betts,
- Lisboa, A., & Soares, D. (2014). E-government Interoperability Frameworks: A Worldwide Inventory.
- Lu, P., Wang, Z., Nie, S., Pujia, W., Lu, P., & Chen, B. (2018). Exploring the participate propensity in cyberspace collective actions: The 5% rule. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 503, 582–590. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2018.02.152>
- Manzano Guerrero, J. (2006). Evolución de los Sistemas de Mando y Control: Interoperabilidad e integración. *Revista Seguridad y Defensa Tecnologías Avanzadas*.

- Mahmoud, M. S., & Xia, Y. (2019). *Cyberphysical Security Methods. Networked Control Systems*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-816119-7.00017-4>
- Maule, R. W., & Lewis, W. C. (2009). Risk Management Framework for Service-Oriented Architecture. In 2009 IEEE International Conference on Web Services (pp. 1000–1003). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICWS.2009.136>
- MIT Lincoln Laboratory». Accedido 1 de mayo de 2019. <https://www.ll.mit.edu/about>.
- McMullan, T. (2019, marzo 19). *Cómo los enjambres de drones cambiarán la estrategia de las guerras del futuro*. Recuperado de <https://www.bbc.com/mundo/noticias-47595525>
- Ministerio de Defensa de Chile. (2019). División Desarrollo Tecnológico e Industria - Subsecretaría de Defensa - Gobierno de Chile. Recuperado 7 de mayo de 2019, de http://www.ssdefensa.cl/division_desarrollo_tecnologico_e_industria.html
- Ministerio de Defensa España. (2019). Sensores y sistemas electrónicos. Recuperado 7 de mayo de 2019, de https://www.tecnologiaeinnovacion.defensa.gob.es/es-es/Estrategia/HojasDeRuta/Paginas/Sensores_SE.aspx
- Ministerio de Defensa de España. Accedido 3 de mayo de 2019 <https://www.tecnologiaeinnovacion.defensa.gob.es/es-es/Presentacion/OrganizacionID/Paginas/Defensa.aspx>.
- Monforte, M., Hinarejos Rojo, A., & Herrero Santos, C. (2010). Introducción a los sistemas de información para el mando y control militar. Ministerio de Defensa, Subdirección General de Documentación y Publicaciones. Retrieved from <http://www.infodefensa.com/es/2011/02/17/libro-introduccion-a-los-sistemas-de-informacion-para-el-mando-y-control-militar.html>
- Mora, J. P. (1993). La proliferación de misiles balísticos tácticos en el Oriente Medio. *Boletín de Información*, (230), 43-67.
- National Institute of Standards and Technology. (2018). *Framework for improving critical infrastructure cybersecurity* (Version 1.1). U.S. Department of Commerce. https://www.nist.gov/sites/default/files/documents/2017/12/05/draft-2_framework-v1-1_without-markup.pdf

- Office of t, R., O'Neill, D., Barry, P., Renner, S., & Wandelt, J. (2010). XML standards as the basis for data interoperability among military C2 systems and beyond. In 2010 - MILCOM 2010 MILITARY COMMUNICATIONS CONFERENCE (pp. 231–236). IEEE. <https://doi.org/10.1109/MILCOM.2010.5680356>
- Pastrana, S., Tapiador, J. E., Orfila, A., & Peris-Lopez, P. (2015). DEFID-NET: A framework for optimal allocation of cyberdefenses in Intrusion Detection Networks. *Computer Networks*, 80, 66–88. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2015.01.012>
- Pérez Llopis, I. (2009). Arquitectura de un sistema C4ISR para pequeñas unidades. Riunet. Universitat Politècnica de València, Valencia (Spain). <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/6067>
- Pérez-Salas, C. P. (2008). Realidad Virtual: Un Aporte Real para la Evaluación y el Tratamiento de Personas con Discapacidad Intelectual. *Terapia psicológica*, 26(2), 253-262. <https://doi.org/10.4067/S0718-48082008000200011>
- Planeación, D. N. de. (2011). Documento Conpes 3701 de julio 14 de 2011, 43. Retrieved from <http://www.mintic.gov.co/index.php/docs-normatividad?task=download.file&fid=46.741&sid=54>
- Procedia Technology, 16, 638–648. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2014.10.012>
- Pullen, J., Hieb, M., Sudnikovich, W., & Champs, P. (2006). An International Experiment in Command and Control -- Simulation Interoperability Using Web Services. 2006 Tenth IEEE International Symposium on Distributed Simulation and Real-Time Applications, 235–241. <https://doi.org/10.1109/DS-RT.2006.9>
- Robinson, M., Jones, K., Janicke, H., & Maglaras, L. (2018). Developing cyber peacekeeping: Observation, monitoring and reporting. *Government Information Quarterly*, (December), 0–1. <https://doi.org/10.1016/j.giq.2018.12.001>
- Red de ingeniería de Software de Latinoamérica. (n.d.). *Revista latinoamericana de ingeniería de software*. Retrieved from <http://www.seguridad-internacional.es/?q=es/content/estrategias-nacionales-de-ciberseguridad-en-américa-latina>

- Rodríguez, B., García, B., & Cruza, F. (2017). *Análisis de Viabilidad de Despliegues Anti-Dron Basados en Tecnologías de Última Generación*. 8.
- Rodríguez, G. W. (2017). *Diseño π : Gestión Tecnológica para el Diseño de Proyectos de Ingeniería* (Colección). Bogotá: Escuela de Postgrados Fuerza Aérea Colombiana.
- Sancho, C. (2017a). Ciberseguridad. Presentación del dossier/Cybersecurity. Introduction to Dossier. *URVIO - Revista Latinoamericana de Estudios de Seguridad*, (20), 8. <https://doi.org/10.17141/urvio.20.2017.2859>
- Sancho, C. (2017b). Ciberseguridad. *Revista Latinoamericana de Estudios de Seguridad*, 8–15. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.17141/urvio.20.2017.2859>
- Sánchez, G., Mulero, M., & Saumeth, E. (2013). *Vehículos aéreos no tripulados en Latinoamérica*. Recuperado de https://www.infodefensa.com/wp-content/uploads/Vehiculos_aereos_no_tripulados_en_Latam.pdf
- Sanders, A. (2017). *Drone Swarms*. School of Advanced Military Studies.
- Sheldon X. Liang, Lyle A. Reibling, and John Betts. 2008. Re-ADA: reliable Ada-based descriptive architecture for C4ISR via a quantitative interoperating model. In Proceedings of the 2008 ACM annual international conference on SIGAda annual international conference (SIGAda '08). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 39–56. <https://doi.org/10.1145/1454474.1454486>
- SISDEF. (2019). Productos y Servicios Mando y Control - SISDEF - Ingeniería de Sistemas. Recuperado 7 de mayo de 2019, de <https://www.sisdef.cl/defensa/articulos/7/0/productos-y-servicios-mando-y-control.html>
- SENATICs. (2017). Plan Nacional de Ciberseguridad. *SENATICs*, 48.
- Sowell, P. K. (2000). The C4ISR Architecture Framework: History, Status, and Plans for Evolution. Retrieved from <http://www.dtic.mil/docs/citations/AD1014841>
- UNDP, IBM, O. (2007). e-Government Interoperability: Guide. Design. <https://doi.org/10.4018/978-1-60566-713-3.ch002>
- USAF, Visión global de Ciencia Tecnología e Innovación 3 de Julio de 2013 <http://www.af.mil/>

- US Department of Defense. (2011). Home DoDAF-DM2 WG DoDAF Journal DoD Meta Data Registry IDEAS Links The DoDAF Architecture Framework Version 2.02, DoDFA v2, 289. Retrieved from <http://cio-nii.defense.gov/sites/dodaf20/index.html>
- Vargas, E. M. V. (2014). ¿Ciberseguridad y ciberdefensa: ¿qué implicaciones tienen para la seguridad nacional?, pp. 561–565.
- Vidal Ledo, M., Lío Alonso, B., Santiago Garrido, A., Muñoz Hernández, A., Morales Suárez, I. del R., & Toledo Fernández, A. M. (2017). Realidad aumentada. *Educación Médica Superior*, 31(2), 0-0.

CAPÍTULO 3.

Desafíos en la Transferencia Tecnológica para el Desarrollo Espacial^{19*}

TC. Guillermo Alfonso Giraldo Martínez²⁰

TC. German Wedge Rodríguez Pirateque²¹

Fuerza Aeroespacial Colombiana

Jimmy Anderson Flórez Zuluaga²²

Instituto Tecnológico Metropolitano (ITM)

Resumen: Este capítulo analiza los desafíos y oportunidades en la transferencia de tecnología espacial para fortalecer el desarrollo espacial en países en vía de desarrollo. Se realizó bajo una metodología cualitativa, basado en un análisis bibliométrico de fuentes oficiales y artículos científicos de Google Scholar y *Science Direct*, centrándose en conceptos como créditos *offset* y transferencia

19* Capítulo de libro resultado del proyecto de investigación “Desarrollo Espacial en Colombia y aportes de la Fuerza Aeroespacial Colombiana”, del grupo de investigación “GICMA” de la Fuerza Aeroespacial Colombiana, categorizado en A por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (Minciencias) y registrado con el código COL140489. Los puntos de vista y los resultados de este capítulo pertenecen a los autores y no reflejan necesariamente los de las instituciones participantes.

20 Teniente Coronel de la Fuerza Aeroespacial Colombiana. PhD en Gestión Tecnológica e Innovación de la Universidad Autónoma de Querétaro. Magíster en Administración de Negocios del Prime Business School de la Universidad Sergio Arboleda, Administrador Aeronáutico de Escuela Militar de Aviación. Se ha desempeñado como subdirector de transferencia de tecnología y especialista operacional estructuración y seguimiento programas de ciencia tecnología e innovación de la FAC. Código ORCID: 0000-0002-0788-9151. Contacto: guillermo.giraldo@fac.mil.co.

21 Teniente Coronel de la Fuerza Aeroespacial Colombiana. Doctor en Ingeniería Mecánica y Mecatrónica, Universidad Nacional de Colombia. Magíster en Ingeniería Mecatrónica, Universidad Militar Nueva Granada, Especialista en Gerencia Educativa, Universidad de la Sabana, Ingeniero Electrónico, Universidad Los Libertadores, Licenciado en Diseño Tecnológico, Universidad Pedagógica Nacional, Colombia. Código ORCID: 0000-0002-8617-0558. Contacto: german.rodriguez@esdeg.edu.co.

22 Teniente Coronel de la Reserva de la Fuerza Aeroespacial Colombiana. PhD en ingeniería de la Universidad Pontificia Bolivariana, Magíster en tecnología de la información y las comunicaciones, especialista en Seguridad Nacional y en sistemas de Telecomunicaciones, Ingeniero Electrónico de la Universidad Nacional e investigador Senior de MinCiencias. Se ha desempeñado como jefe de Centro de desarrollo Tecnológico y líder de proyectos de innovación. Código ORCID: 0000-0002-0426-1000. Contacto: florezjimmy@gmail.com

de tecnología. En el documento se examinan los desafíos legales, económicos, técnicos, de infraestructura y normativos que enfrentan los países en vía de desarrollo para integrarse en la cadena de valor global de la economía espacial, a través de procesos de transferencia de tecnología, mostrando la importancia de los créditos *offset* como herramienta en el desarrollo industrial y se presentan un análisis de políticas y acciones exitosas de países como Colombia, Brasil, Estados Unidos e Israel. Como conclusión se destaca la necesidad de un enfoque integral y coordinado, con una visión a largo plazo, que maximice el empleo de los créditos *offset* e impulse el desarrollo de políticas de transferencia tecnológica en el sector espacial.

Palabras clave: Transferencia tecnológica; Créditos Offset; Desarrollo Espacial; Independencia Tecnológica.

Introducción

Desde el inicio de la carrera espacial, se observó la necesidad de generar tecnologías innovadoras y disruptivas para que garantizaran el acceso al dominio espacial. Debido a la exigencia de los avances estos desarrollados se convirtieron en un privilegio exclusivo de las potencias mundiales del momento (Estados Unidos y la Unión soviética), fortaleciendo una geopolítica bipolar por obtener el dominio del acceso en marco de la guerra fría. Sin embargo, el proceso de evolución tecnológica del sector espacial, permitió que se crearan las bases para el desarrollo de una industria de base tecnológica de alto valor agregado y elevado nivel de conocimiento, llevando a una importante reducción de costos en el siglo XXI a través de la integración de la industria privada al sector, con empresas como SpaceX, o Blue Origin permitieran la democratización del acceso al espacio por otros países que están involucrándose para ser parte de la cadena de valor global de la economía espacial (Calderón et al., 2019, p.32-41).

Este capítulo tiene como objetivo analizar cómo la transferencia de tecnología espacial puede fortalecer el desarrollo espacial, que permitan reducir las brechas tecnológicas de los países en vía de desarrollo para que puedan incorporarse a la cadena de valor global, identificando los retos y desafíos que tienen que enfrentar los países que buscan la adopción y adaptación de tecnologías espaciales, con el uso de instrumentos como los créditos *offset*.

Para el desarrollo de este escrito académico se utilizó como marco teórico los conceptos de créditos *offset* y transferencia de tecnologías, buscando un

enfoque hacia los temas espaciales. De igual forma, se desarrolló bajo el método cualitativo, realizando un análisis documental, donde se tomaron, fuentes oficiales de países referentes, extrayendo la información de los artículos más relevantes de *Science direct* y *Scopus* relacionados con desarrollo espacial, transferencia de tecnología y créditos *offset*.

El análisis se presenta en cuatro secciones como se describen a continuación:

- Transferencia de tecnología: desafíos como instrumento del desarrollo espacial.
- Créditos *Offset* y el desarrollo espacial
- Maximizando el impacto de la transferencia tecnológica: un análisis de políticas y acciones exitosas en diversas economías.
- Conclusiones

Marco Teórico

El marco teórico del presente capítulo está estructurado en torno a los conceptos de créditos *offset* y transferencia de tecnología, los cuales actúan como ejes articuladores para el cumplimiento de los objetivos planteados. A continuación, se detallan estos conceptos:

Créditos *Offset*

El crédito *offset* es un acuerdo contractual y una práctica comercial legítima que se emplea en los contratos de defensa entre dos naciones. Consiste en la combinación de compromisos formales de compra, venta e intercambio, funcionando como una forma de cooperación industrial. Se puede entender como un mecanismo de compensación entre países en desarrollo y naciones industrializadas. Los créditos *offset* deben alinearse con una estrategia que promueva la competitividad global, además de objetivos geopolíticos como la independencia tecnológica progresiva y la capacidad de decisión autónoma en asuntos críticos de defensa, seguridad y energía. Estos acuerdos tienen un impacto significativo en la creación de empleo, el bienestar social y el ingreso de divisas (Aramayo, 2019).

El crédito *offset* es visto como un motor para el desarrollo estratégico nacional, impulsando la investigación tecnológica dirigida a las Fuerzas Militares, y se percibe como un modelo para el diseño de políticas industriales estratégicas que un país puede adoptar en un contexto de crecimiento tecnológico (Aramayo, 2019).

La implementación de los offset trae consigo numerosos beneficios tanto para la sociedad como para la defensa nacional, tal como lo describe Zagal (2007):

- Fomentar un “efecto derrame” de conocimientos que refuerce los intereses económicos e industriales del país.
- Facilitar el acceso a tecnologías avanzadas, para fortalecer las PYMES.
- Desarrollar capacidades para el mantenimiento de sistemas a lo largo de su ciclo de vida.
- Certificar personal y formar a las MIPYMES locales, permitiéndoles convertirse en proveedores TIER I, II y III autorizados por fabricantes, además de ampliar el tejido industrial mediante alianzas con clústeres internacionales.
- Mejorar la balanza comercial del país.
- Sustituir importaciones, reduciendo la dependencia tecnológica en cuanto a repuestos y actualizaciones de sistemas críticos para la seguridad y defensa.
- Transferir la demanda de productos internacionales hacia la industria nacional, integrándola en mercados extranjeros.
- Promover proyectos locales con nuevos modelos de negocio, orientados tanto al ámbito militar como civil.
- Participar en proyectos regionales con otros clústeres y fuerzas de defensa, contribuyendo a la seguridad regional y elevando la competitividad.

Los acuerdos de compensación con créditos offset son instrumentos clave para reducir las brechas mediante la transferencia tecnológica, ya sea a través de coproducción, producción bajo licencia o formación se busca una transferencia de conocimientos, así como mediante compensaciones indirectas que exigen al productor de defensa realizar inversiones fuera de su sector. (Amarante & Franko, 2017; Aramayo, 2019).

Actualmente, los países están adoptando acuerdos de producción conjunta para aprovechar economías de escala y mejorar la eficiencia, reduciendo así el impacto financiero en los presupuestos de defensa. Este enfoque también genera oportunidades en otras industrias al especializarse en segmentos donde los socios internacionales tienen ventajas competitivas, externalizando

parte de la producción. En este sentido, la industria de defensa ha pasado de depender de proveedores nacionales a integrar una red global, equilibrando la sostenibilidad económica, la autonomía en seguridad y la globalización de la tecnología buscando integradores que gestionan mejor los riesgos, equilibrando la sostenibilidad económica, la autonomía en seguridad y la producción (Amarante & Franko, 2017).

Entre las actividades contempladas en estos contratos offset se incluyen la capacitación del capital humano, la participación industrial local, la transferencia tecnológica al país comprador, la exportación de otros bienes y servicios, así como proyectos de impacto social (Aramayo, 2019).

Transferencia de Tecnología

Según la Guía de Transferencias de Tecnología de MINCIENCIAS la transferencia de tecnología es:

El movimiento de tecnología y/o conocimiento, que puede incluir, tanto medios técnicos como el conocimiento asociado (saber hacer y experiencia), desde un proveedor (universidad, organismo de investigación, centro tecnológico, empresa...), que comercializa la tecnología hacia un receptor (generalmente empresa) que adquiere la tecnología a cambio de una contraprestación habitualmente económica (Ministerio de Ciencia, 2023, p. 8).

También, Sabater (2010) presenta una compilación de definiciones como se describen en la Tabla 1 “Definiciones de Transferencia de Tecnología y Conocimiento”.

Tabla 5. Definiciones de Transferencia de Tecnología y Conocimiento

DEFINICIÓN DE TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA Y CONOCIMIENTO	AUTOR
El movimiento de tecnología y saber-hacer (<i>know-how</i>) relativo a la tecnología entre socios (individuos, entidades y empresas) con el objetivo de mejorar como mínimo el conocimiento y habilidad de uno de los socios, así como fortalecer la posición competitiva de cada uno de los socios.	Norman Abramson (1997)
Transmisión –y en ocasiones la creación– de tecnología, con o sin la transmisión simultánea de bienes y servicios.	Echarri y Pendás (1999)
El movimiento de <i>know-how</i> , de conocimiento tecnológico o de tecnología de una organización a otra.	Roessner (2000) en Castro et al. (2008)
Acuerdo por el que una empresa adquiere las licencias de uso relativas a los derechos de propiedad de los que disponen otras empresas con el fin de acceder a la tecnología necesaria para el desarrollo de sus productos.	Hidalgo et al. (2002)
Ventas o concesiones, hechas con ánimo lucrativo, de tecnología que deben permitir al licenciario o comprador fabricar en las mismas condiciones que el licenciante o vendedor.	Escorsa y Valls (2003)
Intercambio de habilidades, conocimientos, tecnología, métodos de fabricación o servicios entre gobiernos y otras instituciones para garantizar que los avances científicos y tecnológicos se traduzcan en nuevos productos, procesos, aplicaciones, materiales o servicios.	Wikipedia, Technology transfer (2009)
La aportación de equipos y conocimiento por parte del suministrador de la tecnología al concesionario; el suministro.	Surribas
Transferencia del capital intelectual y del <i>know-how</i> entre organizaciones con la finalidad de su utilización en la creación y el desarrollo de productos y servicios viables comercialmente.	Cotec (2003)
La gestión (administración) de los derechos de propiedad industrial e intelectual de una organización: identificación, protección, explotación y defensa.	OCDE (2003b) en European Commission (2009)

Fuente: Sabater, 2010, p. 22.

Según (Ministerio de Ciencia, 2023), (Salazar & Valderrama, 2010), (Bercovitz & Feldman, 2006), (Giraldo, 2024) y (Wright, 2007) consideran que las actividades de transferencia de conocimiento y de tecnología abarcan lo siguientes actividades:

- Venta de derechos de activos de propiedad intelectual (cesión).
- Licenciamiento de los activos de propiedad intelectual.
- Joint ventures o acuerdos de colaboración. / Alianzas tecnológicas
- Generación de nuevas empresas de base tecnológica (spin-off y start-up).
- Contratación de profesionales recién graduados e investigadores.
- Realización de publicaciones académicas, seminarios y conferencias.

- Prestación de servicios de consultoría, soporte técnico, pruebas de laboratorio, alquiler de equipos e instalaciones, asistencias técnicas y servicios.
- Investigación contratada y conjunta.
- Fusiones y adquisiciones
- Inversiones extranjeras directas
- Proyectos llave en mano.
- Empresas de base tecnológica (spin-offs y start-ups).

La transferencia de conocimiento y tecnología requiere la creación de un sistema integrado de instituciones públicas y privadas que trabajen en conjunto para generar, almacenar y compartir información, habilidades y competencias. Esto demanda el desarrollo de infraestructuras específicas, como las oficinas de transferencia de tecnología (OTT), de conocimiento (OTC), de resultados de investigación (OTRI) y de licencias (OTL). Estas estructuras son esenciales para cumplir con la denominada tercera misión universitaria, promoviendo el emprendimiento académico y conectando de manera efectiva el conocimiento con la industria. Además, facilitan la transmisión de tecnologías de uso dual entre defensa e industria, el intercambio tecnológico entre empresas, la creación de nuevas empresas de base tecnológica, como startups, spin-offs y spin-outs, y el fortalecimiento del tejido empresarial (Vázquez González, 2017).

Para llevar a cabo un proceso efectivo de transferencia de tecnología, es fundamental evaluar el grado de avance e innovación de la tecnología en cuestión. En este sentido, KTH Innovation, el grupo de innovación del Instituto Real de Tecnología de Suecia propuso un marco valioso que permite medir el nivel de preparación para la innovación mediante métricas estandarizadas. Este marco abarca seis áreas clave de enfoque, ofreciendo una hoja de ruta que guía el progreso en todas las dimensiones del desarrollo de una idea, innovación o tecnología, tal como se detalla a continuación (Ministerio de Ciencia, 2023):

- **Nivel de madurez del cliente (CRL - Customer Readiness Level):** determina la demanda del mercado y el interés de los clientes potenciales.
- **Nivel de madurez tecnológica (TRL - Technology Readiness Level):** mide el estado de desarrollo de la tecnología propuesta.

- **Nivel de madurez del negocio (BRL - Business Readiness Level):** valida el modelo de negocio y su viabilidad comercial.
- **Nivel de madurez de la propiedad intelectual (IPRL - Intellectual Property Readiness Level):** evalúa y desarrolla las estrategias necesarias para la protección adecuada de la propiedad intelectual.
- **Nivel de madurez del equipo (TMRL - Team Readiness Level):** analiza la preparación del equipo humano y su capacidad para gestionar el proyecto con las competencias requeridas.
- **Nivel de madurez para la financiación (FRL - Funding Readiness Level):** determina la preparación para atraer inversiones y asegurar financiamiento.
- **Nivel de madurez de la sostenibilidad (SRL - Sustainability Readiness Level):** mide la capacidad del proyecto para ser sostenible a largo plazo.

Modelos de Transferencia de Tecnología

Por consiguiente, es importante analizar los diferentes modelos de transferencia de tecnología que muestra la literatura establecida la existencia del modelo anglosajón, el del centro europeo y el evolucionista.

Modelo Anglosajón de Transferencia de Tecnología

El modelo anglosajón de transferencia de tecnología, representado por el Reino Unido, se caracteriza por un sistema de innovación que facilita la transferencia tecnológica hacia las empresas. Entre los factores que lo respaldan se destacan un sólido tejido empresarial y un alto nivel educativo (DG Enterprise and Industry, 2006).

El modelo de transferencia tecnológica anglosajón se basa en tres puntos fundamentales:

- 1) Los derechos de propiedad intelectual sobre los resultados de la investigación pertenecen a la universidad, con la excepción de los derechos de autor relacionados con actividades académicas como libros, publicaciones y conferencias entre otros. (Aceytuno & Cáceres, 2012) .
- 2) Los beneficios generados por la comercialización de los resultados de la investigación, una vez descontados los costos, se distribuyen

equitativamente entre la universidad, el investigador y el departamento al que este pertenece (Aceytuno & Cáceres, 2012).

- 3) Si en el proceso de comercialización interviene algún agente externo, como una oficina de transferencia independiente de la universidad, este también recibe una parte de los beneficios obtenidos (Aceytuno & Cáceres, 2012).

Es importante aclarar que este modelo se expresa en el relacionamiento entre el investigador y la universidad, pero también se puede expresar en relaciones empresa-investigador o estado-investigador.

Según Rubiralta (2004), las estructuras e instrumentos más relevantes para la transferencia tecnológica incluyen las oficinas de gestión de la innovación en las universidades, las oficinas de transferencia de tecnología y los parques científicos. A esto se suman otros mecanismos clave, como las empresas spin-offs financiadas con capital universitario y la promoción de una cultura de emprendimiento académico. Un ejemplo destacado de éxito es el “University Entrepreneurship Center” de la Universidad de Cambridge, que ofrece apoyo y asesoría a los emprendedores vinculados a dicha institución (Aceytuno & Cáceres, 2012).

Modelo Centro Europeo de Transferencia de Tecnología

El modelo alemán se distingue por la coordinación entre las políticas de innovación y transferencia tecnológica a nivel federal y regional. En este sistema, las universidades juegan un papel fundamental, siendo la columna vertebral del sistema de investigación, complementadas por importantes centros de investigación no universitarios. Entre estos destacan instituciones como los centros Max Planck Gesellschaft (MPG), Helmholtz Gemeinschaft (HGF), Fraunhofer Gesellschaft (FhG) y Leibnitz Gesellschaft (WGL). Además, el país cuenta con una amplia variedad de instrumentos diseñados para promover la transferencia tecnológica, destacándose varios de gran relevancia (Aceytuno & Cáceres, 2012; Alcañiz, 2004):

- Inversión en I+D realizada por parte de los gobiernos regionales y las políticas estatales.
- Políticas destinadas a fomentar la innovación.
- Creación de infraestructuras para impulsar nuevas empresas de base tecnológica y atraer compañías internacionales.

- Modelo económico híbrido que integra grandes empresas multinacionales con centros de excelencia de alto nivel.
- Estructuras innovadoras para la transferencia de tecnología y apoyo empresarial, que incluyen oficinas de transferencia tecnológica en universidades o centros de investigación, agencias de comercialización de patentes y otras agencias de gestión de patentes vinculadas a centros de investigación.

La transferencia de tecnología que se lleva a cabo mediante la creación de empresas spin-offs, con programas dirigidos al fomento del desarrollo empresarial en la universidad y al aumento del número de empresas creadas por las instituciones de investigación (Aceytuno & Cáceres, 2012)

Esquema Evolucionista

En el modelo evolucionista, las universidades ocupan un papel central en el análisis, ya que son la principal fuente de creación, difusión y aplicación de nuevos conocimientos. Según Bercovitz y Feldmann (2006), la colaboración entre universidades e industrias se ha intensificado en los últimos años debido a la interacción de cuatro factores clave (Gómez & Rodríguez, 2007):

1. La creación de nuevas oportunidades derivadas del desarrollo de plataformas tecnológicas.
2. El creciente componente científico y tecnológico en la producción industrial.
3. La necesidad de identificar nuevas fuentes de financiamiento para la investigación académica.
4. Las políticas gubernamentales que buscan aumentar el retorno de las inversiones en investigación y desarrollo (I+D)

En resumen, se puede proponer un cuadro comparativo de los modelos así:

Tabla 6. *Tabla comparativa de modelos*

	Modelo Anglosajón (Reino Unido)	Modelo Centroeuropoeo (Alemania)	Modelo Evolucionista
Propiedad Intelectual (PI)	Pertenencia de los resultados de investigación a las universidades.	Las universidades y centros de investigación gestionan la PI.	Universidades como fuente clave de creación y difusión de PI.
Distribución de beneficios	Equitativa entre universidad, investigador, y departamento.	Parte de los ingresos de PI se reinvierten en I+D y spin-offs.	Colaboración entre universidades e industrias para compartir PI.
Intermediarios en comercialización	Oficinas de transferencia independientes que reciben parte de los beneficios.	Agencias de patentes y oficinas de transferencia tecnológica.	Interacción directa entre universidad, industria y gobierno.
Fomento de emprendimientos	Enfocado en spin-offs y emprendimiento académico (ej. Cambridge).	Creación de spin-offs tecnológicas con inversión regional y estatal.	Fomenta spin-offs y colaboración empresarial con enfoque en plataformas tecnológicas.
Inversión en I+D	Enfocado en Universidades como principales gestoras de PI e innovación.	Fuerte inversión estatal y regional en I+D.	Dependiente de la cooperación universidad-industria.
Coordinación institucional	Centrada en la relación universidad-investigador.	Coordinación entre niveles federales y regionales, y múltiples centros de investigación.	Políticas gubernamentales y académicas que promueven la cooperación.
Casos exitosos	“University Entrepreneurship Center” de Cambridge.	Max Planck, Fraunhofer y otros grandes centros de investigación.	Aplicación en la creciente industria tecnológica y científica.

Fuente: elaboración propia.

Metodología

La Metodología propuesta es bajo el enfoque cualitativo, que se orientan hacia la comprensión de las situaciones únicas y particulares, centrándose en la búsqueda de significado y de sentido que les conceden a los hechos los propios agentes, y en cómo viven y experimentan ciertos fenómenos o experiencias los individuos o los grupos sociales a los que son objeto de investigación (Hernández Sampieri, Fernández Collado, and Baptista Lucio 2014). Donde el conjunto de técnicas empleadas por el método cualitativo para la recolección

de datos produce datos descriptivos de una conducta observable (Sánchez Silva, 2005).

Por lo anterior, tomando como base lo descrito por Mathew B. Miles y Michael Huberman (1994) (Alvarez-Gayou Jurgenson 2012), y el libro Metodología de la Investigación Cualitativa de (Ruiz Olabuénaga 2012), se tomarán los siguientes pasos para el diseño metodológicos del análisis documental:

Paso 01: Definir el problema de investigación

Paso 02: Definir los objetivos del proyecto de investigación.

Paso 03: Definición parámetros de búsqueda

Paso 04: Búsqueda Bibliográfica y elección documentos

Paso 04: Organización y análisis de información y datos relevantes

Paso 06: Entrega de Resultados modo capítulo de libro

Paso 01: Problema

En el capítulo, el problema abordado es cómo los países en desarrollo pueden fortalecer su **desarrollo espacial** y reducir la **brecha tecnológica** para integrarse en la cadena de valor global de la economía espacial, utilizando la transferencia de tecnología y el instrumento de contratos de créditos offset de defensa sus capacidades espaciales.

Paso 02: Objetivo general

Analizar cómo la **transferencia de tecnología espacial** puede fortalecer el desarrollo espacial en países en vías de desarrollo, utilizando **créditos offset** como instrumento.

Objetivos específicos

- Analizar los **desafíos** que enfrentan los países en desarrollo para la transferencia de tecnología como instrumento del desarrollo espacial. Esto incluye desafíos legales, económicos, técnicos, de infraestructura y normativos
- Examinar el papel de los **créditos offset** en el desarrollo espacial y su importancia como herramienta para el desarrollo industrial
- Analizar las **políticas y acciones exitosas** de países como Colombia, Brasil, Estados Unidos e Israel para maximizar el impacto de la transferencia tecnológica

Paso 03: Parámetros de Búsqueda

Tomando técnicas de análisis documental y contenido que se centra en la recopilación y análisis de fuentes documentales, como artículos científicos, libros, informes, entre otros. Se utiliza para identificar tendencias, temáticas y conocimientos existentes en un campo específico (Hernández Sampieri et al. 2014; Ruiz Olabuénaga 2012). Utilizando como herramienta el análisis documentos de fuentes científicas confiables y validadas de plataformas como SCOPUS y Science Direct estableciendo la siguientes artículos más relevantes encontrados con los parámetros establecidos anteriormente y utilizando los siguientes parámetros de búsqueda:

Tipo de Filtro		Parámetro Seleccionado
Filtrado por		Citación más alta
Primer Filtrado		Limitado por: Área Temática Limitado por tiempo: Desde 2000
Área Temática	• Space Policy • Research Policy • Decision Sciences • Social Sciences • Business, Management and Accounting • Computer Science • Engineering • Economics, Econometrics and Finance	
Periodo de Tiempo		2000-2024
Tipos de documentos		Artículos de Revisión. Artículos de Investigación.
Palabras Claves	• “Technology Transfer”, • “Offset”, • “Defence” • “Space”.	
Tipo de Recursos		Journals
Fórmula de Búsqueda	Formula 01 (TITLE-ABS-KEY(“technology transfer”) OR TITLE-ABS-KEY(“offset”)) AND (TITLE-ABS-KEY(“defence”) AND TITLE-ABS-KEY(“space”)). Esta fórmula combina los conceptos de transferencia de tecnología y offset con los contextos de defensa y espacio	

Tipo de Filtro	Parámetro Seleccionado
Fórmula de Búsqueda	Formula 02 (TITLE-ABS-KEY(“technology transfer”) AND TITLE-ABS-KEY(“aerospace”)) AND (TITLE-ABS-KEY(“offset”) OR TITLE-ABS-KEY(“defence”)). Esta fórmula se enfoca en la industria aeroespacial y sus proyectos de offsets. Formula 03 (SCOPUS) (TITLE-ABS-KEY(“technology transfer”) AND TITLE-ABS-KEY(“space”))
Resultados	Como algunos artículos aparecían en las tres formulas de búsqueda relacionadas se consolido un total de 32 artículos que se utilizaran para el presente análisis, filtrados también por su ponencia con el objetivo y el problema analizado.

Paso 04: Búsqueda Bibliográfica y elección documentos

De igual forma, el análisis realizado permitió seleccionar los siguientes artículos

Nombre del artículo	Autor	Revista / Publicación
A Global Analysis of the Role of Offsets in Aerospace Industry	Dr. C. S. Ram	International Journal of Defence Studies
A Study of Defense Offsets in India	Dr. R. K. Singh	International Journal of Research in Commerce, Economics and Management
A systematic review of the Space technology transfer literature: Research synthesis and emerging gaps	Karen Venturini, Chiara Verbano	Space Policy
An analysis of the impact of offset requirements on the U.S. and defense industry	Thomas B. Darracott	Journal of Economic Issues
Analysis of Technology Transfer within Satellite Programs in Developing Countries using Systems Architecture	Danielle R. Wood	AIAA SPACE 2013 Conference and Exposition
China’s Space Export Strategy	Nathaniel Rome	Space Policy

Nombre del artículo	Autor	Revista / Publicación
Commercial Lunar Ice Mining: Is There a Role for Royalties?	Ben McKeown et al.	Space Policy
Criteria for developing and testing Transparency and Confidence-Building Measures (TCBMs) for outer space activities	Peter Martinez et al.	Space Policy
Cyber-attacks on Space Activities: Revisiting the Responsibility Regime of Article VI of the Outer Space Treaty	Du Li	Space Policy
Developing a Space Program in a Developing Country: Opportunities and Challenges	Betty Ntebogeng Ntlhe, Senelisiwe Gladys Magagula	SpaceOps Conferences
Economic Development and Defence Offsets: The Case of Reindustrializing Countries	Dr. A. C. Fernandes	International Journal of Defence Studies
Impact of Defence Offsets On The Companies of The Participating Industry: A Case Study Based Examination	P. K. Ghosh, S. K. Mahapatra	Defence Science Journal
Mandated defence offsets: can they ever deliver?	Keith Hartley	Defence and Peace Economics
Offset Contracts under defence procurements regulations in India	N. K. Sharma	Indian Defence Review
Offsets as industrial policy: Lessons from aerospace	Bernard Udis, Keith E. Maskus	Defence Economics
Portfolios of promise: A review of R&D investment techniques and how they apply to technology development in space agencies	Anthony Wicht, Zoe Szajnfarber	Space Policy
Regulating European defence procurements: implications and challenges	Dr. J. R. A. Brauer	European Security
Space science innovation: How mission sequencing interacts with technology policy	Zoe Szajnfarber	Space Policy

Nombre del artículo	Autor	Revista / Publicación
Space technology transfer problems in the context of protecting the space heritage	Marta E. Wachowicz, Marek Bury	Space Policy
Space cooperation among order-building powers	Scott Pace	Space Policy
Strengthening Links Between European Union Space and Defence: Adopting a Combined Approach	Alexandros Kolovos	Space Policy
Superconductivity and the environment: a Roadmap	Shigehiro Nishijima et al.	Superconductor Science and Technology
The Political Context of Technology Transfer: NASA and the International Space Station	W. Henry Lambright, Agnes Gereben Schaefer	Comparative Technology Transfer and Society
The 'black box' syndrome in technology transfer and the challenge of innovation in developing countries	Chandra Malairaja, Girma Zawdie	International Journal of Technology Management and Sustainable Development
The Economics of Offsets: Defence Procurement and Countertrade	J. P. G. van den Berg	Journal of Economic Issues
The Evolving Boundaries of Defence: An Assessment of recent shifts in Defence Activities	Dr. R. G. Smith	Defence Studies
The role of offset and technology transfer for installing an aeronautical industrial pole	Felipe Fernandez et al.	Gestão & Produção
Technology Transfer and Development of the Space Sector in Africa	Stafford Pelish	Tesis doctoral
Transfer of Space Technologies in Iran: Drivers and Constraints of Success	Shahab Shahebrahimi et al.	Space Policy
TRANSPARENCY AND ACCOUNTABILITY IN DEFENCE OFFSET: A CASE STUDY OF THE UNITED KINGDOM	Sarah J. White	Journal of Transparency and Accountability

Nombre del artículo	Autor	Revista / Publicación
Transnational policy transfer: the circulation of ideas, power and development models	Diane Stone et al.	POLICY AND SOCIETY
Trends and Challenges in Aerospace Offsets	G. R. S. Rao	Journal of Aerospace Technology and Management
Trends in the Defence Offsets Market	David B. H. M. van der Meulen	The Military Balance
UK FIRMS' EXPERIENCE AND PERCEPTIONS OF DEFENCE OFFSETS	Bernard Udis, Keith Hartley	Defence and Peace Economics

Paso Organización y análisis de información y datos relevantes

Paso 05 y 06: Paso Organización y análisis de información y datos relevantes y Entrega de Resultados modo capítulo de libro

Finalmente, el proceso de análisis de los artículos objeto de análisis y seleccionados en el paso anterior permitió construir el capítulo de libro, que se estructuró en los siguientes capítulos:

- Transferencia de tecnología: desafíos como instrumento del desarrollo espacial.
- Créditos Offset y el desarrollo espacial
- Maximizando el impacto de la transferencia tecnológica: un análisis de políticas y acciones exitosas en diversas economías.
- Conclusiones

Por consiguiente, a continuación, se presenta los datos relevantes y la información analizada y extraída de los artículos revisados.

Transferencia de tecnología: desafíos como instrumento del desarrollo espacial

Un proceso de transferencia de tecnología implica un compromiso por las partes involucradas que incluyen tener todos los factores habilitantes para que

la transferencia de la tecnología se lleve de forma exitosa. Por consiguiente, esta sección busca realizar un análisis desde la perspectiva legal, económica, técnica, infraestructura y políticas estatales y desarrollo normativo, que se deben tener en cuenta para llevar a cabo un proceso de transferencia de tecnología exitoso.

1. *Desafíos Legales*

La complejidad de la protección de los derechos de propiedad industria en el contexto espacial, debido a las limitaciones geográficas de derechos como las patentes, donde existe a nivel global regulaciones diversas, se carece de un marco regulatorio especial para asuntos espaciales, disuadiendo a los innovadores para acceder a este tipo de derechos y facilitar el acceso al conocimiento en países en vía de desarrollo (Wachowicz & Bury, 2017; J. H. Meng & Wang, 2023).

Así mismo, no facilita la cooperación técnica, el entrenamiento y los roles de consultores internacionales de países desarrollados hacia países en vía de desarrollo, por la falta de armonización de las normativas internacionales (Stone et al., 2020). Presentándose normativas que pueden fungir como obstáculos para el acceso a tecnologías avanzadas como el Reglamento sobre el Tráfico Internacional de Armas y para los países en vía de desarrollo el cumplimiento de las leyes internacionales y las regulaciones del país receptor (ITAR) (Wachowicz & Bury, 2017; Rome, 2023).

Según McKeown et al., (2023) existe la necesidad apremiante de construir un marco regulatorio específico para actividades comerciales en el espacio exterior, que definan derechos y regulen la explotación de recursos espaciales, que faciliten la financiación de proyectos espaciales con regulaciones justas y equitativas.

2. *Desafíos Económicos*

Los altos costos de inversión y la necesidad de infraestructuras sostenible especializada como receptor del proceso de transferencia requiere una planificación financiera detallada y la búsqueda de múltiples fuentes de financiamiento. Son una barrera significativa que requiere la articulación de capital público y privado para sostener este tipo de proyectos con una visión a largo plazo y teniendo en cuenta que el financiamiento inadecuado puede llevar a transferencias tecnológicas incompletas o fallidas. Estos altos costos se presentan para países en vía de desarrollo como una barrera crítica que

requieren especial atención con mecanismos de financiamiento sostenible que faciliten la infraestructura y la capacitación del personal necesario para el proceso (Venturini & Verbano, 2014; Wachowicz & Bury, 2017).

Así mismo, es importante la asistencia financiera de organizaciones internacionales a través de la cooperación, para mitigar los riesgos que representan los recursos limitados y bajo un proceso de constante crecimiento que fortalezca el estado de las capacidades, para crear el ambiente económico y político adecuado para llevar el proceso de transferencia exitoso (Stone et al., 2020). Por ejemplo, el modelo de transferencia de China incluye el acceso a préstamos y asistencia financiera, para llevar a cabo un proceso de transferencia eficiente y dar sostenibilidad financiera a este tipo de actividades de exportación tecnológica (Rome, 2023).

Como el desarrollo de la exploración espacial requiere inversiones iniciales considerables, se puede estudiar la posibilidad de utilizar regalías como un mecanismo de financiamiento que podría proporcionar una fuente de ingresos sostenible y diversificada facilitando el acceso a diversos actores al fortalecimiento de una economía espacial (McKeown et al., 2023).

3. *Desafíos Técnicos*

La falta de personal altamente especializado (en áreas STEM) y de infraestructuras adecuadas, que faciliten la adopción y adaptación efectiva de tecnologías espaciales (Stone et al., 2020; Wachowicz & Bury, 2017). Además, es importante resaltar que las transferencias de tecnología requieren de conocimientos avanzados en un entorno complejo y V.I.C.A por las condiciones del entorno espacial (Rome, 2023).

Estos desafíos técnicos están interconectados con las capacidades en investigación y desarrollo para superar los retos tecnológicos de explorar el espacio ultraterrestre y la planeación de las misiones espaciales y su secuenciación evolutiva en el tiempo para el crecimiento del sector espacial (McKeown et al., 2023; Szajnfarder, 2014). Por consiguiente, es importante acudir a la cooperación internacional en aspectos técnicos para el desarrollo de capacidades tecnológicas avanzadas con el intercambio de conocimientos técnicos de manera efectiva que fortalezcan los contextos locales con experticias técnicas (Pace, 2016; Venturini & Verbano, 2014).

Otro desafío técnico significativo es la seguridad cibernética de las actividades espaciales que se pueden comprometer en su integridad y la seguridad con el desarrollo de ataques cibernéticos que pueden generar accesos no autorizados a información y la operación de satélites (Li, 2023).

4. *Desafíos de Infraestructura*

La infraestructura existente puede no ser suficiente para soportar las nuevas tecnologías avanzadas transferidas, requiriendo inversiones adicionales para mejorar capacidades de I+D+i, que permitan mitigar los riesgos de transferencia, en la gestión del conocimiento, la creación de infraestructura tecnológica que soporte las pruebas y el desarrollo de tecnologías espaciales en el país receptor (Szajnfarber, 2014; Venturini & Verbano, 2014). Este desafío implica el fortalecimiento y desarrollo de políticas culturales, diseño institucional, capacidades estatales, y el ambiente económico y social, para armonizar la transferencia de tecnología (Stone et al., 2020; Wachowicz & Bury, 2017).

Según Pace, (2016), se deben integrar las capacidades militares modernas para fortalecer las capacidades innovadoras competitivas y comerciales, buscando el uso dual de esta infraestructura concibiendo que las capacidades espaciales están incrementando indistintamente de las capacidades militares espaciales. Paralelamente, se debe desarrollar la infraestructura de ciberseguridad necesaria para garantizar la integridad de sus sistemas tecnológicos, que habiliten y sostengan la integralidad de los activos espaciales (Li, 2023).

5. *Evaluación de Políticas Actuales y Necesidad de Desarrollos Normativos*

Las políticas espaciales actuales en muchos países en desarrollo están desactualizadas y no alineadas con los rápidos avances tecnológicos. Adicionalmente, se requiere un marco normativo que promueva la colaboración internacional y la inversión en el sector espacial y facilite la transferencia de tecnología, acorde a la secuenciación de misiones espaciales que se proyecten y la gestión de políticas tecnológicas y espaciales que las soporten (J. H. Meng & Wang, 2023; Rome, 2023; Szajnfarber, 2014; Wachowicz & Bury, 2017).

Con el incremento de la importancia de la globalización de las actividades espaciales, se deben establecer nuevas normas que estimulen una visión nacional sobre el espacio y crear un orden internacional estable y seguro (Pace, 2016). Así mismo, se debe establecer una actualización sostenida de políticas nacionales de ciberseguridad adaptadas a las amenazas específicas o emergentes que protejan las actividades espaciales (Li, 2023).

Según J.-H. Meng & Wang, (2023) la evolución de las políticas de transferencia tecnológica para la integración tecnológica, por el uso dual de tecnologías militares y civiles, debe seguir un proceso de maduración y ajuste continuo. Este proceso se adapta a las necesidades de cada momento histórico en la evolución del sistema de ciencia y tecnología de cada país. Como ejemplo se puede revisar el caso chino en un proceso de cuatro etapas que se describe a continuación y que pueden ser referencia para la evolución de las políticas alrededor de la transferencia de tecnología que deben sostener los países en vía de desarrollo:

- ***Etapas 1 (1978-1997): Fundamentos de la Gobernanza DTI***

En esta etapa, se identificaron cuatro temas dominantes que sentaron las bases para la gobernanza de la integración de tecnologías de uso dual. El tema principal (1A) se centraba en promover la transformación y aplicación de tecnología de defensa en el ámbito civil, así como en fortalecer la integración de institutos de investigación y empresas militares. Adicionalmente, incluyeron el reconocimiento y fomento de los logros científicos y tecnológicos relacionados con la defensa (1B), la construcción colaborativa de proyectos tecnológicos militar-civil (1C) y la colocación de personal militar y jubilados en procesos de investigación en defensa (1D) (J.-H. Meng & Wang, 2023).

- ***Etapas 2 (1998-2005): Prototipos y Medidas Clave***

Durante esta etapa, surgieron cinco temas políticos que marcaron la integración de políticas de desarrollo tecnológico. El tema principal (2A) estaba relacionado con el ajuste y transformación de empresas militares-industriales y el fortalecimiento de la gestión de activos militares, posterior incluyeron la protección de los derechos de propiedad intelectual y la capacitación de personal en empresas y universidades militares (2B), la

expansión de mercados de innovación tecnológica y de defensa (2C), el avance en la I+D en tecnologías aeroespaciales y marinas (2D), y el fortalecimiento del trabajo científico y tecnológico en el desarrollo de regiones (2E) (J.-H. Meng & Wang, 2023).

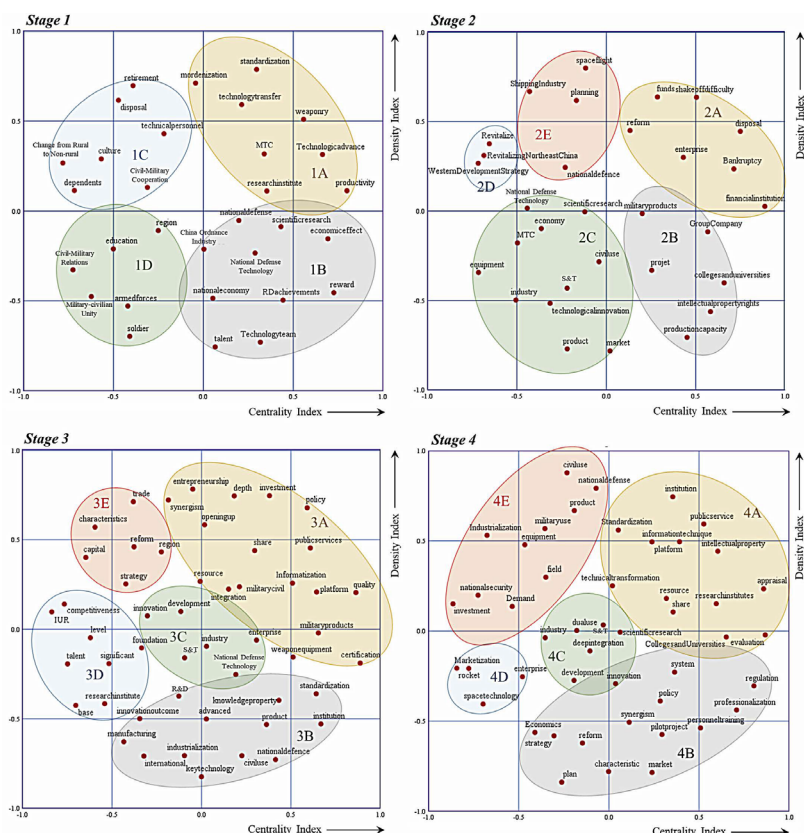
- ***Etapa 3 (2006-2016): Desarrollo Rápido y Colaboración***

Esta etapa se desarrolló en cinco temas. El principal (3A) se centró en desarrollar plataformas de servicios de tecnologías de uso dual, con enfoque en temas de fondos de inversión, información, certificación técnica y promoción del intercambio de recursos militares-civiles. Otros temas, incluyeron la normalización técnica para la colaboración industria – universidad de investiga- instituciones de investigación (3B), el establecimiento principios en la gobernanza de tecnologías de uso dual (3C), el fomento de la colaboración entre empresas, universidades e instituciones de investigación (3D), y la modernización de antiguas bases industriales en el noreste de China y el desarrollo de la región occidental (3E) (J.-H. Meng & Wang, 2023).

- ***Etapa 4 (2017-presente): Innovación y Comercialización***

La etapa más reciente se caracteriza por cinco temas políticos. El tema central (4A) se refiere a la creación de una red de servicios sistemáticos basada en la estandarización tecnológica y los derechos de propiedad intelectual. Otros temas incluyeron el desarrollo económico regional y la capacitación de talentos en universidades (4B), el establecimiento de las características fundamentales de la gobernanza DTI (4C), el fomento del mercado de cohetes comerciales de manera normativa (4D), y la concepción de tecnologías de uso dual como una actividad de innovación científica y tecnológica que contribuye a la seguridad nacional (4E) (J.-H. Meng & Wang, 2023).

Figura 1. Etapas de evolución de políticas de transferencia de tecnología de China



Fuente: (J.-H. Meng & Wang, 2023, p. 9).

Impulsores y conductores de un proceso transferencia de tecnología

Un caso interesante es el de Irán un país con limitaciones y sanciones económicas que ha podido lograr un desarrollo espacial importante en su región como lo explica (Shahebrahimi et al., 2023) el cual plantea los impulsores y conductores en un procesos de transferencia de tecnología espacial exitoso, que deben ser asumidos por los desarrolladores y receptores de tecnología, describiéndolas en la Figura 2 Desafíos de la Transferencia de Tecnología Espacial.

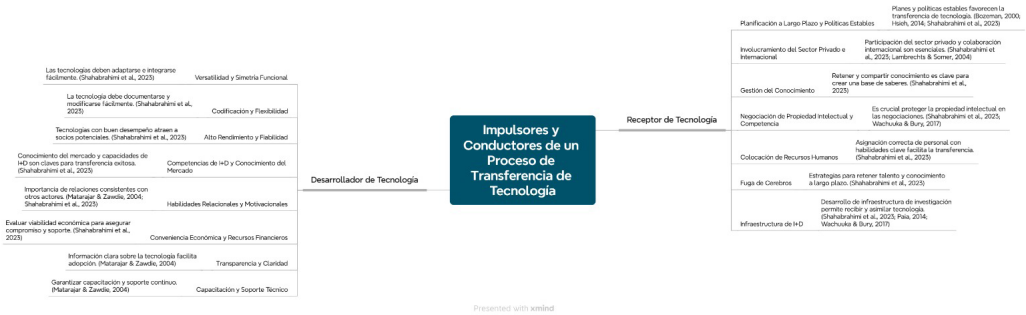
Donde los desarrolladores deben manejar relaciones organizacionales complejas y asegurar una planificación estratégica a largo plazo, mientras

los receptores deben enfrentar problemas como la colocación inapropiada de recursos humanos y la oposición interna, que pueden obstaculizar la implementación efectiva de nuevas tecnologías. Así mismo, afrontar factores de fracaso centrados en los receptores de tecnología, por la inadecuada gestión del conocimiento y problemas de reorganización interna para la adopción de nuevas tecnologías. Por lo anterior, se relacionan a continuación en los impulsores y conductores mediante un mapa mental (Figura 2) y posterior se desarrollan y amplían los conceptos los impulsores y conductores de la transferencia de tecnología determinados por Shahebrahimi et al., (2023):

Desarrollador de Tecnología (Technology Developer):

- ***Versatilidad y Simetría Funcional:*** Las tecnologías espaciales deben tener las capacidades para ser adaptadas, integradas y utilizadas en diferentes contextos y sectores (Shahebrahimi et al., 2023).
- ***Codificación y Flexibilidad:*** La facilidad con la que una tecnología puede ser documentada y modificada para su transferencia para ser adoptada por el receptor. Manteniendo un enfoque a corto plazo centrado en el cumplimiento de objetivos (Shahebrahimi et al., 2023).
- ***Alto Rendimiento y Fiabilidad:*** las tecnologías que demuestran un alto desempeño y confiabilidad son atractivas para los receptores potenciales, porque garantizan resultados consistentes y eficientes (Shahebrahimi et al., 2023).
- ***Competencias de I+D y Conocimiento de los Mercados:*** La capacidad de una organización para realizar I+D sostenida y su conocimiento de las oportunidades de mercados potenciales para satisfacer sus necesidades, son impulsores clave para facilitar el proceso de transferencia de tecnología. En este punto es importante establecer los parámetros claros sobre la gestión de la propiedad intelectual y la disposición de sus derechos patrimoniales (Shahebrahimi et al., 2023).

Figura 2. Mapa mental impulsores y desarrolladores



- **Habilidades Relacionales y Factores Motivacionales:** Hace referencia a la capacidad de los desarrolladores de tecnología de establecer y mantener relaciones consistentes con otros actores, con un compromiso persistente de la cultura organizacional con la innovación, la colaboración y el desarrollo (Malairaja & Zawdie, 2004; Shahebrahimi et al., 2023).
- **Conveniencia Económica y Disponibilidad de Recursos Financieros:** los desarrolladores deben tener claro la viabilidad económica de la transferencia tecnológica y la afectación a su modelo de negocio, para aumentar la probabilidad de ser transferidas con éxito. Involucrando la participación del sector privado y generación de beneficios a organismos públicos, que faciliten el flujo de recursos financieros (Shahebrahimi et al., 2023).
- **Transparencia y Claridad:** Es crucial que los desarrolladores proporcionen información clara y completa sobre la tecnología que se está transfiriendo para facilitar su adopción y adaptación por los receptores (Malairaja & Zawdie, 2004).
- **Capacitación y Soporte Técnico:** el desarrollado de la tecnología debe garantizar la capacitación adecuada y el soporte técnico continuo y oportuno para asegurar una transferencia tecnológica más efectiva (Malairaja & Zawdie, 2004).

Receptor de Tecnología (Technology Receiver):

- **Planificación a Largo Plazo y Políticas Estables:** Existencia de un plan a largo plazo y políticas estables facilita la transferencia tecnológica, creando entornos favorables para la colaboración entre el sector público y privado y el desarrollo industrial (Fernandez et al., 2021; Pelish, 2014; Shahebrahimi et al., 2023). Esto implica el compromiso político y la voluntad gubernamental con la construcción del marco regulatorio adecuado que facilite el intercambio de conocimiento y tecnologías (Lambright & Schaefer, 2004)
- **Involucramiento del Sector Privado y colaboración internacional:** se requiere la participación activa del sector privado, especialmente de las MiPYMEs de base tecnológica o con una amplia capacidad de generación de conocimiento, aprovechando su versatilidad para adaptarse mejor a las nuevas tecnologías (Shahebrahimi et al., 2023). El apalancamiento del sector privado y el proceso de transferencia se puede fortalecer con el desarrollo paralelo de actividades de cooperación internacional para desarrollar las capacidades y acceder a recursos financieros, para la adopción de tecnologías espaciales, en proyectos a gran escala que tienen altos costos de inversión (Lambright & Schaefer, 2004; Pelish, 2014).

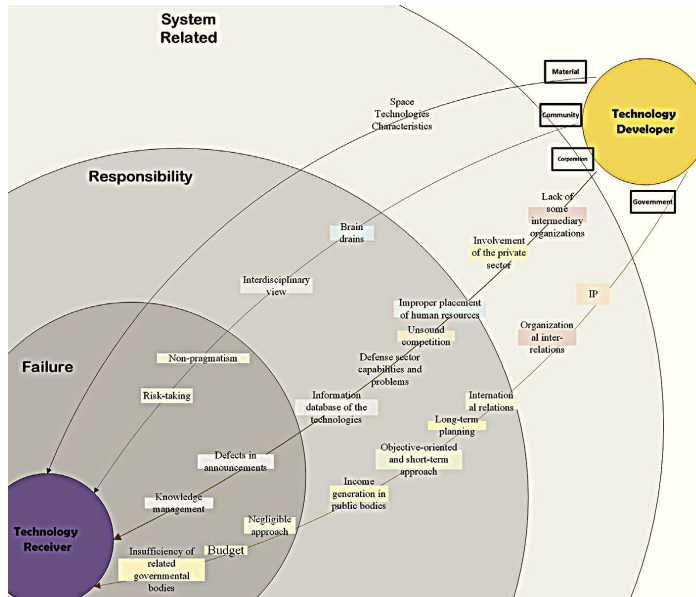
Además, se deben utilizar los acuerdos de compensación Offset como herramienta efectiva para facilitar la transferencia de tecnología y el desarrollo industrial (Fernandez et al., 2021).

- **Gestión del Conocimiento:** La falta de un sistema eficaz de gestión del conocimiento puede obstaculizar la transferencia tecnológica. Es esencial que las organizaciones receptoras tengan mecanismos para retener y compartir el conocimiento adquirido y evitar la fuga de cerebro que hayan recibido conocimiento tácito y explícito crítico, que puedan generar pérdidas de conocimiento vital en el sistema (Shahebrahimi et al., 2023).
- **Negociación de la Propiedad Intelectual y Competencia:** La protección de la propiedad intelectual y la competencia justa son fundamentales, por consiguiente, las organizaciones deben familiarizarse con la normatividad de propiedad intelectual, para adelantar negociaciones equilibradas y garantizar que las tecnologías transferidas estén protegidas adecuadamente. Adicionalmente, es importante estudiar la posibilidad de adquirir la transferencia de mercado que permita impulsar tecnologías emergentes, mejorar las capacidades de la industria local y solucionar problemas

sectoriales (Shahebrahimi et al., 2023). Así mismo, existe la “paradoja de la patente espacial” ya que la patente otorga una explotación de los derechos patrimoniales en un territorio limitado, pero las acciones en el espacio no pueden ser fácilmente cubiertas por la protección de propiedad industrial generando un dilema para los investigadores e inventores en este campo (Wachowicz & Bury, 2017)

- **Colocación Apropriada de Recursos Humanos:** La correcta asignación de recursos humanos es vital. Los receptores deben asegurarse de que las personas con las habilidades y conocimientos adecuados estén en los roles correctos para facilitar la transferencia tecnológica, con equipos interdisciplinarios y mecanismos que faciliten solucionar posibles oposiciones internas que desarrollen enfoques negligentes (Shahebrahimi et al., 2023).
- **Fuga de Cerebros:** establecer estrategias de retención de talento humano con visión a largo plazo, con sistemas de transferencia interna del conocimiento tácito y convirtiéndolo en explícito, para asegurar que el conocimiento y las habilidades se conserven dentro de la organización (Shahebrahimi et al., 2023).
- **Infraestructura de I+D:** Desarrollar una infraestructura de investigación, desarrollo e innovación que facilite la recepción de tecnología espacial con éxito (Fernandez et al., 2021; Pelish, 2014). Entendiendo que los requisitos en el sector espacial son extremadamente altos y exigen soluciones en áreas STEM no convencionales, duraderas y confiables (Wachowicz & Bury, 2017).

Figura 3. Desafíos de la Transferencia de Tecnología Espacial



Fuente: (Shahebrahimi et al., 2023, p. 11).

Créditos *Offset* y el desarrollo espacial

Según Udis & Maskus, (1991) los créditos *offset* son contratos que impone condiciones al proveedor de un bien o servicio, que permite al gobierno obtener reciprocidad buscando recuperar parte de la inversión, con procesos de transferencia de conocimiento o tecnología que mejoren capacidades productivas. Este tipo de contratos involucran dos tipos de contratos *offset*: *offsets* directos, son los que requieren la participación de la industria del país comprador en la fabricación o ensamblaje del artículo objeto del contrato; *offsets* indirectos, son los que involucran bienes y servicios no relacionados con las exportaciones mencionadas en el acuerdo de ventas.

Es importante realizar una aclaración sobre el rol del estado en el desarrollo de estrategias de créditos *offset* para el desarrollo espacial de un país en vía de desarrollo, el cual debe estar enmarcado en la generación de políticas regulatorias, fungir como inversionista de riesgo en las primeras etapas y empresario público. Es importante que formule políticas nacionales para el empleo de los créditos *offset* en materia de ciencia tecnología e innovación, en el cual el gobierno debe ser regulador (no dictador), ser proveedor de

fondos de investigación a la academia en diferentes áreas de interés del sector espacial, estimular el desarrollo de áreas STEM y llevar a cabo sus propios proyectos de I+D articuladores y de impacto nacional (Dezhina & Etzkowitz, 2016).

El gobierno actúa como un catalizador de demandas, interactuando con la estructura productiva a través del vértice científico-tecnológico. Las autoridades tienen la responsabilidad de armonizar el desarrollo económico con un alto nivel educativo, garantizar la salud pública y promover la cohesión territorial y social (Salazar & Valderrama, 2013). Las iniciativas gubernamentales deben enfocarse en desarrollar capacidades nacionales y/o regionales, un proceso que puede tomar décadas en consolidarse. Asimismo, el gobierno debe fomentar la demanda de productos de alta tecnología mediante políticas que faciliten y estimulen esta actividad en sus instituciones. (Gobierno de Colombia, 2019; J. A. R. López & Torres, 2020).

Las funciones del estado para promover la innovación, a través de créditos offset tomando como base lo planteado por Etzkowitz & Zhou, (2018b), debe ser lo siguiente:

- Crear nuevas agencias para fomentar la innovación, como entidades híbridas público-privadas (fondos de inversión, parques tecnológicos, centros de investigación, entre otros).
- Otorgar garantías gubernamentales al capital privado para que asuma mayores riesgos al invertir en nuevos emprendimientos, estableciendo mecanismos de financiamiento que incentiven al sector privado a involucrarse en el desarrollo de tecnologías espaciales.
- Ofrecer incentivos fiscales para I+D y reducir los impuestos sobre las ganancias generadas con el fin de promover la innovación.
- Asegurar la protección de los derechos de propiedad intelectual, facilitando su uso en procesos de transferencia tecnológica e innovación.
- Proporcionar capital de riesgo público para crear un modelo lineal de innovación asistida.

Las leyes y políticas en ciencia y tecnología fomentan la creación de vínculos con los sectores productivos, generando una sinergia que beneficia a la sociedad en general. Estas medidas también dinamizan los sistemas regionales de innovación. Además, el gobierno debe liderar iniciativas “top-down” mediante fondos que impulsen la creación de incubadoras y parques

científicos (Vázquez González, 2017), así como proveer la infraestructura necesaria para respaldar el desarrollo industrial, ya que el fomento de la investigación avanzada debe ser una prioridad como base para el crecimiento y fortalecimiento industrial de los países (Etzkowitz & Zhou, 2018b).

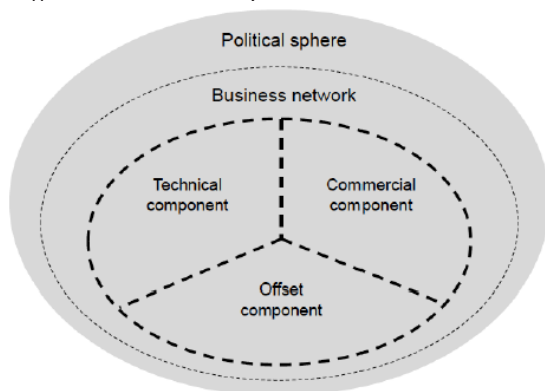
Es crucial encontrar un equilibrio entre las iniciativas “bottom-up” y “top-down” (lo cual ha sido exitoso en proyectos espaciales), apoyándose en una sólida estructura de soporte a la innovación y construyendo espacios de consenso donde todos los actores del ecosistema innovador colaboren (Leydesdorff et al., 2015). Para esto las políticas que desarrolle el gobierno deben envolver tres aspectos: amigable con el medio ambiente, capacidad económica y responsabilidad social (J. A. R. López & Torres, 2020). Entendiendo que los *offsets* son herramientas clave para la reubicación de la actividad económica del país proveedor al país comprador (Ungaro, 2013).

Es fundamental reconocer la ineficiencia administrativa de la burocracia del gobierno, por lo que debe recurrir a mecanismos como los programas de tecnología avanzada para aplicar tecnologías existentes o desarrollar tecnologías emergentes. Estos programas deben centrarse en políticas que apoyen a los pequeños empresarios y fomenten la colaboración entre universidades e industria, con el objetivo de mejorar la competitividad a través de la investigación. Además, deben facilitar la organización de nuevas empresas y la potencialización de las existentes, estimulando las regiones con baja inversión en I+D, y promoviendo el desarrollo de capacidades mediante proyectos *offset* que impulsen la transformación de la defensa tradicional hacia el espacio, desarrollando activos espaciales clave para la comunicación, el reconocimiento y la navegación (Bellais, 2014; Etzkowitz & Zhou, 2008).

El gobierno debe implementar programas específicos de capital de riesgo y créditos *offset* para cubrir las deficiencias de financiamiento que enfrentan las PYME. Asimismo, debe reducir su intervención en la economía y alentar la participación gradual del sector privado en el desarrollo industrial. Esto permitirá mantener la competitividad a través de procesos de transferencia tecnológica, estimulando el mercado de capitales para empresas tecnológicas y facilitando al gobierno comprador la recuperación de parte de su inversión (Ungaro, 2013; Wonglimpiyarat & Khaemasunun, 2015).

Es clave para el desarrollo adecuado de los acuerdos *offset*, tomarlos como un componente fundamental de los contratos relacionados con temas aeroespaciales. El cual debe tomarse como un parámetro de selección, combinado con el componente comercial y técnico, que depende de las redes de negocio y envueltos por la esfera política ver Figura 4 (El Hajami & Chinoperekweyi, 2019).

Figura 4. *Offset como un Componente del Comercio Aeroespacial*



Fuente: Tomado de (El Hajami & Chinoperekweyi, 2019, p.153).

Beneficios y desafíos del empleo del empleo d acuerdo de compensación industrial - créditos Offset

Beneficios

Los beneficios que permite el desarrollo del empleo de acuerdos de compensación industrial amparados sobre la proyección de una estrategia de ciencia, tecnología, competitividad y desarrollo industrial de impacto nacional, para generar capacidades de producción y desarrollo de tecnologías emergente relacionadas con el espacio, se pueden enmarcar en los siguientes:

1. ***Transferencia de Tecnología:*** El beneficio más relevante de los créditos offset es la transferencia de tecnología compleja y avanzada desde países desarrollados hacia países en vía de desarrollo y que de otro modo no estaría disponible, fortaleciendo capacidades tecnológicas y productivas, que permiten la modernización de sectores industriales estratégicos (Udis & Maskus, 1991).

1. ***Desarrollo Industrial y crecimiento económico:*** Los acuerdos de compensación industrial pueden utilizar los créditos offset para impulsar el desarrollo de la industria receptora al obligar a los proveedores extranjeros a subcontratar partes de la producción a empresas locales, para mejorar las competencias técnicas de los trabajadores locales y contribuir al crecimiento económico con la fabricación de productos de alto valor agregado que les permite introducirse en las cadenas de suministro globales fortaleciendo la competitividad y sostenibilidad economía a largo plazo (Giraldo et al., 2023; Kirchwehm, 2014).
2. ***Creación de Empleo e Inversiones:*** Los créditos offset estimulan la creación de nuevos puestos de trabajo y atraen inversiones públicas y privadas, locales y extranjeras en sectores estratégicos. (Kirchwehm, 2014).
3. ***Independencia Tecnológica:*** La transferencia de tecnología es un beneficio clave, que puede explotarse con una visión estrategia a largo plazo que permita fortalecer el tejido industrial con tecnologías avanzadas, proyectado la eliminación de importaciones e inclusión en la cadena de valor global, esto debe estar acompañado de un buen proceso de negociación que tenga objetivos claramente definidos, análisis detallado de los stakeholders, análisis de barrera, definición y ejecución de una estrategia viable (Santos et al., 2023).
4. ***Adaptación a Cambios en el Entorno Global:*** Los créditos offset son flexibles y adaptables a cambios en el entorno global, como fluctuaciones económicas, cambios en las políticas comerciales internacionales o avances tecnológicos. Permitiéndole al país receptor en un contexto global adquirir capacidades que le permiten adaptarse a los constantes cambios tecnológicos de la posmodernidad (Santos et al., 2023; Udis & Maskus, 1991).
5. ***Evaluación Continua y Mejora de Procesos:*** En los procesos de transferencia de conocimiento y tecnología permiten identificar áreas de mejora y ajustar la doctrina, la infraestructura, la organización, el personal, políticas según sea necesario. Con la retroalimentación regular de todas las partes involucradas, en los resultados a mediano y largo plazo, y la adaptación de las estrategias (Kirchwehm, 2014).
6. ***Fortalecimiento de la seguridad y defensa nacional:*** los créditos offset ofrecen sostenibilidad e independencia en la toma de decisiones a largo

plazo sobre los asuntos de seguridad y defensa nacional de un país, facilitando el dominio de tecnologías de defensa y permitiéndole al país receptor ajustarlas, para afrontar las amenazas que afronta cada uno de los países propias de su contexto social, económico, político y cultural (Giraldo, 2024).

Desafíos

La transferencia de tecnología se está convirtiendo en un aspecto clave de los acuerdos de offset, con muchos países buscando establecer asociaciones a largo plazo para fortalecer sus capacidades industriales locales (Ungaro, 2013). Por consiguiente, empiezan a confluír requerimientos con altos grados de complejidad entre receptores dueños de las tecnologías convirtiéndose en desafíos que deben ser asumidos en los procesos de negociación de los créditos *offset*, siendo cruciales para maximizar los beneficios económicos y tecnológicos.

1. ***Desafíos en la Implementación:*** La implementación efectiva de los créditos offset requiere un marco regulatorio claro y mecanismos robustos de monitoreo, que requieren de experiencia, infraestructura y recursos que garanticen la gestión adecuada de los acuerdos con créditos offset que a menudo involucran múltiples partes y jurisdicciones, requiriendo un marco regulatorio robusto y personal capacitado para manejar los aspectos técnicos y administrativos de los créditos offset, y que no lleven a una implementación ineficaz, reduciendo los beneficios esperados (Kirchwehm, 2014; Markowski & Hall, 2014).
2. ***Sostenibilidad a Largo Plazo:*** Un desafío importante es asegurar la sostenibilidad a largo plazo de los proyectos desarrollados a través de créditos offset, garantizando la inversión inicial y que se requiera para terminar los proyectos. Integrando la infraestructura y las capacidades desarrolladas adecuadamente en la economía local (Kirchwehm, 2014).
3. ***Impacto Limitado en la Innovación:*** En algunos casos, la tecnología transferida puede estar obsoleta o en la fase final de su ciclo de vida, lo que limita su impacto en la capacidad de innovación del país receptor. Por consiguiente, se deben adelantar los estudios pertinentes para garantizar que la capacidad tecnología que se transfiera, garantice la posibilidad

de generar productos con tecnologías avanzadas y que permita generar procesos de innovación sostenibles, con oportunidades en mercados locales y globales (Udis & Maskus, 1991).

4. ***Marco Regulatorio Claro:*** La implementación exitosa de proyectos financiados con créditos offset requiere un marco regulatorio que especifique las obligaciones tanto de los proveedores como de los gobiernos receptores, para evitar conflictos entre las partes involucradas y asegurar que los créditos se utilicen para cumplir con los objetivos estratégicos del país receptor y mitigue riesgos de interpretación que pueden llevar a disputas y retrasos en la implementación. Así mismo, debe garantizar la transparencia y rendición de cuentas con la publicación de informes detallados sobre el progreso de cada etapa del proceso y los resultados de los proyectos financiados (Santos et al., 2023; Udis & Maskus, 1991; Verma, 2009)
5. ***Tecnologías de Ciberseguridad armonizadas con tecnologías espaciales:*** Los proyectos con créditos offset deben garantizar la seguridad cibernética de los activos espaciales, y que la transferencia de tecnología no se convierta en una amenaza a la seguridad y defensa del país receptor. Por consiguiente, se deben tomar todas las medidas jurídicas y físicas, para no afectar la integridad de la infraestructura crítica de los actores participantes (Bellais, 2014).
6. ***Registro, Supervisión y Certificación:*** Se deben establecer procesos e infraestructura para el registro, supervisión y certificación de los créditos offset para que sean contabilizados y aplicados de manera eficiente y oportuna, verificando que los créditos cumplidos por los proveedores cumplan con los requisitos establecidos en los acuerdos. Esto implica el fortalecimiento institucional en la capacitación de personal especializado en la negociación, evaluación, monitoreo y certificación de los créditos, (Kirchwehm, 2014; Markowski & Hall, 2014; Udis & Maskus, 1991).
7. ***Alineación con Objetivos Nacionales e Intereses Nacionales:*** La implementación de los créditos offset debe alinearse con los objetivos nacionales de desarrollo industrial, tecnológico y económico de un país, bajo una visión a largo plazo, acorde al desarrollo de capacidades para generar activos espaciales y el fortalecimiento de una economía espacial que permitan al país receptor mejorar su posición competitiva en el mercado global. (Kirchwehm, 2014).

8. **Evaluación y Selección de Proyectos:** Los proyectos financiados con créditos offset deben ser cuidadosamente evaluados en términos de su viabilidad y su potencial técnico, financiero y económico, para el país determinando como puede contribuir al desarrollo y cierre de brechas tecnológicas del país. Esto requiere un proceso de planificación que considere no solo los beneficios inmediatos, sino también los impactos a largo plazo en la economía y en la infraestructura industrial del país receptor (Markowski & Hall, 2014, p. 160).

Maximizando el impacto de la transferencia tecnológica: un análisis de políticas y acciones exitosas en diversas economías

En este acápite se pretende realizar un análisis de las políticas y acciones exitosas de países como Estados Unidos, Israel, Brasil y Colombia, que les ha permitido maximizar el impacto del proceso de transferencia de tecnología.

Caso EEUU

En EEUU el gobierno es un impulsor de demandas, que orientan y motivan la ejecución de proyectos, bajo un enfoque estratégico que parte desde los niveles más altos del sistema burocrático. Por consiguiente, esto les ha permitido desarrollar estrategias en materia de créditos offset basado en una visión a largo plazo, hecho reflejado que desde la carrera de espacial de la Guerra fría han emitido hasta la fecha únicamente tres estrategias OFFSET. El objetivo principal de esta estrategia es generar un avance cualitativo en el ámbito tecnológico-militar que permita a Estados Unidos contrarrestar los progresos estratégicos recientes de sus principales adversarios geopolíticos, los cuales amenazan su actual capacidad de proyección global. Esta iniciativa, lanzada por el secretario de Defensa Chuck Hagel, se denominó “Defense Innovation Initiative” y busca *“desarrollar conceptos innovadores que mantengan y amplíen la superioridad tecnológica y militar de Estados Unidos durante el siglo XXI”* (Simon, 2015).

De manera similar, se han implementado políticas como el S.1373 - Defense Offsets Disclosure Act de 1999, donde el Senado de los Estados Unidos define en su sección 4ª los créditos offset en el comercio internacional de defensa como:

... the entire range of industrial and comercial benefits provided to foreign governments as an inducement or condition to purchase military goods or services, including benefits such as coproduction, licensed production, subcontracting, technology transfer, in-country procurement, marketing and financial assistance, and joint ventures...

Otro instrumento fue creado en 1982 a través de la Ley de Desarrollo de Innovación para Pequeñas Empresas, el programa de Investigación para la Innovación en Pequeñas Empresas (SBIR, por sus siglas en inglés) es el mayor programa de innovación del país para pequeñas empresas. El SBIR ofrece premios competitivos para apoyar el desarrollo y la comercialización de tecnologías innovadoras por parte de pequeñas empresas del sector privado proporcionando soluciones técnicas y científicas a las entidades estatales del gobierno de los EEUU, en marco del cumplimiento de sus misiones institucionales (SBIR, 2020).

Otro gran logro político, fue el desarrollo del objetivo de fortalecer las capacidades científicas y tecnológicas de los EEUU es el programa de Transferencia de Tecnología para Pequeñas Empresas (STTR), creado en 1992 mediante la Ley de Mejora en la Investigación y Desarrollo para Pequeñas Empresas, que ha buscado ampliar las oportunidades de emprendimientos conjuntos entre pequeñas empresas e instituciones de investigación sin fines de lucro, convirtiéndose en una amplia fuente de financiación para las Pymes de EEUU (SBIR, 2020).

Este tipo de visión a largo plazo, sostenida por un flujo constante de recursos y respaldada por el desarrollo de un marco jurídico amplio y adecuado para las entidades gubernamentales, ha permitido a los Estados Unidos mantener su supremacía científica y tecnológica, instrumentos esenciales para garantizar su acceso al espacio.

Caso Israel

La estrategia de generación de proyectos de defensa con créditos offset en Israel se basa en dos enfoques clave: aprovechar las oportunidades ofrecidas por los mercados extranjeros o expandir las capacidades de producción de defensa interna. Esto les ha permitido desarrollar algoritmos que identifican qué tecnologías tienen potencial de exportación y cuáles satisfacen sus necesidades domésticas. Además, Israel se destaca por su capacidad para alcanzar rápidamente altos niveles de producción en serie, ofreciendo a sus compradores un valioso “know-how.” Sus productos son equilibrados en

términos de sofisticación tecnológica, ni excesivamente complejos ni de baja tecnología, y brindan opciones de coproducción. Asimismo, implementan requisitos de créditos offset en países en desarrollo, generando la percepción de cercanía económica y social (Donatas, 2019).

El Ministerio de Defensa de Israel influye en los requisitos del Departamento de Producción y Adquisiciones para fomentar el desarrollo regional. Un ejemplo destacado es la adquisición de aviones F-35 a Estados Unidos, donde, como parte del acuerdo de compensación de créditos offset, se transfirieron mercados y tecnología a empresas israelíes. En este marco, Lockheed Martin realizó una orden de mil millones de dólares en componentes para el F-35 a compañías de Israel (Donatas, 2019).

Israel es un ejemplo clave de oferente dispuesto a generar procesos de transferencia de tecnología a través de créditos offset, y es además un país que demuestra capacidad y habilidad para negociar tecnologías como receptor, con el fin de mejorar sus capacidades productivas.

Caso Brasil

La selección del Gripen como el caza de superioridad aérea brasileño para reemplazar sus aviones AMX y F-5 bajo el programa denominado FX2 para garantizar la protección de los 22 millones de km² de su territorio, es un ejemplo sobresaliente de un adecuado proceso de transferencia de tecnología, donde los brasileños han utilizado los sistemas de compensación offset como estrategia para impulsar su desarrollo y crecimiento en la generación de capacidades nacionales a través de proyectos aeroespaciales (Eliasson, 2010; Gobierno de Brasil, 2012; Quintero & Forero, 2018; C. Rodríguez et al., 2018).

Con la adquisición de aviones de combate, Brasil aprovechó la reputación de la empresa sueca SAAB, conocida por su disposición a compartir tecnología, lo que se considera una de sus principales ventajas competitivas. Esto permitió la formación de asociaciones para el codesarrollo y producción de una versión del avión adaptada a las necesidades locales y regionales, fortaleciendo así las capacidades industriales y de I+D del país. Brasil se consolidó como un socio estratégico de SAAB en la comercialización del Gripen, involucrando a su industria nacional, con empresas como Embraer, Akaer, Inbra Aerospace, AEL Systems y Atech (Amarante & Franko, 2017b).

Un acuerdo similar se realizó con el programa de helicópteros EC-725 a través de HELIBRAS, bajo el nombre de HX-BR, con el objetivo de promover

capacidades tecnológicas en áreas como sensores electro-ópticos, integración de misiles, simulación, UAVs y el desarrollo de componentes de helicópteros (Amarante & Franko, 2017b).

Brasil se ha convertido en un referente regional por su estrategia de transferencia tecnológica y su uso de proyectos financiados mediante créditos offset, lo que ha impulsado su industria y sus capacidades aeroespaciales de defensa. Esta estrategia ha generado sinergias entre el gobierno, la industria y el ámbito académico, incluyendo la creación de dependencias específicas para gestionar los créditos offset, como el Centro de Projetos e Desenvolvimento do Gripen (GDDN) de la FAB. A través de esta adquisición, Brasil ha aprovechado oportunidades en cuatro áreas clave: 1) formación, 2) investigación y desarrollo tecnológico, 3) capacitación en Suecia y 4) desarrollo y producción (Aramayo, 2019).

Caso Colombia

El proyecto de transferencia tecnológica más destacado en el ámbito aeronáutico en Colombia ha sido gestionado por la Corporación de la Industria Aeronáutica (CIAC) y la Fuerza Aérea Colombiana (FAC) en colaboración con la empresa chilena Lancair. Iniciado en el año 2000, este proyecto permitió la fabricación de 26 aviones T-90 Calima, diseñados para reemplazar los T-34 Mentor y algunos T-41 Mescalero, aviones de instrucción utilizados por los cadetes de la Escuela Militar de Aviación. Se desarrollaron cuatro versiones de este modelo, con un costo que superó los 10 millones de dólares, logrando un hito en la historia de la aviación colombiana. Para 2017, los T-90 Calima habían acumulado 10,000 horas de vuelo y formado a más de 300 pilotos (Calle, 2021).

Colombia, a través de la FAC, ha trabajado en el desarrollo de capacidades satelitales con el objetivo de lograr autonomía en la captura de imágenes para inteligencia militar, con el programa FAC-SAT. En 2018, lanzó el nanosatélite FACSAT-1 en colaboración con un operador espacial de la India, el cual capturaba imágenes de baja resolución bajo operación de la FAC. Este fue el primer paso en un programa de transferencia tecnológica orientado a la manufactura de satélites en el país. El objetivo es desarrollar una constelación satelital ensamblada en Colombia para la observación terrestre y las comunicaciones, aunque aún falta una integración significativa con la industria y la academia que permita consolidar esta iniciativa como un proyecto nacional (Fuerza Aérea Colombiana, 2024).

Desde el 15 de abril de 2023, Colombia puso en órbita el FACSAT-2, lo que significó un avance en la capacidad de manufactura de satélites, (Rodríguez-Piranteque et al., 2021) con una mayor participación de ingenieros colombianos que en el FACSAT-1. Este proyecto permitió la adquisición de laboratorios y la capacitación de personal en áreas clave de ciencias espaciales. Para la fase del FACSAT-3, se espera la creación de una constelación satelital mediante un proceso de transferencia tecnológica que genere capacidades nacionales. Este proyecto beneficiaría a entidades gubernamentales a nivel territorial, departamental y municipal, reduciendo los costos de adquisición de datos satelitales en comunicaciones e imágenes, y apoyando el desarrollo productivo del país (Fuerza Aérea Colombiana, 2022, 2024).

El gobierno colombiano ha fomentado el desarrollo del sector espacial a través de programas de transformación productiva, impulsados por el CONPES 3866 “Política Nacional de Desarrollo Productivo”. Este plan, ejecutado por el Ministerio de Industria y Comercio, busca aumentar el valor agregado de las exportaciones y prioriza el crecimiento de industrias como la automotriz, naval y aeroespacial. Estas industrias tienen la capacidad de impulsar y conectar otros sectores como el metalmecánico, plástico y químico, entre otros, estableciéndolas como áreas clave para el crecimiento económico del país (Ministerio de Industria y Comercio, 2020).

Conclusiones

Con frecuencia, no tiene sentido para las organizaciones invertir en I+D, a menos que estén dispuestos en invertir en el desarrollo de ciertos activos complementarios interna o externamente.
- David Teece (1988)

El desarrollo espacial en los países en vías de desarrollo demanda una estrategia integral que permita la efectiva integración de todos los actores productivos y generadores de conocimiento, facilitando su inserción en la economía espacial global. La transferencia de tecnología y los créditos offset se perfilan como herramientas clave para reducir las brechas tecnológicas y fomentar el desarrollo industrial en estos países. Sin embargo, este proceso enfrenta desafíos significativos, como la carencia de un marco normativo robusto, la necesidad de infraestructura adecuada, personal altamente especializado, negociaciones equitativas y los altos costos asociados a las inversiones iniciales.

La experiencia de países como Colombia, Brasil, Estados Unidos e Israel demuestra que un enfoque estratégico y coordinado maximiza los beneficios derivados de la transferencia tecnológica. En Estados Unidos, la implementación de estrategias *offset* y el desarrollo de legislaciones nacionales con una visión a largo plazo, inclusiva de todos los actores productivos, han permitido al país mantener su liderazgo científico y tecnológico. Israel, por su parte, ha aprovechado con éxito los créditos *offset* para fortalecer su capacidad defensiva y aumentar la producción nacional, con negociaciones oportunas y alineadas a sus intereses estratégicos. Del mismo modo, Brasil ha utilizado los créditos *offset* para impulsar su industria aeroespacial de defensa, integrando a su sector industrial en cadenas globales de valor y estableciendo relaciones estratégicas que le han conferido ventajas competitivas en el mercado aeroespacial.

En el caso de Colombia, la adopción de los créditos *offset* debe considerarse como una estrategia a largo plazo orientada a fomentar la transferencia tecnológica, generar empleo, fortalecer la seguridad y defensa nacional, y habilitar el acceso al espacio. No obstante, Colombia enfrenta retos específicos, como la limitada inversión pública y privada en el sector espacial y la ausencia de una estrategia nacional consolidada que involucre de manera efectiva a la Triple Hélice (gobierno, industria y academia). Crear un ecosistema de innovación sólido será esencial para facilitar la transferencia y absorción de tecnologías avanzadas.

En conclusión, la transferencia de tecnología no solo es un mecanismo para cerrar brechas tecnológicas, sino también una vía para promover la cooperación internacional, desarrollar capacidades nacionales, y establecer una política espacial coherente y sostenible. Al adoptar un enfoque estratégico con una asignación adecuada de recursos, los países en vías de desarrollo podrán consolidar su participación en el escenario espacial global, promoviendo la independencia tecnológica y la sostenibilidad a largo plazo del sector espacial.

Referencias bibliográficas

Aceytuno, M.-T., & Cáceres, F. R. (2012). Los modelos europeos de transferencia de tecnología universidad-empresa. *Revista de Economía Mundial*, 32, 215–238.

- Alcañiz, M. R. (2004). *Transferencia a las empresas de la investigación universitaria: descripción de modelos europeos*. Fundación COTEC para la Innovación Tecnológica.
- Alcántar Flores, J., Hernández, H., & Sánchez, A. (2021). *Transferencia y comercialización tecnológica: una experiencia reciente de una OTT grupal de siete centros públicos de I+ D*.
- Amarante, J. C. A., & Franko, P. (2017). Defense Transformation in Latin America: Will It Transform the Technological Base? *Democracy and Security*, 13(3), 173–195. <https://doi.org/10.1080/17419166.2017.1290527>
- Aramayo, P. (2019). Implementación del Offset en la industria de Defensa, caso aeronáutico—Actualización de Sistemas de gestión aeronáutica y específicos (AS9100-NAS-NADCAP). *Revista de La Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 6(1), 23.
- Bellais, R. (2014). *The Evolving Boundaries of Defence: An Assessment of Recent Shifts in Defence Activities*. Emerald Group Publishing.
- Bercovitz, J., & Feldman, M. (2006). Entrepreneurial universities and technology transfer: A conceptual framework for understanding knowledge-based economic development. *The Journal of Technology Transfer*, 31, 175–188.
- Calderón, C. E. Á., Colmenares, C. R. S. M., Jara, M. J. L. H., & Carrero, C. J. C. U. (2019). EL PODER ESPACIAL Y LA SEGURIDAD MULTIDIMENSIONAL. *Volumen 1. El Espacio Exterior: Una Oportunidad Infinita Para Colombia.*, 21.
- DG Enterprise and Industry. (2006). European Innovation Progress Report 2006. *European Commission*.
- El Hajami, N., & Chinoperekweyi, J. (2019). A Global Analysis of the Role of Offsets in Aerospace Industry. *Saudi Journal of Business and Management Studies*, 4(1), 147–163.
- Etzkowitz, H., & Zhou, C. (2008). *The triple helix: university-industry-government innovation in action*. Routledge.
- Fernandez, F., Costa, R. S. da, Tonelli, B., & Vieira, N. F. T. (2021). The role of offset and technology transfer for installing an aeronautical industrial pole. *Gestão & Produção*, 28(1), e4874.
- Fuerza Aérea Colombiana. (2022). *Plan de Desarrollo Estratégico Espacial 2022 - 2042*.

- Fuerza Aérea Colombiana. (2024). *Plan Estratégico de CTeI de la FAC* (Version 01).
- Giraldo, G. (2024). *Integración de la Triple Hélice en un ecosistema de innovación para proyectos de I+D+i Aeroespaciales de Defensa* [Universidad Autonoma de Queretaro]. <https://ri-ng.uaq.mx/xmlui/handle/123456789/10261>
- Giraldo, G., Morante, D., Florez, J., & Escobar, J. (2023). Economic Effects of Investment in Defense Research and Development and its Impact on Productivity in Developed Countries. *Revista Facultad de Ciencias Económicas*.
- Gómez, M., & Rodríguez, J. C. (2007). Transferencia de Tecnología Universidad-Industria en los Estados Unidos, 1997-2003. *Cimexus*, 2(1), 21–35.
- Kirchwehm, H. (2014). Impact of Defence Offsets On The Companies of The Participating Industry-A Case Study Based Examination. *International Journal of Business Research and Management (IJBRM)*, 5(4), 52–63.
- Lambright, W. H., & Schaefer, A. G. (2004). The political context of technology transfer: NASA and the international space station. *Comparative Technology Transfer and Society*, 2(1), 1–24.
- Li, D. (2023). Cyber-attacks on space activities: Revisiting the responsibility regime of article vi of the outer space treaty. *Space Policy*, 63, 101522.
- Malairaja, C., & Zawdie, G. (2004). The ‘black box’ syndrome in technology transfer and the challenge of innovation in developing countries. The case of international joint ventures in Malaysia. *International Journal of Technology Management & Sustainable Development*, 3(3), 233–252
- Markowski, S., & Hall, P. (2014). Mandated defence offsets: can they ever deliver? *Defense & Security Analysis*, 30(2), 148–162.
- McKeown, B., Dempster, A. G., Saydam, S., & Coulton, J. (2023). Commercial lunar ice mining: is there a role for royalties? *Space Policy*, 64, 101525.
- Meng, J. H., & Wang, J. (2023). The policy trajectory of dual-use technology integration governance in China: A sequential analysis of policy evolution. *Technology in Society*, 72, 102175. <https://doi.org/10.1016/J.TECHSOC.2022.102175>
- Meng, J.-H., & Wang, J. (2023). The policy trajectory of dual-use technology integration governance in China: A sequential analysis of policy evolution. *Technology in Society*, 72, 102175.

- Ministerio de Ciencia, T. e I. de Colombia. (2023). Guía para la transferencia de tecnología. Recuperado de . In https://repositorio.minciencias.gov.co/bitstream/handle/20.500.14299/3606/guia_transferencia_tecnologia.pdf.
- Pace, S. (2016). Space cooperation among order-building powers. *Space Policy*, 36, 24–27.
- Pelish, S. (2014). *Technology Transfer and Development of the Space Sector in Africa*. University of Nebraska at Omaha.
- Rome, N. (2023). China's Space Export Strategy. *Space Policy*, 66, 101574.
- Rodriguez-Pirateque, G. W., Paez, P. J. C., & Sofrony, J. (2021). Satellite Systems for Colombian Space Development with Multi-domain Operations *. *Ciencia y Poder Aéreo*, 16, 46–59.
- Sabater, J. G. (2010). Manual de transferencia de tecnología y conocimiento. *Acceso*, 4, 03.
- Salazar, M. del P. R., & Valderrama, M. G. (2010). La Alianza Universidad-Empresa-Estado: una estrategia para promover innovación. *Revista Escuela de Administración de Negocios*, 68, 112–133.
- Santos, H. B., Água, P. B., & Frias, A. (2023). Economic development and defence offsets: the case of reindustrializing countries. *Science & technology research institute for defence (stride)*, 87.
- SBIR. (2020). The SBIR and STTR Programs. In *sbir.gov*. <https://www.sbir.gov/about>
- Shahebrahimi, S., Mahdad, M., Aliha, M. R. M., & Naeini, A. B. (2023). Transfer of Space Technologies in Iran: Drivers and Constraints of Success. *Space Policy*, 64, 101518.
- Stone, D., Porto de Oliveira, O., & Pal, L. A. (2020). Transnational policy transfer: the circulation of ideas, power and development models. *Policy and Society*, 39(1), 1–18.
- Szajnfarder, Z. (2014). Space science innovation: How mission sequencing interacts with technology policy. *Space Policy*, 30(2), 83–90. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.spacepol.2014.03.005>
- Udis, B., & Maskus, K. E. (1991). Offsets as industrial policy: Lessons from aerospace. *Defence and Peace Economics*, 2(2), 151–164.

- Ungaro, A. (2013). Trends in the defence offsets market. *SIPRI 17th Annual International Conference on Economics and Security (ICES)*, Stockholm, 14–15.
- Venturini, K., & Verbano, C. (2014). A systematic review of the Space technology transfer literature: Research synthesis and emerging gaps. *Space Policy*, 30(2), 98–114.
- Verma, S. (2009). Offset Contracts Under Defence Procurement Regulations in India: Evolution, Challenges and Prospects. *Journal of Contract Management*, 7(1).
- Wachowicz, M. E., & Bury, M. (2017). Space technology transfer problems in the context of protecting the space heritage. *Space Policy*, 42, 66–69.
- Wonglimpiyarat, J., & Khaemasunun, P. (2015). China's innovation financing system: Triple Helix policy perspectives. *Triple Helix*, 2(1), 5. <https://doi.org/10.1186/s40604-014-0013-y>
- Wright, M. (2007). *Academic entrepreneurship in Europe*. Edward Elgar Publishing.
- Zagal, C. F. (2007). Impacto de las compensaciones industriales sobre las capacidades de las Fuerzas Armadas de Chile. *Revista Enfoques: Ciencia Política y Administración Pública*, 7, 199–225.

CAPÍTULO 4.

Medio Ambiente, desechos espaciales y su impacto en el entorno espacial^{23*}

MY. Adriana Caro Jácome²⁴

CT. Jeimmy Nataly Buitrago Leiva²⁵
Fuerza Aeroespacial Colombiana

Rosa Margoth Orjuela Rivera²⁶

Escuela de Postgrados de la Fuerza Aeroespacial Colombiana

Resumen: Los desafíos críticos asociados con la gestión de desechos espaciales en el contexto de la exploración y utilización del espacio, son un tema de gran relevancia en la creciente carrera espacial que busca ahora colonizar y establecer ciudades en un medio ambiente del cual conocemos poco, en este capítulo se explora el panorama actual de la basura espacial, destacando su impacto en el medio ambiente espacial y terrestre, así como la creciente

23* Capítulo de libro resultado del proyecto de investigación “Desarrollo Espacial en Colombia y aportes de la Fuerza Aeroespacial Colombiana”, del grupo de investigación “GICMA” de la Fuerza Aeroespacial Colombiana, categorizado en A por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (Minciencias) y registrado con el código COL140489. Los puntos de vista y los resultados de este capítulo pertenecen a los autores y no reflejan necesariamente los de las instituciones participantes.

24 Especialista en Planeación Ambiental y Manejo Integral de Recursos Naturales de la Universidad Militar Nueva Granada. Ecóloga de la Pontificia Universidad Javeriana. Jefe Sección Seguimiento Ambiental del Centro de Gestión Ambiental del Comando de Apoyo a la Fuerza. Oficial Fuerza Aeroespacial Colombiana. Código ORCID: 0009-0001-3015-5658. Contacto: adriana.caro@fac.mil.co.

25 Doctora en Ciencia y Tecnología Aeroespacial de la Universidad Politécnica de Cataluña (España). Magíster en Evaluación y Aseguramiento de la Calidad en Educación de la Universidad Externado de Colombia y Magíster en Logística Aeronáutica de la Escuela de Postgrados de la Fuerza Aeroespacial Colombiana. Administradora Aeronáutica de la Escuela Militar de Aviación “Marco Fidel Suárez”. Código ORCID: 0000-0003-1743-2312. Contacto: jeimmy.buitrago@epfac.edu.co.

26 Ingeniera de Sistemas, especialista en Dirección y Gestión de Proyectos, Docente de la Escuela de Postgrados de la FAC, coordinadora de la Maestría en Dirección y Gestión de la Seguridad Integral-MADGSI. Código ORCID: 0000-0001-6183-7486. Contacto: margoth.orjuela@epfac.edu.co.

preocupación internacional por su gestión. Se analiza el papel de la ecología humana en la carrera espacial y los componentes del entorno espacial, así como las iniciativas globales para abordar este problema, se detallan los esfuerzos internacionales, incluyendo la colaboración de agencias espaciales globales, como la NASA y la Agencia Espacial Europea en la reducción de desechos y el desarrollo de tecnologías para la eliminación activa de residuos, revisando el marco legal y las políticas vigentes, como las directrices de la ONU y las iniciativas de sostenibilidad, que buscan regular y mitigar la acumulación de basura espacial, promoviendo una gestión ambiental responsable y efectiva.

Palabras clave: Basura espacial; ecología humana; derecho espacial; desecho; impacto ambiental.

Introducción

La creciente dependencia de la sociedad moderna de los servicios satelitales ha impulsado una expansión sin precedentes de las actividades espaciales. Sin embargo, este progreso conlleva una consecuencia no intencionada: la generación masiva de desechos espaciales. Tras más de seis décadas de exploración espacial, la órbita terrestre se ha convertido en un depósito de satélites inactivos, etapas de cohetes abandonadas y millones de fragmentos resultantes de colisiones y explosiones (ESA, 2024). Esta “basura espacial” representa una amenaza crítica para la seguridad de las operaciones espaciales actuales y futuras, la sostenibilidad del entorno orbital y, potencialmente, para el medio ambiente terrestre.

Este capítulo tiene como objetivo analizar integralmente la problemática de los desechos espaciales, examinando su origen, evolución, impactos y las estrategias globales para su gestión. Desde una perspectiva interdisciplinaria, se integran aspectos técnicos, legales y ecológicos, aplicando el marco de la ecología humana para entender la interacción entre la actividad espacial y el medio ambiente. El capítulo se estructura como un estudio de investigación documental, presentando evidencia recopilada sistemáticamente para validar sus postulados y conclusiones.

Metodología

Enfoque y Diseño

Se adoptó una metodología de investigación documental con un enfoque cualitativo-descriptivo. Este diseño permite una revisión sistemática y crítica de la literatura existente para construir una visión comprehensiva del estado del arte respecto a los desechos espaciales.

Criterios de Selección y Exclusión

- Criterios de Inclusión:

- Documentos publicados entre 2010 y 2024 para garantizar actualidad. Artículos científicos revisados por pares, informes técnicos de agencias espaciales (NASA, ESA, JAXA), documentos de políticas públicas y normativas internacionales.
- Fuentes que aborden desechos espaciales, sostenibilidad espacial, impacto ambiental, marco legal y tecnologías de mitigación.

Categorías de análisis

La información fue organizada y analizada en las siguientes categorías:

1. **Cuantificación y Origen:** Estadísticas sobre cantidad, tipo y fuente de desechos.
2. **Entorno Orbital:** Características de las órbitas terrestres y su relación con la distribución y persistencia de desechos.
3. **Impactos:** Riesgos operacionales, económicos y ambientales.
4. **Marco Normativo:** Tratados internacionales, directrices, políticas nacionales e iniciativas de cooperación.

Proceso de Recolección y Análisis

La recolección de datos se realizó mediante una búsqueda sistemática en bases de datos especializadas (Scopus, Web of Science, NASA Technical Reports Server, ESA Publications) y portales institucionales (UNOOSA, Seradata SpaceTrack, LeoLabs). La muestra final quedó constituida por 85 documentos. El análisis consistió en la sistematización, categorización y triangulación de la información para identificar consensos, tendencias y vacíos en la literatura.

Panorama actual de la la basura espacial

Origen y concepto de la basura espacial

El Sputnik fue el primer satélite artificial lanzado, por la extinta Unión Soviética el 4 de octubre de 1957, y es en ese mismo instante que nace la basura espacial y por ende la acumulación y aumento de desechos espaciales.

La basura espacial comprende una variedad de objetos inservibles, principalmente fragmentos metálicos o plásticos, provenientes de satélites defectuosos, cohetes obsoletos, vehículos espaciales en desuso y restos de colisiones. Estos elementos, que ya no tienen funcionalidad y han llegado al final de su vida útil, flotan en el espacio sin control, contribuyendo a la creciente congestión en la órbita terrestre (Rossetto Erika, 2022).

Los desechos espaciales se originan de diferentes fuentes como las fallas de naves espaciales que resultan de la ruptura de estas debido a explosiones o fallas que originan miles de fragmentos de desechos que amenazan otros satélites (activos espaciales). La segunda fuente son los desechos que quedan después de las misiones espaciales como las etapas de los vehículos de lanzamiento abandonados y las naves espaciales que ya no funcionan, una tercera fuente son la acumulación de desechos espaciales que generan más fragmentos que fueron generados por colisiones de naves espaciales y también las motas de la pintura, y la última fuente puede ser la de acumulación histórica son acontecimientos importantes en ciertos momentos de la historia como la prueba de misiles balísticos chinos de 2007, han contribuido al rápido aumento en la cantidad de desechos espaciales.

La acumulación de estos desechos es un subproducto no intencionado de más de seis décadas de actividad espacial, resultando principalmente de la desintegración, explosión o colisión de los aproximadamente 8.950 satélites lanzados desde 1957 (ESA, 2024). Según la Agencia Espacial Europea (ESA), actualmente hay más de 900.000 fragmentos de desecho de más de 1 cm en órbita. La colisión de estos fragmentos con satélites operativos no solo pone en riesgo la misión de estos satélites, sino que también puede causar daños significativos a las naves espaciales (ESA, 2024).

El impacto económico de los desechos espaciales es considerable. La destrucción de satélites o la pérdida de órbitas debido al crecimiento descontrolado de los desechos podría afectar gravemente las actividades económicas europeas en el espacio, valoradas en más de 8.000 millones de euros (ESA, 2024).

Además, los operadores de satélites a nivel mundial gastan anualmente 14 millones de euros en maniobras para evitar colisiones con basura espacial, aunque más del 99 % de estas maniobras corresponden a falsas alarmas (ESA, 2024). Con la inminente comercialización del espacio y el despliegue masivo de pequeños satélites y grandes constelaciones en el marco del concepto Espacio 4.0, se prevé un aumento drástico en el número de alertas de colisión, generando varios cientos de miles de avisos cada semana para los operadores de megaconstelaciones.

En este contexto, es crucial que los países involucrados en la industria espacial reconozcan la gravedad del problema de la proliferación de desechos espaciales. La cooperación internacional en la regulación de la exploración espacial es esencial para enfrentar este desafío. Se requieren normas claras y mecanismos efectivos que aseguren la recuperación del equilibrio, la estabilidad del espacio exterior y su sostenibilidad a largo plazo, al igual que el desarrollo de tecnologías que automaticen las alertas de colisión, proporcionen datos orbitales altamente precisos y mitiguen o eliminen la basura espacial. Estas iniciativas no solo abrirán nuevas oportunidades de negocio y generarán empleo para la industria espacial global, sino que también posicionarán el desarrollo espacial como un sector competitivo en el mercado internacional.

Con este panorama, el entendimiento del origen y la evolución de la basura espacial es fundamental para formular estrategias efectivas que garanticen la preservación del espacio como un entorno operativo seguro y sostenible para futuras generaciones.

Contexto del entorno espacial

Órbitas terrestres

El estudio del entorno espacial y la gestión de los desechos espaciales requieren una comprensión de las órbitas terrestres. Las órbitas terrestres son trayectorias predecibles y estables alrededor de la Tierra, determinadas por la interacción gravitacional entre la Tierra y un objeto en órbita (Giudici, Colombo, Horstmann, Letizia, & Lemmens, 2024). La Figura 2 proporciona una vista axonométrica que ilustra diversas órbitas terrestres, destacando la ubicación de desechos espaciales y satélites activos. Este diagrama incluye detalles sobre el tipo de órbita, la altura, la velocidad típica de los objetos y la cantidad de satélites activos, así como las prácticas sostenibles esenciales para la prevención y mitigación de daños.

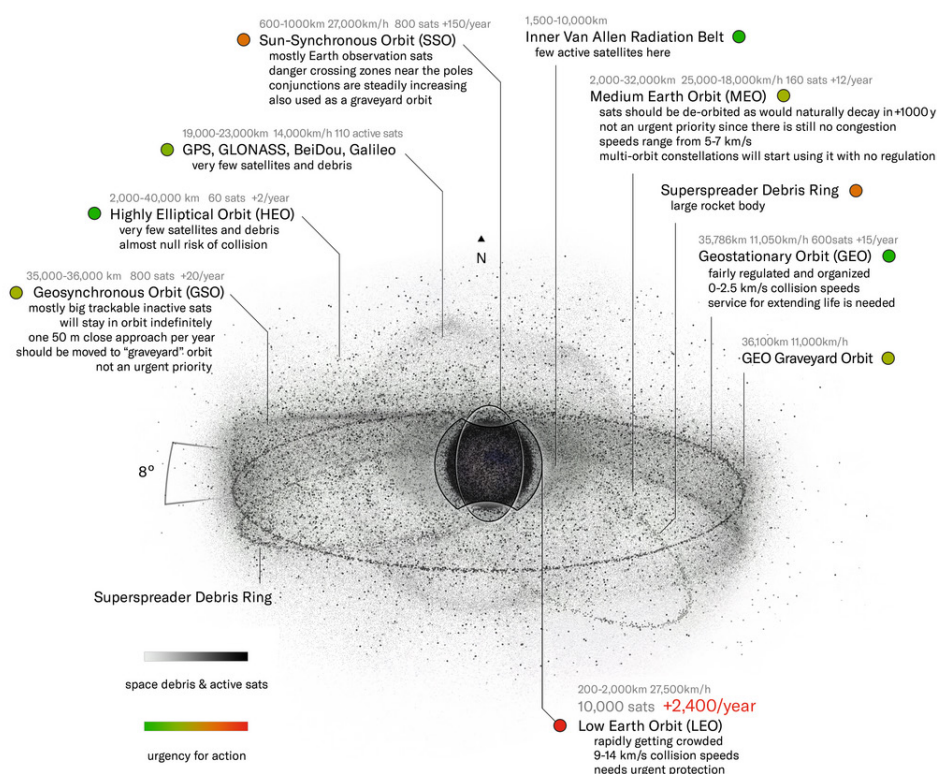
Las órbitas terrestres se clasifican principalmente en función de su altitud y características orbitales. Las dos categorías principales son la órbita terrestre baja (LEO) y la órbita geoestacionaria (GEO).

- **Órbita Terrestre Baja (por sus siglas en inglés LEO, Low Earth Orbit):** Esta órbita se encuentra a altitudes que van desde aproximadamente 160 kilómetros hasta 2.000 kilómetros sobre la superficie terrestre. Los objetos en LEO completan una órbita alrededor de la Tierra en un tiempo relativamente corto, típicamente entre 90 y 120 minutos. Los satélites en LEO son comúnmente utilizados para observación de la Tierra, imágenes de alta resolución y comunicación. Debido a la proximidad a la Tierra, la densidad de desechos espaciales en esta región es alta, y los fragmentos de satélites o restos de cohetes que colisionan pueden permanecer en esta órbita durante largos períodos antes de reentrar en la atmósfera.
- **Órbita Geoestacionaria (por sus siglas en inglés GEO, Geostationary Orbit):** Situada a una altitud de aproximadamente 35.786 kilómetros sobre el ecuador, la órbita geoestacionaria permite que un satélite mantenga una posición fija respecto a la superficie terrestre. Los satélites en esta órbita tienen un período orbital igual al período de rotación de la Tierra, lo que les permite observar el mismo punto del planeta continuamente. Esta órbita es crucial para aplicaciones como la telecomunicación, la transmisión de televisión y el monitoreo meteorológico. La acumulación de desechos espaciales en GEO es menos densa en comparación con LEO, pero los fragmentos que se encuentran en esta región pueden permanecer durante muchos años debido a la falta de fricción atmosférica que acelere su reentrada.

En la mecánica newtoniana, el movimiento natural de un satélite alrededor de la Tierra se describe mediante una ecuación diferencial vectorial de segundo orden. Este movimiento, asumiendo que la Tierra es esférica y que solo hay atracción gravitacional, puede resultar en trayectorias circulares, elípticas, parabólicas o hiperbólicas (Abdelkhalik & Gad, 2011). La naturaleza de la trayectoria depende de las condiciones iniciales del satélite en órbita, siendo la Tierra siempre el foco de estas trayectorias cónicas.

El diseño de órbitas es una tarea fundamental en la planificación de misiones espaciales, ya que determina cómo se cumplirán los objetivos de la misión. Por ejemplo, las misiones de teledetección, monitoreo de desastres, planificación urbana y vigilancia requieren que los satélites pasen sobre sitios específicos en la superficie terrestre. La selección de la órbita influye directamente en la cobertura del área en la superficie terrestre, permitiendo a los satélites capturar datos de los sitios de interés en función del campo de visión de sus sensores.

Figura 1. *Vista axiomatica de las Orbitas terrestres*



En complemento de lo anterior, la Tabla 1 expone una caracterización general de las órbitas terrestres.

Tabla 1. Diagrama de caracterización de Órbitas terrestres

ÓRBITA	ALTURA	SAT.ACTIVOS/ VIDA ÚTIL	RIESGO	VELOCIDAD TÍPICA DE LOS OBJETOS	PRÁCTICAS
GEO Graveyard Orbit:	36.100 kilómetros 11.000 kilómetros/h.				
Órbita Geostacionaria (GEO) 2.9682 KM/S	35.786km 11.050km/h	600 sats +15/año		Velocidades de colisión 0-2,5 km/s.	Bastante regulado y organizado. Se necesita un servicio para prolongar la vida útil
Órbita geosincrónica (OSG):	35.000- 36.000km	800 satélites +20/año en su mayoría grandes satélites inactivos rastreables.	Permanecerá en órbita indefinidamente.	Una aproximación cercana de 50 m por año.	Debería trasladarse a la órbita de “cementerio”. no es una prioridad urgente
Órbita altamente elíptica (HEO):	2.000- 40.000km	60 sats +2/año muy pocos satélites y desechos	Riesgo casi nulo de colisión		
GPS, GLONASS, BeiDou, Galileo:	19.000-23.000 km	110 satélites.	Muy pocos satélites y desechos		

ÓRBITA	ALTURA	SAT.ACTIVOS/ VIDA ÚTIL	RIESGO	VELOCIDAD TÍPICA DE LOS OBJETOS	PRÁCTICAS
Órbita terrestre media (MEO) 5.4786 KM/S	2.000-32.000 km	160 sat +12/año. Los sats deberían ser sacados de órbita, ya que se desintegrarían naturalmente en +1000 años.	No es una prioridad urgente ya que todavía no hay congestión.	Las velocidades oscilan entre 5 y 7 km/s.	Las constelaciones multiórbita comenzarán a utilizarlo sin regulación
órbita sincrónica del Sol (SSO):	600-1000km	800 sats +150/año.	Principalmente satélites de observación de la Tierra. Zonas de cruce peligrosas cerca de los polos.	Las conjunciones aumentan constantemente.	También se utiliza como órbita cementerio
Órbita terrestre baja (LEO): 5.7138 KM/S	200-2.000km	10.000 sats +2400/año.	Llenándose rápidamente.	Velocidades de colisión de 9 a 14 km/s	Necesita protección urgente

Fuente: M. Orjuela, datos de internet recopilado de diversas fuentes, febrero, 2024.

La comprensión de las órbitas terrestres es esencial para la gestión y mitigación de los desechos espaciales. Las prácticas sostenibles y la regulación adecuada son fundamentales para proteger estos valiosos entornos orbitales y asegurar la continuidad de las actividades espaciales en el futuro.

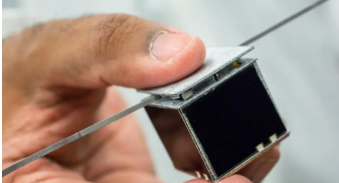
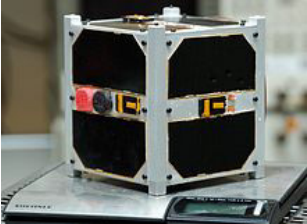
Satélites

El espacio se ha consolidado como un ámbito estratégico que lidera en numerosos sectores y disciplinas, incluidas la tecnología y la ciencia. Dentro de este vasto campo, uno de los componentes más prominentes es la tecnología satelital, que engloba arquitecturas de ingeniería diseñadas para cumplir una o varias misiones específicas (Mazzucato & Douglas, 2018). Los satélites, en términos generales, son cuerpos artificiales que orbitan la Tierra u otros cuerpos celestes con el propósito de llevar a cabo una amplia variedad de tareas, tales como la observación de la Tierra, la comunicación, la navegación, y la investigación científica (Sidi, 1997). La clasificación de los satélites según su masa resulta esencial para realizar un análisis integral de su ciclo de vida y el diseño de misión. La masa de un satélite impacta en diversos parámetros de su diseño y objetivos de misión, los cuales son cruciales para garantizar el éxito y la eficiencia de las operaciones espaciales (Kwon, Min, Kim, & Lee, 2023). Entre estos parámetros se incluyen:

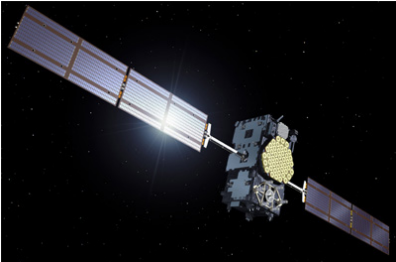
- La capacidad de carga útil: Relacionada con el tipo y cantidad de instrumentos o equipos que el satélite puede transportar.
- El tipo de órbita: Determinada por la masa, que influye en la altitud y la trayectoria del satélite.
- La duración de la misión: Influenciada por la capacidad de almacenamiento y la energía disponible del satélite.
- La estabilidad y el control orbital: Dependientes del diseño y la masa del satélite para mantener su trayectoria deseada (Sidi, 1997).

Estas consideraciones son cruciales para el éxito de las misiones espaciales, ya que afectan directamente la capacidad del satélite para alcanzar sus objetivos específicos en el entorno espacial. En relación con la masa, la Tabla 4 ofrece una clasificación detallada y sistemática de los satélites, organizando las distintas categorías según su masa. Este enfoque taxonómico proporciona una representación clara y ordenada de las diversas categorías, facilitando la comprensión y comparación de las características esenciales de los satélites.

Tabla 2. *Categoría de satélites pequeños (SmallSat) dependiente de su masa*

Categoría por masa	Nombre	Ejemplo de misión y año de lanzamiento		
< 100g	Femtosatellite			
		SunCube ²⁷ . Arizona State University		
0.1 – 0.99 kg	Picosatellite			
		ESTCUBE 1 (Tartu University (Estonia))		
1 – 10 kg	Nanosatellite			
		FACSAT-2 Chiribiquete. Fuerza Aérea Colombiana (FAC)		
10.01 – 40 kg	Microsatellite (Small)			
		ARGOMOON (LUNAR ORBITER) ASI - Agenzia Spaziale Italiana		

27 Para más información consultar el siguiente enlace: <https://news.asu.edu/20160406-creativity-asu-suncube-femtosat-space-exploration-for-everyone>

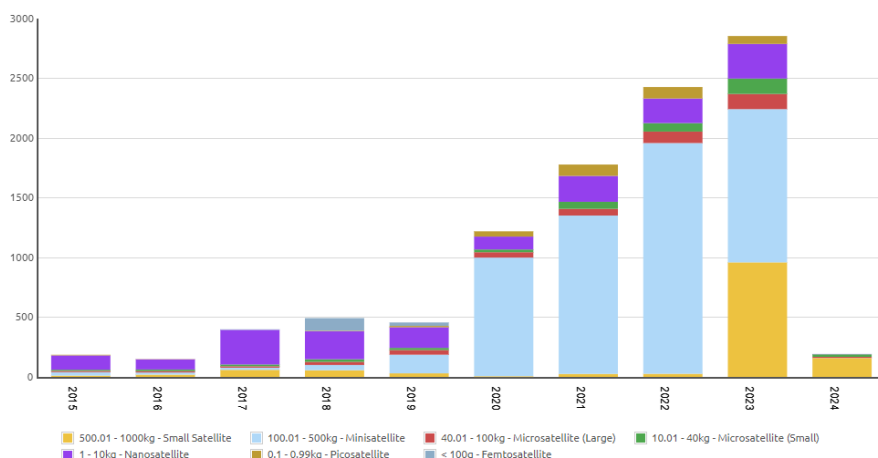
Categoría por masa	Nombre	Ejemplo de misión y año de lanzamiento	
40.01 kg – 100 kg	Microsatellite (Large)		2014
HODOYOSHI 1. University of Tokyo			
100.01 – 500 kg	Minisatellite		2024
ADRAS-J 1. Astroscale Japan			
500.01 – 1000 kg	Small Satellite		2021
GALILEOSAT 01 (GALILEO-IOV PFM). EU/EC - European Union/ European Commission (Belgium)			

Fuente: M. Orjuela, datos de internet recopilado de diversas fuentes, febrero, 2024.

En las últimas décadas, la tecnología satelital ha experimentado un crecimiento exponencial, impulsada por su utilidad y amplia aceptación. Este avance se refleja en la proliferación de grandes constelaciones de satélites, como las implementadas por compañías multinacionales como Starlink, que han transformado su uso desde aplicaciones exclusivas en el ámbito militar hacia una creciente integración en sectores comerciales (Millwood, 2023). La adopción

de estructuras más económicas y multifuncionales ha facilitado un acceso más amplio al espacio, lo que ha conducido a un incremento significativo en el número de lanzamientos. La Figura 2 ilustra la evolución de los lanzamientos de pequeños satélites desde 2015, de acuerdo con la clasificación detallada en la Tabla 2. Se observa una notable tendencia al aumento en el lanzamiento de nanosatélites y minisatélites, con un crecimiento particularmente evidente en los últimos años.

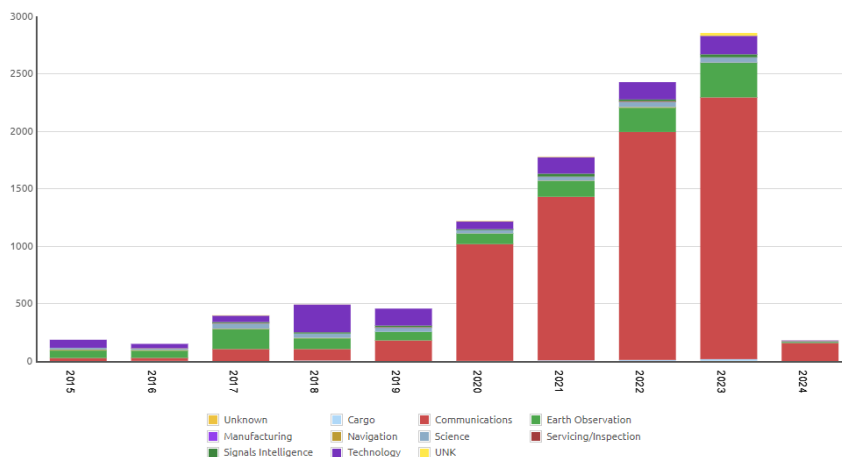
Figura 2. *Número de satélites lanzados por categoría de masa*



Fuente: N. Buitrago, datos de Spacetrack. Seradata, febrero, 2024.

El objetivo específico de una misión espacial está determinado por sus cargas útiles, también denominadas “payloads” en inglés. Esta variedad de cargas útiles refleja la amplia gama de propósitos de los satélites, que incluyen aplicaciones como la observación de la Tierra, la demostración tecnológica, el radar, las comunicaciones, la defensa contra satélites y usos militares. La Figura 3 presenta las principales categorías de misiones asociadas con estos satélites, destacando áreas clave como comunicaciones, investigación científica, observación de la Tierra, navegación y demostraciones tecnológicas. De manera destacada, se observa que la mayoría de las misiones de pequeños satélites se concentran en el top 3 de categorías: comunicaciones encabeza la lista, seguida de las misiones de observación de la Tierra y, en tercer lugar, las demostraciones tecnológicas. Esta diversidad de cargas útiles es fundamental para entender el análisis de las misiones espaciales.

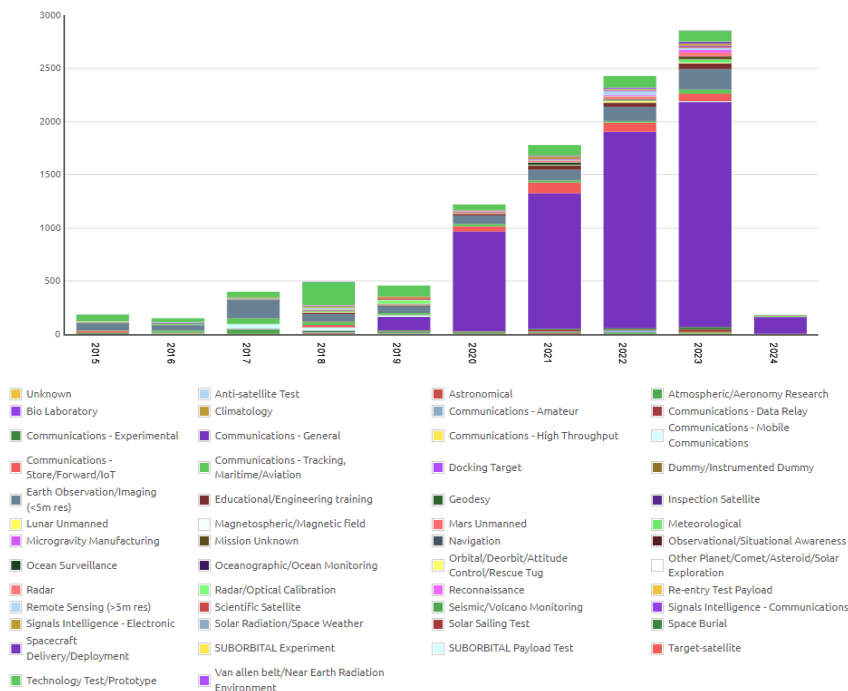
Figura 3. *Clasificación de Small Satellites por objetivo principal de misión*



Fuente: N. Buitrago, datos de Spacetrack.Seradata, febrero, 2024.

La Figura 3 revela una clara tendencia hacia el uso de satélites de comunicación, con un total de 2116 lanzamientos registrados en 2023. Además, proporciona un análisis detallado de las subcategorías dentro de las principales misiones de pequeños satélites. En particular, se destaca el lanzamiento de 70 satélites destinados a Internet de las Cosas (IoT), seguido por 192 satélites enfocados en la observación de la Tierra con una resolución menor a 5 metros, ambos dentro del ámbito de las comunicaciones. Los satélites de prueba tecnológica, que incluyen prototipos, se posicionan en tercer lugar con 102 lanzamientos. Otras misiones, como las de exploración lunar y planetaria, así como las misiones de reconocimiento, también han experimentado un aumento progresivo en los últimos años, reflejando una expansión en la diversidad de objetivos espaciales.

Figura 4. Clasificación específica de misiones primarias de Small Satellites



Fuente: N. Buitrago, datos de Spacetrack. Seradata, febrero, 2024.

La creciente preocupación por la “basura espacial” ha emergido debido a la acumulación significativa de satélites inactivos y desechos en órbita, excluyendo los nuevos lanzamientos que amplían aún más esta problemática. Estos objetos, predominantemente ubicados en órbitas bajas, ocupan espacio valioso y pueden enfrentar riesgos operativos, como la pérdida de control y posibles colisiones entre satélites, fenómeno conocido como el efecto Kessler. La investigación de estrategias para reducir gradualmente la cantidad de desechos espaciales ha pasado a ser una prioridad global. En respuesta, se están desarrollando nuevas iniciativas que incluyen el reciclaje espacial y la construcción de estructuras con componentes diseñados para minimizar su impacto ambiental.

Panorama Cuantitativo de la Basura Espacial

Los resultados de la recopilación de datos confirman la magnitud del problema. Desde 1957, se han realizado aproximadamente 6.050 lanzamientos, que han colocado en órbita alrededor de 13.630 satélites. De estos, sólo unos 6.600

permanecen operativos; el resto se ha convertido en basura espacial (ESA, 2024). La Red de Vigilancia Espacial de EE.UU. rastrea más de 28.160 objetos, de los cuales se estima que:

- Más de 36.500 son fragmentos mayores de 10 cm.
- Cerca de 1 millón miden entre 1 y 10 cm.
- Más de 130 millones de partículas están entre 1 mm y 1 cm.

La Tabla 2 resume la contribución de los principales países/organizaciones a la población de objetos en órbita, evidenciando la naturaleza global del problema.

Tabla 2. *Reporte de países con Satélite en órbita hasta el 04 de octubre 2020*

País/ Organización	Satélite	Cuerpos de cohetes usados y catálogo de basura espacial	Total
Estados Unidos	2,588	4,898	7,486
CIS (Rusia y aliados)	1,546	5,576	7,122
China	431	3,748	4,179
Otros	1,066	125	1,191
Francia	69	510	579
Japón	187	179	366
India	100	121	221
ESA	92	57	149
TOTAL	6,079	15,214	21,293

Fuente: Adaptado del catálogo del U.S. Space Surveillance Network (T. KENNEDY, J. MURRAY, AND R. MILLER, 2020).

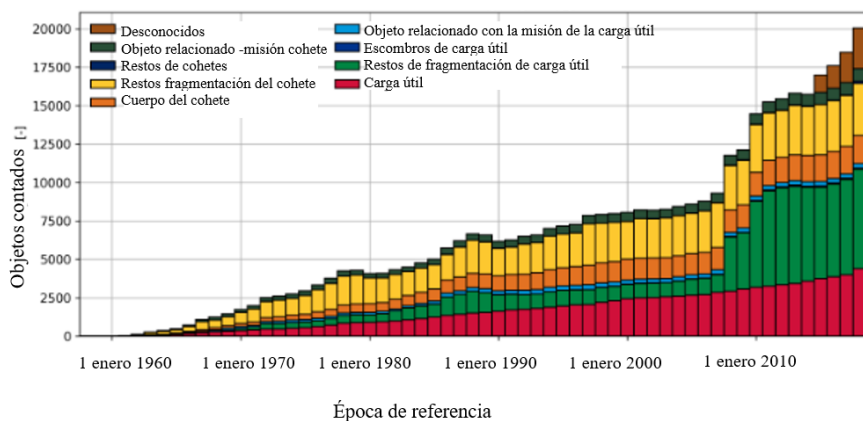
El análisis documental permitió caracterizar el entorno orbital, identificando las regiones de mayor riesgo. A partir de los años 2000, se observa un crecimiento significativo y continuo en la cantidad de estos objetos (Figura 1). Entre 2013 y 2022 se lanzaron 8396 satélites, y en el primer trimestre de 2023 se añadieron 1649 naves espaciales a este grupo (Seradata SpaceTrack, 2023). La aparición de compañías privadas que lideran enfoques innovadores, como el desarrollo de satélites pequeños, cohetes reutilizables e incluso el turismo espacial, ha provocado cambios sustanciales en la industria espacial (Foreman

Campins, 2023). Los avances rápidos en ciencia e ingeniería dentro de este movimiento transformador, denominado “NewSpace”, han sido impulsados por la miniaturización tecnológica, modelos de negocio rentables y metodologías rigurosas de control de calidad (Parrella & et al., 2022). Esto ha permitido la participación de una gama más amplia de actores en el sector aeroespacial (Ghidini, Grasso, Gumpinger, Makaya, & Colosimo, 2023).

Los avances rápidos en ciencia e ingeniería dentro de este movimiento transformador, denominado “NewSpace”, han sido impulsados por la miniaturización tecnológica, modelos de negocio rentables y metodologías rigurosas de control de calidad (Parrella & et al., 2022). Esto ha permitido la participación de una gama más amplia de actores en el sector aeroespacial (Ghidini, Grasso, Gumpinger, Makaya, & Colosimo, 2023). En los últimos años, los logros acelerados del NewSpace han contribuido al crecimiento global, impulsando avances en los campos tecnológico, académico, económico y social del sector espacial (Cloitre, Dos Santos, & Theodoraki, 2023). Se han realizado progresos notables, particularmente en el campo de la tecnología de satélites (Tucker & Hank C., 2023). Lo anterior, ha motivado esfuerzos colaborativos como el de la tríada Universidad-Empresa-Estado, que han sido esenciales para que las diversas naciones inicien, desarrollen y mantengan su participación en la carrera espacial (Paravano, Locatelli, & Trucco, 2023).

Tal como se presenta en la Figura 5, el crecimiento notable de esta industria se evidencia en el lanzamiento de grandes constelaciones, como las iniciativas recientes de Starlink, OneWeb, Telesat, Kuiper, entre otras (Buitrago, Camps, & Moncada, 2024). En los últimos años, los logros acelerados del NewSpace han contribuido al crecimiento global, impulsando avances en los campos tecnológico, académico, económico y social del sector espacial (Cloitre, Dos Santos, & Theodoraki, 2023). Se han realizado progresos notables, particularmente en el campo de la tecnología de satélites (Tucker & Hank C., 2023). Lo anterior, ha motivado esfuerzos colaborativos como el de la tríada Universidad-Empresa-Estado, que han sido esenciales para que las diversas naciones inicien, desarrollen y mantengan su participación en la carrera espacial (Paravano, Locatelli, & Trucco, 2023). Tal como se presenta en la Figura 1, el crecimiento notable de esta industria se evidencia en el lanzamiento de grandes constelaciones, como las iniciativas recientes de Starlink, OneWeb, Telesat, Kuiper, entre otras (Buitrago, Camps, & Moncada, 2024).

Figura 5. *Evolución en el tiempo de los tipos de objetos en el espacio*



Fuente: Gráfica traducida al español, extraída de (ESA, 2024).

Jason Held señala que, en los primeros días de la exploración espacial, la generación de objetos abandonados en órbita no era una preocupación significativa. Sin embargo, hoy en día, este problema ha cobrado una creciente relevancia y afecta de manera considerable a nuestro planeta Tierra (Melissa Davey, 2017). La seguridad planetaria se ve comprometida por los constantes lanzamientos de cohetes y satélites, que dejan tras de sí una creciente cantidad de desechos espaciales en la órbita terrestre. Estos residuos representan un riesgo significativo para la seguridad de las naves espaciales, su tripulación y el éxito de las operaciones en el espacio.

Problemática general

Los países que cuentan con activos estratégicos espaciales, así como las agencias encargadas de los lanzamientos, frecuentemente carecen de un seguimiento y análisis programados para monitorizar los elementos en el espacio una vez que han cumplido su objetivo, estos objetos, al no tener un destino final asignado, son desechados y abandonados, convirtiéndose en basura espacial.

La basura espacial representa un peligro significativo para los satélites en órbita. Los satélites operativos deben realizar maniobras evasivas para evitar colisiones con los desechos espaciales, que pueden dañarlos o destruirlos. Con la creciente cantidad de desechos circulantes en la órbita, se genera la llamada nube de desechos orbitales, que actualmente se estima en alrededor

de 3 millones de kilogramos de basura espacial (Changxuan, Zihan, Chao, & Dong, 2024).

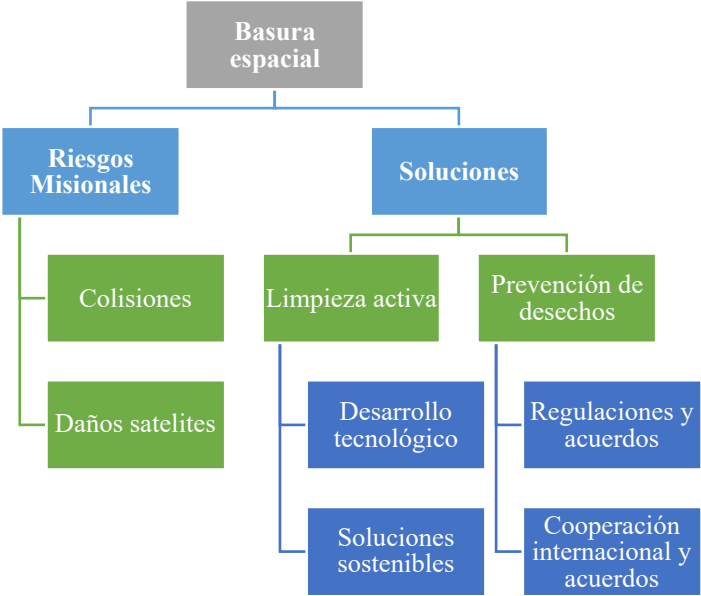
Existen mecanismos de seguimiento y detección, conocidos como “tracking systems,” que utilizan radar y telescopios para monitorizar piezas o cuerpos lanzados al espacio. Por ejemplo, la Red de Vigilancia Espacial de los Estados Unidos (U.S. Space Surveillance Network, SSN) rastrea más de 20,000 objetos mayores de 10 centímetros en la órbita terrestre (Locke, Colvin, Ratliff, Abdul-Hamid, & Samples, 2024). Estos sistemas permiten la predicción de posibles colisiones y la planificación de maniobras evasivas. Sin embargo, a pesar de estos esfuerzos, los fragmentos más pequeños, que también pueden causar daños significativos, son más difíciles de rastrear y gestionar.

Investigaciones científicas y académicas destacan la necesidad de desarrollar tecnologías y estrategias más efectivas para la mitigación y remoción de desechos espaciales. Proyectos como la misión RemoveDEBRIS (Forshaw, y otros, 2016), financiada por la Comisión Europea, han probado técnicas como redes y arpones para capturar desechos en órbita. Además, se están explorando métodos para el desarrollo de satélites y componentes espaciales que minimicen el impacto ambiental y faciliten su desorbitación segura al final de su vida útil.

La Figura 6 proporciona un resumen del impacto de la gestión de la basura espacial en el entorno espacial. Este aspecto es crucial no solo para la protección de los satélites operativos y la seguridad de las misiones espaciales, sino también para la sostenibilidad a largo plazo del entorno espacial. La gestión eficaz de la basura espacial es esencial, ya que el espacio se ha convertido en un recurso vital para las comunicaciones globales, la observación de la Tierra y la investigación científica.

Para comprender la importancia de esta acción, la Tabla 3 detalla los accidentes que han generado desechos espaciales orbitales (OSD) y su impacto negativo en el entorno espacial.

Figura 6. Impacto de la basura Espacial



Fuente: M. Orjuela, datos de internet recopilado de diversas fuentes, febrero, 2024.

Tabla 3. Accidentes generadores de desechos espaciales orbitales OSD

AÑO	PAÍS	NAVE	DETALLE
1978	Rusia	soyus11	De regreso a la Tierra, mueren los tres tripulantes, por la explosión de pernos que provocaron la apertura de la válvula de compensación de presión y en consecuencia provocó una despresurización.
24 enero de 1978	Canadá	Kosmos 954	Nave nuclear reingreso no planificado en Canadá, dispersando partes radiactivas del reactor en 124.000 km 2 de tierra
1996	Francia	Cerise	Colisión con grandes trozos de basura que destruyeron la nave
feb 1996	Rusia	Raduga-33	Satélite de comunicación militar. Se generó más de 200 piezas OSD tras la explosión de su propulsor de cuarta etapa
11- enero 2007	China	Fengyun-1C	Satélite meteorológico Destrucción intencionada con Misil terrestre colisión vehículo de destrucción cinética ASAT aumentó la OSD en un 25%. 3.525 piezas OSD rastreables con tamaños de más de 10 cm y cerca de 40.000 no rastreables.
2008	RUSIA	Cosmos-2421	Satélite militar generando más de 500 piezas

AÑO	PAÍS	NAVE	DETALLE
10 feb 2009	EE. UU y Rusia	Colisión de los satélites Iridium 33 y kosmos 2251	Chocaron a 11,7 km/s generaron más de 100.000 fragmentos de escombros imposibles de rastrear, 2300 fragmentos rastreables Iridium 33 (657 escombros) Cosmos 2251 (1715 escombros). Total, de 2372 piezas de escombros catalogadas a octubre de 2023, se han descompuesto y han vuelto a entrar en la atmósfera donde se han quemado
2023	EEUU		Los 7 tripulantes muren debido a la desintegración del transbordador espacial al entrar en la atmósfera terrestre.
	RUSIA	Progres 59	Cargo comenzó a girar violentamente poco después de alcanzar la órbita y se quemó en la atmósfera terrestre.
11-enero 2007	Unión Soviética	Satélite RORSAT	Satélite de reconocimiento, el circuito de enfriamiento del reactor nuclear del satélite de la nave espacial Radar Ocean Reconnaissance Satélite, derramó en el espacio más de 50.000gotas de refrigerante con un rango de tamaño de 5 mm o más. lo que provocó la introducción de un tipo diferente de contaminante, es decir, gotitas líquidas de sodio-potasio (NaK).

Fuente: M. Orjuela, datos de internet recopilado de diversas fuentes, febrero, 2024.

La cantidad de basura espacial ha ido aumentando con el paso de los años debido a las misiones espaciales y la colocación de satélites en órbita. Aquí está la cantidad aproximada de desechos rastreados en la órbita de la Tierra según el Informe de situación de la IAA sobre los desechos espaciales. (<https://starwalk.space/>, 2022). La Tabla 4 hace referencia a nivel cuantitativo de la detección de estos objetos en órbita.

Tabla 4. *Situación de Desechos Espaciales*

AÑO	OBJETOS RASTREADOS	TAMAÑO PIEZA	OBJETOS NO RASTREABLES
1993	77000 objetos		
2001	8700 objetos	Diámetro superior $\geq$ a 10 cm en la LEO	
2005	10300 objetos		
2013	16600 objetos	Diámetro superior $\geq$ a 1 metro en GEO	131 millones con un tamaño de 1mm a 1cm
2016	17700 objetos		
2022	31870 objetos		

Fuente: M. Orjuela, datos de internet recopilado de diversas fuentes, febrero, 2024.

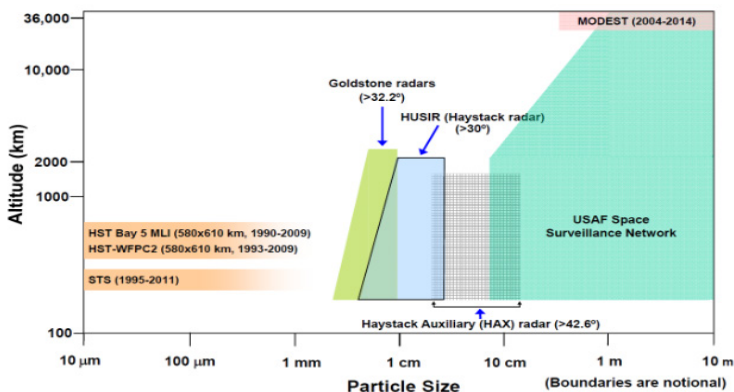
Los cálculos de la ESA estiman que hay más de 130 millones de objetos (no operativos) que contaminan la órbita de la Tierra. De ellos, 36 500 son desechos espaciales de más de 10 centímetros, 1 millón rondan los 1 y 10 centímetros y el resto se compone de objetos de entre 1 milímetro y 1 centímetro. La estimación de la agencia, se han lanzado más de 6250 cohetes en misiones al espacio, y se han puesto en órbita unos 13 630 satélites. “La agencia destaca también que 6600 satélites siguen en funcionamiento, mientras que 2250 de los que siguen en órbita ya se consideran basura espacial.” (Rossetto Erika, 2022).

Medición de escombros

Las mediciones de los desechos orbitales cercanos a la Tierra se logran mediante la realización de observaciones, algunas fuentes de datos han sido la Red de Vigilancia Espacial de EE. UU., el radar Haystack X-Band y las superficies devueltas por el Solar Max, la Instalación de Exposición de Larga Duración (LDEF), el Telescopio Espacial Hubble (HST) y el Transbordador Espacial. Los datos proporcionan validación para los modelos ambientales e identifican la presencia de nuevas fuentes (Stansbery Eileen K., 2019).

La Red de Vigilancia Espacial del Centro de Operaciones Espaciales Combinadas de EE. UU. Afirma que los objetos viajan en diferentes direcciones, a diferentes altitudes, en diferentes planos elípticos, generando congestión, la cual empeora cada año (Figura 7).

Figura 7. Mitigación de escombros



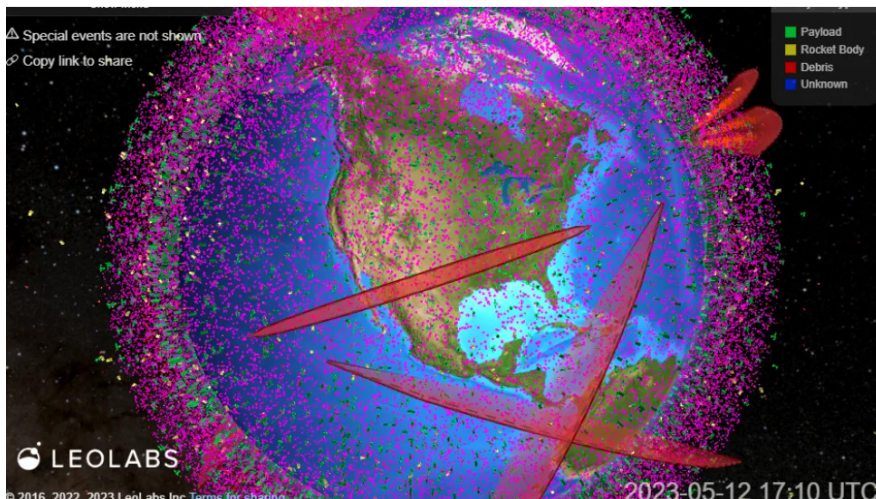
Nota. Datos de medición utilizados por el ODPO de la NASA para describir las poblaciones de desechos orbitales en el entorno espacial cercano a la tierra. Fuente: NASA ODPO.

Los satélites normalmente se diseñan y construyen considerando que se evitará el mantenimiento en la medida de lo posible durante su vida útil promedio de 15 años o más.

La empresa LeoLabs creó un mapa interactivo que muestra en tiempo real la cantidad de basura digital que flota sobre la Tierra, este realiza un seguimiento preciso de la basura espacial de apenas 2 centímetros de diámetro. (el mapa permite consultar la cantidad de basura espacial sobre la Tierra en función de su origen, tipo, estatus y ubicación. Además, ofrece detalles sobre el nombre del cuerpo, la carga útil, su perigeo y apogeo, así como el origen de la basura espacial identifica el tipo de basura espacial que flota en tiempo real sobre un país (González, 2023).

De acuerdo con la Agencia Espacial Europea, hay aproximadamente 9,000 toneladas de basura espacial orbitando alrededor de nuestro planeta. Rusia y Estados Unidos son los dos países más contaminantes. (Espinosa, 2022).

Figura 8. *Mapa interactivo de Basura espacial LEOLABS*



Fuente: LEOLABS. Acceso a portal web a través del link: <https://platform.leolabs.space/visualization>

Riesgos operacionales de la basura espacial

La basura espacial representa un riesgo significativo para los astronautas, las misiones y vuelos espaciales con y sin tripulación con un significativo riesgo de colisionar, por encontrarse en órbitas cercanas a la tierra esto aumenta la probabilidad de encuentros no deseados, por lo que los astronautas al detectar esta basura deben hacer maniobras para evitarla consumiendo tiempo y arriesgando recursos como combustible.

La basura espacial se mueve a altas velocidades en órbita alrededor de la Tierra, estos objetos, aunque sean pequeños pueden causar daños graves al impactar contra una nave ya que su velocidad es de más de 28.000 km/h., pueden perforar paneles solares, dañar sistemas críticos o incluso poner en peligro la vida de los astronautas, cuando dos objetos colisionan, pueden generar más fragmentos de basura espacial creando una cadena de colisiones (Peng, Kou & Chen, 2024).

Si un objeto perfora la estructura de una nave espacial, causa despresurización causando una catástrofe para la tripulación, o si impacta con un astronauta su traje, aunque resistente, se podría dañar y exponer al astronauta al vacío. El problema de la basura espacial requiere atención continua y esfuerzos para mitigar su impacto en la seguridad de los astronautas y actividades espaciales. Sin satélites no sería posible observar el planeta y tampoco alertar a la población en caso de ciclón o Tsunami, el tráfico aéreo y marítimo sería perjudicado e incluso se interrumpirían las transacciones financieras, la sociedad retrocedería varios años.

La basura espacial impacta la Luna

De acuerdo con lo manifestado por Starwalk “En el año 2022, un trozo de basura espacial llegó por primera vez a la superficie lunar.” La etapa superior de un cohete chino lanzado en el 2014 golpeó la cara oculta de la Luna el 4 de marzo de 2022. “Nadie vio el impacto, pero de acuerdo con simulaciones por ordenador, la pieza del cohete aterrizó en algún lugar cerca del cráter Hertzprung y debería haber dejado un cráter de unos 20 m de diámetro. (<https://starwalk.space/>, 2022)

Basura espacial golpeando la Tierra

Aunque la mayor parte de la basura espacial se quema en la atmósfera, trozos de escombros han golpeado la superficie de la Tierra varias veces. Pero no causaron ningún daño significativo. Estos son algunos de los casos:

Uno de los primeros eventos registrados ocurrió el 5 de septiembre de 1962, cuando una pieza de Sputnik IV cayó en Manitowoc, Wisconsin. La pieza medía 0,15 m de tamaño y 9,5 kg de masa.

La primera persona herida por el impacto (casi) directo de la basura espacial fue Wu Jie, un niño de 6 años de China en el 2002. Una pieza de aluminio de 10 kg del lanzamiento de la nave espacial Ziyuan-2B golpeó un árbol de caqui bajo el cual el niño estaba jugando. “Wu Jie sufrió una fractura en el dedo del pie y una hinchazón en la frente.” El 31 de julio de 2022, la etapa central vacía de Long March-5B hizo un reingreso descontrolado sobre Indonesia y Malasia, pero afortunadamente nadie resultó herido. (<https://starwalk.space/>, 2022).

La NASA confirma un mes después que el objeto que cayó en la casa de Florida (sureste) de propiedad del señor Alejandro Otero de Napoles el 8 de marzo de 2024, es basura espacial que se quemó durante su ingreso a la atmósfera perteneciente a la Estación Espacial Internacional-EEI. Este era un objeto de aleación de metal Inconel con un peso de 0.7kg, y medida de 10cm de alto y 4 cm de diámetro, que atravesó la casa de dos pisos del señor Otero, sin causar heridas (Vega Matias, 2024).

Atención Internacional y Marco Legal de la Basura Espacial

La gestión de la basura espacial ha captado la atención internacional debido a los riesgos que representa para la seguridad y sostenibilidad del entorno espacial. El Comité de las Naciones Unidas sobre los Usos del Espacio Ultraterrestre con Fines Pacíficos ha desempeñado un papel crucial en abordar este problema, promoviendo estrategias de prevención y minimización de desechos espaciales. Se anima a los estados miembros y organizaciones a compartir anualmente sus investigaciones y actualizaciones sobre mitigación de desechos, que incluyen mecanismos para la asignación de recursos orbitales, medidas de fomento de la confianza y gestión de crisis. Iniciativas

como las Directrices para la Mitigación de Desechos Espaciales (Space Debris Mitigation Guidelines) y la Conciencia Situacional Espacial (Space Situational Awareness, SSA) fomentan la cooperación internacional para el seguimiento y la reducción de la basura espacial.

Países como Estados Unidos, Rusia y miembros de la ESA han implementado políticas nacionales que obligan a los operadores de satélites a seguir prácticas de mitigación de desechos. Sin embargo, se reconoce la necesidad de un tratado global jurídicamente vinculante para abordar eficazmente la cuestión de los desechos espaciales. Los expertos subrayan que un esfuerzo colectivo es esencial para salvaguardar las órbitas terrestres y asegurar su uso sostenible a largo plazo.

Es imperativo que la comunidad internacional, la comunidad científica y las agencias espaciales colaboren en el desarrollo de tecnologías de limpieza y soluciones sostenibles. Tal como sostiene Rossetto, las soluciones para este problema dependen de tres acciones: la inversión en tecnología, la limpieza del espacio y la cooperación entre empresas y agencias espaciales.

Operaciones y Marco Legal en el Contexto de ISAM

El entorno operativo de los satélites que han fallado en órbita pero que aún mantienen su capacidad funcional, conocidos como “satélites zombis” (Buitrago-Leiva, El Khayati Ramouz, Camps, & Ruiz-de-Azua, 2024), dentro de la propuesta legal que propone su uso o reparación en el espacio, contempla el marco de los Servicios de Asistencia, Ensamblaje y Fabricación en el Espacio (ISAM) incluyendo una variedad de actividades, como la remoción activa de desechos (ClearSpace-1, ADRAS-J), la extensión de misión (Northrop Grumman MEV-1), la logística de transporte (NanoRacks, Sherpa, D-Orbit ION) y la reparación y construcción en el espacio. Estos servicios son esenciales para mantener la funcionalidad y prolongar la vida útil de los satélites, reduciendo así la generación de nuevos desechos.

Es esencial considerar los aspectos legales que sustentan el desarrollo de estas actividades. Algunas de las misiones mencionadas han generado discusiones sobre regulaciones que buscan fortalecer estas actividades en el futuro. Por ejemplo, la misión CLEARSPACE-1, que se llevará a cabo hasta 2026, es un caso ilustrativo de remoción de desechos. Esta misión, comisionada por la ESA y apoyada por su socio Omega, implica un adaptador de carga útil. Asimismo, las misiones de remoción de desechos CLEAR, que utilizan dos naves espaciales licenciadas por el Reino Unido y contratadas por la Agencia

Espacial del Reino Unido, están programadas para concluir en 2026. Además, la misión ENCORE, diseñada para extender la vida útil de los satélites GEO, tiene previsto su primer servicio entre 2027 y 2028, en colaboración con su cliente principal.

En este contexto, el entorno regulatorio que afecta a las actividades ISAM, con un enfoque en la gobernanza espacial y la sostenibilidad, se detalla en las tablas correspondientes. La gestión adecuada de la basura espacial es fundamental no solo para la protección de los satélites operativos y la seguridad de las misiones espaciales, sino también para la sostenibilidad a largo plazo del entorno espacial, un recurso vital para las comunicaciones globales, la observación de la Tierra y la investigación científica.

Crecimiento de la Actividad Espacial y Desarrollo de Nuevas Tecnologías

Con el aumento de lanzamientos de satélites comerciales, especialmente constelaciones de satélites pequeños, el problema de los desechos espaciales se agrava. La inversión continua en tecnologías de mitigación y eliminación de desechos es una prioridad para el futuro de las operaciones espaciales seguras. La industria aeroespacial está desarrollando tecnologías avanzadas y confiables capaces de reducir la basura espacial mediante métodos innovadores de captura y eliminación, como redes, brazos robóticos y sistemas de propulsión. Un ejemplo es la propuesta tecnológica de ClearSpace-1, programada para 2025, que pretende retirar un fragmento del cohete Vega lanzado en 2013. Este vehículo utilizará varios brazos mecánicos para capturar el fragmento en órbita y luego iniciar una maniobra de descenso para desintegrarlo junto con el vehículo debido a la fricción atmosférica (ESA, 2019).

Políticas y Cooperación Global

Es crucial fortalecer las políticas internacionales y nacionales, así como fomentar una mayor cooperación global para gestionar de manera efectiva la basura espacial. Recientemente, doce países han manifestado su intención de firmar la “Carta de Basura Cero en el Espacio”, una iniciativa que busca lograr la neutralidad en materia de desechos espaciales para 2030. La Agencia Espacial Europea (ESA) también ha firmado esta carta como organización intergubernamental (ESA, 2019).

Dentro de este marco, el entorno regulatorio que afecta a las actividades de ISAM, considerando un enfoque de gobernanza espacial con un énfasis específico en la seguridad y sostenibilidad, se menciona en la Figura 9.

Además, los desarrollos recientes en el marco regulatorio se presentan en la Figura 10. Adicionalmente, también se exponen algunas de las políticas y estándares de la NASA en esta materia (S. Thuy Nguyen-Onstott., 2019):

- NASA-HDBK-8719.14: Manual de la NASA para limitar los desechos orbitales
- NASA-STD-8719.14: Proceso para limitar los desechos orbitales (Revisión A con cambio 1 del 25/05/2012)
- NPR 8715.6B: Requisitos de procedimiento de la NASA para limitar los desechos orbitales y evaluar los entornos de meteoritos y desechos orbitales
- En febrero de 2007, el Subcomité Científico y Técnico (STSC) del Comité sobre la Utilización del Espacio Ultraterrestre con Fines Pacíficos (COPUOS) completó un plan de trabajo plurianual con la adopción de un conjunto consensuado de directrices para la mitigación de desechos espaciales basadas en la Directrices del CID. Las directrices fueron aceptadas por la COPUOS en junio de 2007 y respaldadas por la Asamblea General de las Naciones Unidas a finales de 2007 (T. KENNEDY, J. MURRAY, AND R. MILLER, 2020).

Tabla 5. Regulatory framework: Recent developments

Institución	Documentos
Naciones Unidas	No applicable
Estándares Internacionales	· ISO 24330
	· AIAA In-Orbit Servicing standards
	· Uk Space Sustainability Standard
Políticas Nacionales	· ESA Zero Debris Standard and Policy
	· ESA CPO Guidelines
Licencias	· New Zealand policy on ADR and IOS
	· US FCC 5-year PMD
	· French consultation on new technical regulation
	· US FAA NPRM Mitigation Methods for Launch Vehicle Upper Stages on the Creation of Orbital Debris
	· UK Consultation on Orbital Liabilities, Insurance, Charging and Space Sustainability
	· EU Space Law

Institución	Documentos
Industria	· Zero Debris Charter
	· ESSI Memorandum of Principles

Nota. Color Azul: Nivel Internacional, Color Verde Nivel de Agencia Espacial o nacional, Color Naraja Nivel Industrial, Color Rojo En desarrollo, y Color Morado Promulgado. Tabla basada en los datos proporcionados por Clearspace Today Company (Buchs, Patel, Tuttle, & Maclay, 2023).

Tabla 6. ISAM activities regulatory framework

Instituciones	Documentos	Vinculantes
Naciones Unidas Estandares Internacionales	· Five United Nations treaties on outer space	Legalmente vinculante
	· ITU Radio Regulations	
	· United Nations Space Debris Mitigation Guidelines	Voluntario, No legalmente vinculante
	· Guidelines for the Long-Term Sustainability of Outer Space Activities (LTS Guidelines)	
	· Inter-Agency Space Debris Coordination Committee (IADC) guidelines	
	· International Organization for Standardization (ISO) standards	
	· European Commission: EUROPEAN GREEN DEAL: JRC Technical reports: Life cycle assessment for the impact assessment of policies	
Políticas Nacionales	· Government policies set requirements for domestic programs	Mandatorio para programas de gobierno
	· Space agency policies (e.g., NASA, ESA, CNES, UKSA, DLR, JAXA)	
Licencias	Licencias comerciales a nivel nacionales: CAA (UK), FCC/NOAA/FAA (US), CNES (FR), Algunos ejemplos:	Mandatorio para programas comerciales

Instituciones	Documentos	Vinculantes
Licencias	Estados Unidos	Mandatorio para programas comerciales
	· Textos legales: Coe of Federal Regulations	
	· Regulaciones: FCC, NOAA, FAA	
	· Mitigación de la basura espacial:	
	o Requerimientos propios basados en el CDMSP y estándares de NASA.	
	· Textos legales: Coe of Federal Regulations	
	· Regulaciones: FCC, NOAA, FAA	
	· Mitigación de la basura espacial:	
	o Requerimientos propios basados en el CDMSP y estándares de NASA.	
	· On-orbit third- party liability:	
	o No indemnification of insurance requirement	
	· Application process: Public	
	Reino Unido	
	· Textos legales: Outer Space Act 1986; Space Industry Act 2018	
	· Regulaciones: UKSA, CAA	
	· Mitigación de la basura espacial:	
	o No explicit requirements but evaluations on a case-by-case basis	
	· On-orbit third- party liability:	
	o Indemnification and TPL insurance requirements	
	· Application process: Confidential	
	Francia	
	· Textos legales: French Space Operations Act	
	· Regulaciones: CNES	
	· Mitigación de la basura espacial:	
	o Own quantitative requirements in the French Technical Regulations	
	· On-orbit third- party liability:	
	o Indemnification and TPL insurance requirements	
	· Application process: Confidential	
	Suiza	
	· Textos legales: Law in development with entry into force planned for 2027	

Instituciones	Documentos	Vinculantes
Industria	· Satellite Industry Associations	Voluntario, No legalmente vinculante
	· Space Data Association	
	· Space Safety Coalition	
	CONFERS	
	· Guiding Principles for Commercial RPO and OOS	
	· Recommended Design and Operational Practices (2017)	
	PARIS PEACE FORUM	
	· “Net Zero Space” Declaration (2021)	
	Earth Space Sustainability Initiative (ESSI)	
	· Memorandum of Principles for Space Sustainability (2023)	
	· Astra Carta- To Care For The Infinite Wonders Of The Universe	
	World Economic Forum	
	· Space Industry Debris Mitigation Recommendations	

Nota. **Color Azul:** Nivel internacional, **Color verde** Agencia espacial o nivel nacional, **Color naranja:** Nivel industrial. Tabla basada en datos facilitados por la empresa Clearspace Today (Buchs, Patel, Tuttle, & Maclay, 2023).

Análisis del Medio Ambiente espacial

Ecología Humana aplicada a la carrera espacial

Quando se inició la carrera espacial con el lanzamiento del Sputnik 1 en el año de 1957, la relación del hombre con el espacio cambio por completo, y al igual que sucedió con la revolución industrial, los riesgos por el daño ambiental producto de estas nuevas actividades, no comenzaron a preocupar hasta que sus efectos se hicieron evidentes. La especie humana y su evolución tanto biológica como social y tecnológica, han modificado el planeta a través del tiempo y su llegada al espacio nos alerta sobre nuevos cambios en un ambiente que poco a poco hemos ido conociendo, pero del cual nos falta mucho por explorar.

¿Cómo nos afectaran estos cambios? ¿Por qué la especie humana es la única que se pone en riesgo a sí misma? La carrera espacial nos trae un nuevo escenario y a su vez una nueva preocupación, es indispensable dar un manejo adecuado a los desechos espaciales de manera que la operación en el espacio cuente con una normativa robusta y unos protocolos claros que permitan tomar medidas no solo para mitigar el daño que ya es evidente, sino para evitar que siga en aumento, se requiere de un esfuerzo internacional y tomar medidas especiales para que esta problemática no se convierta en catastrófica.

Para entender un poco el origen del problema se necesita abordarlo desde las raíces, la palabra ecología proviene “oikos” que significa casa y “logos” que significa estudio, sin embargo, fue el zoólogo Ernst Haeckel quien en 1869 la definió como “La ecología es una rama de la biología que estudia la interdependencia y de la interacción entre los organismos vivos (animales y plantas) y su ambiente (seres inorgánicos)”, de igual manera estudia las interacciones que determinan la distribución, abundancia, número y organización de los organismos en los ecosistemas, este concepto se ha ampliado con el tiempo y diversificado de acuerdo a la realidad del ser humano moderno, su capacidad de modificar ecosistemas y crear sus propios hábitats, por lo que con el tiempo han desarrollado nuevos conceptos para entender mejor estas interacciones.

La ecología ha permitido conocer la conexión entre los seres vivos y los factores abióticos con los que interactúan, permitiendo avanzar en la conservación de ecosistemas, tomando medidas para prevenir impactos ambientales negativos y en las últimas décadas ha adquirido mayor relevancia al ser conscientes de la necesidad de implementar un sistema productivo sostenible. Es por esto por lo que la ecología se estudia desde el nivel de organización de los individuos para abarcar diferentes niveles de interacción.

En este orden de estudio, la ecología es una rama de la biología, interdisciplinaria y compleja que requiere del análisis desde varias ciencias para estudiarla.

Sin embargo, poco se conoce sobre la interacción de los humanos con un entorno más allá de los límites físicos de nuestro planeta y como esta carrera espacial puede modificar nuestras condiciones de vida a futuro. En este orden, el estudio de la ecología ha abarcado diferentes ramas que permiten analizar las interacciones de la vida a todos los niveles, entre ellas la ecología urbana.

El estudio de esta rama va a aportar al manejo ambiental de la nueva era espacial que comenzó la humanidad hace cerca de 70 años, pues es un

estudio interdisciplinario de la relación entre los humanos y su entorno natural, social y ambiente construido, hace énfasis en la interacción cultural de los humanos que tiene la capacidad de modificar el entorno físico y biológico, alterar procesos y modificar y adaptar los paisajes al punto de reconstruirlos sus necesidades como lo son las ciudades, alterando ciclos naturales que a su vez producen cambios a todos los niveles de los ecosistemas.

Poco se conoce y se ha desarrollado de cuál será el impacto ambiental de la colonización del hombre en otros Planetas y el aumento de las operaciones espaciales pueden tener varios impactos que no se han abordado desde ningún punto.

La ecología humana en el nuevo contexto espacial trata de entender cómo los seres humanos pueden vivir y trabajar eficazmente en el espacio mientras se preserva el entorno espacial y se optimizan los recursos disponibles y está obligada a entender y estudiar el impacto ambiental de las actividades espaciales no sólo en el espacio exterior sino a su vez sus efectos sobre la tierra, igualmente y conociendo ya las consecuencias ambientales de las modificaciones de los paisajes y los entornos, si pensamos en establecer sociedades en otros planetas, sin lugar a duda se deberán implementar tecnologías y diseñar sistemas ambientalmente sostenibles y en cierto modo autosuficientes de manera que se minimice el uso de recursos, se optimicen el consumo de los mismos y se realice una adecuada gestión de cualquier tipo de residuo que se pueda generar.

Estos nuevos asentamientos en entornos espaciales también tendrán el desafío de crear y estudiar las condiciones de los humanos en estos ambientes extremos, así como analizar cómo las personas y las sociedades pueden adaptarse y formar comunidades en entornos espaciales, y cómo las culturas y las estructuras sociales pueden evolucionar en estos contextos, así como investigar las implicaciones económicas de la explotación de recursos espaciales y el desarrollo de infraestructuras espaciales y de donde provendrán dichos recursos para mantenerlas.

Este enfoque ampliado de la ecología humana es crucial, ya que la presencia permanente del hombre en el espacio se incrementa y las misiones espaciales se vuelven más prolongadas. La ecología humana deberá considerar factores como el soporte vital, la psicología de los astronautas, el impacto ambiental de las misiones espaciales y la ética de la exploración espacial. Por ejemplo, el reciclaje de agua y aire, el cultivo de alimentos en el espacio y la protección contra la radiación son aspectos técnicos esenciales para la supervivencia

humana en misiones a largo plazo. Además, el bienestar psicológico de los astronautas es fundamental, ya que deben enfrentar el aislamiento y la falta de estímulos naturales

A pesar de que la carrera espacial ha generado avances tecnológicos que benefician a la humanidad en la Tierra, como mejoras en las telecomunicaciones y en la medicina, también plantea desafíos éticos, como la gestión de los desechos espaciales y el uso responsable de los recursos extraterrestres. La reflexión sobre una ética espacial es necesaria para asegurar que la exploración del espacio se realice de manera que beneficie al interés general y no solo a unos pocos países o empresas.

En el estudio de la ecología humana podemos entender que la sostenibilidad ambiental depende de la interacción humana con la diversidad biocultural referida a la evolución biológica y cultural de los humanos, considerando que se correlacionan, pues la diversidad cultural es producto de la evolución biológica que ha permitido a los humanos desarrollar capacidades que ninguna otra especie tiene, en especial la capacidad de entender, explorar, estudiar y entender el espacio. En resumen, la ecología humana aplicada a la carrera espacial es un campo vital que busca armonizar las ambiciones de exploración con la responsabilidad y sostenibilidad ambiental y social, en este sentido, la construcción de ciudades en el espacio, como las que se han propuesto en teorías y conceptos, podrían tener impactos ambientales distintos a los de las ciudades terrestres que se requieren prever antes de implementarlas, para ellos se deberá tener en cuenta la implementación de sistemas de recirculación de agua, aire y desechos para funcionar de manera sostenible y con el menor impacto posible. Otro aspecto relevante es la generación de energía, que podría provenir de fuentes como paneles solares, que son abundantes en el espacio, minimizando el uso de combustibles fósiles y reduciendo la contaminación, teniendo en cuenta claro, las condiciones especiales de radiación que se tienen en el espacio.

Las actividades en el espacio a gran escala pueden agudizar el ya gran problema existente de la basura espacial y generar desechos y escombros orbitales a gran escala de lo cual ya se conoce sus catastróficas consecuencias, es por esto que manejar estos residuos es crucial para evitar la contaminación orbital, esto sin contar que la construcción y el mantenimiento de ciudades espaciales requerirían recursos de la Tierra, lo que podría tener un impacto ambiental en nuestro planeta adicional a los que ya tenemos y que no hemos podido manejar.

En general, mientras que las ciudades en el espacio podrían ofrecer soluciones innovadoras para la sostenibilidad, también representan nuevos desafíos en términos de gestión de recursos y residuos.

Componentes del medio ambiente espacial

El medio ambiente espacial es un entorno complejo y multifacético que comprende una variedad de componentes, tanto naturales como artificiales. Entre los elementos naturales se encuentran la microgravedad, la radiación solar y cósmica, el vacío del espacio, y las temperaturas extremas. Estos factores pueden afectar tanto a los seres vivos como a los equipos tecnológicos que se envían al espacio. Además, los componentes artificiales incluyen satélites, sondas espaciales, y otros dispositivos creados por el ser humano que orbitan alrededor de la Tierra y otros cuerpos celestes. Estos artefactos deben diseñarse para resistir las duras condiciones del espacio exterior y funcionar de manera autónoma en un entorno donde el mantenimiento y la reparación son desafíos significativos.

La atmósfera terrestre, única en nuestro sistema solar por su capacidad para sostener la vida, termina donde comienza el medio ambiente espacial. Este último es un vacío casi absoluto, con una presencia muy escasa de partículas, lo que significa que no hay aire para respirar ni sonido que se pueda transmitir. La radiación, tanto solar como galáctica, representa un peligro constante para la vida y la tecnología, pudiendo dañar el ADN de los seres vivos y los circuitos de los equipos electrónicos. Por otro lado, la falta de atmósfera también significa que no hay protección contra los micrometeoritos y otros escombros espaciales, que pueden impactar con una velocidad y fuerza devastadoras.

Para los profesionales que trabajan en las ciencias y tecnologías espaciales, es crucial comprender las características de este medio ambiente para garantizar la seguridad y el funcionamiento óptimo de las misiones espaciales. La Estación Espacial Internacional (EEI), por ejemplo, es un laboratorio en órbita que debe mantenerse constantemente para asegurar la vida y el trabajo de los astronautas a bordo. Los sistemas de soporte vital, que proporcionan aire respirable y regulan la temperatura y la humedad, son vitales para la supervivencia humana en el espacio.

Además, el medio ambiente espacial no es estático; está influenciado por la actividad solar, como las tormentas solares, que pueden alterar las condiciones espaciales y afectar las comunicaciones y la navegación en la Tierra. También

está en constante cambio debido a la creciente cantidad de basura espacial, que presenta riesgos adicionales para las naves espaciales y los satélites.

Se puede decir que el medio ambiente espacial es un campo de estudio esencial para la exploración y utilización del espacio exterior. Comprender sus componentes y cómo interactúan entre sí es fundamental para el avance de la ciencia espacial y la tecnología, así como para la planificación de futuras misiones tripuladas y no tripuladas que buscan expandir nuestro conocimiento del universo.

Por su parte, para poder entender mejor los elementos ambientales del espacio exterior que rodea al planeta tierra, es necesario analizar los elementos que componen nuestro entorno y como se puede afectar con las operaciones espaciales.

La atmósfera terrestre no siempre ha sido la misma, las proporciones de los gases que la componen han cambiado a lo largo del tiempo, producto no sólo de procesos geológicos y naturales propios de las eras que ha atravesado el planeta en donde una serie de eventos han ido liberando importantes cantidades de vapor de agua, monóxido y dióxido de carbono, dando con esto origen a océanos y cuerpos de agua que permitieron la creación de la hidrósfera que se convirtió en un elemento fundamental para regular el clima en el planeta tierra y dar viabilidad a la explosión de vida que vivió la tierra hace millones de años.

Así como la atmósfera ha cambiado, el clima también ha cambiado y los humanos han acelerado este proceso con el avance y creación de nuevas tecnologías, lo cual ha sido más evidente a partir de la revolución industrial, gracias a lo cual han llegado al espacio en donde se abren nuevos escenarios de desarrollo, pero también graves problemas ambientales ligados a esto.

Los componentes de la atmósfera se dividen en dos grupos que son los gases constantes y los gases variables, los constantes mantienen una proporción casi permanente en la atmósfera y son los más abundantes como el nitrógeno (78,08%), el oxígeno (20,95%) y el argón (0,93%).

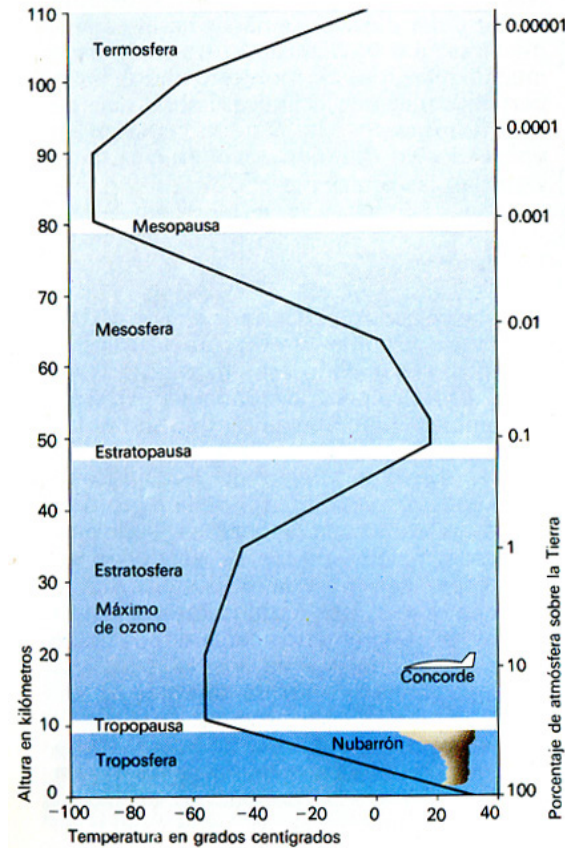
Tabla 7. *Composición de la atmósfera en porcentaje en volumen*

Gases Constantes	Símbolo	% por volumen en el aire	Partes por millón (ppm)
Nitrógeno	N2	78,08	780.480
Oxígeno	O2	20,95	209.476
Argón	Ar	0,93	9.340
Neón	Ne	0,0018	18
Helio	He	0,0005	5
Hidrógeno	H	0,00006	0,6
Xenón	Xe	0,00009	0,9

Fuente: <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/atmosfera>

La atmósfera a su vez se divide en cuatro capas: tropósfera, estratósfera, mesósfera y termósfera, en la estratósfera y en la termósfera se sustenta la vida ya que en ella se encuentra la ozonósfera que es una capa rica en ozono que protege de la radiación directa del sol que de no existir haría inviable la evolución de vida por las altas radiaciones.

Figura 9. Capas de la atmósfera terrestre tropical, con base en el perfil de las temperaturas del aire



Fuente: <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/atmosfera>. <https://agrupacionastronomicamagallanes.wordpress.com/el-universo-gaseoso/atmosfera-terrestre-parte-i/>

No podemos olvidar que, gracias a nuestra atmósfera, sus componentes y su composición, el planeta tierra es el único planeta de nuestro sistema solar con vida en este momento, sin embargo, esas condiciones pueden cambiar, más aún si nuestra carrera espacial nos conduce a su vez a una afectación de nuestro propio entorno a causa de la contaminación, la atmósfera y el campo magnético de la Tierra nos protegen del pase de partículas energéticas subatómicas de la radiación cósmica, pero esto sólo sucede dentro de la

protección de la atmósfera geomagnética de la Tierra, ¿qué pasa cuando estamos en un entorno fuera de esa protección?

Condiciones ambientales en el Espacio Exterior

Se denomina como Espacio Exterior a todo el espacio vacío que se encuentra rodeando a la Tierra más allá de los límites superiores de la Atmósfera Terrestre, y que oficialmente se ubica más allá de los 100 km de altura sobre el nivel del mar.

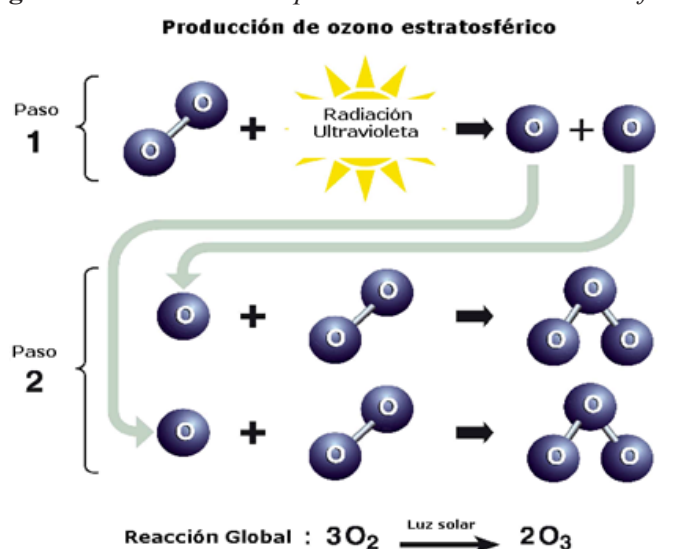
Si se mira a escala planetaria, la mayor parte del universo se considera espacio vacío o vacío absoluto, ya que no existe materia entre los planetas y las estrellas. La temperatura en el espacio exterior es extremadamente baja ya que no existe atmósfera que retenga la energía solar y que permita una estabilidad climática, se estima que la temperatura fijada por la radiación posterior del Big Bang es de 2.7 Kelvin (270° centígrados bajo cero).

Por otro lado, está la radiación solar y las partículas de alta energía producto de los Cinturones de radiación de Van Allen, los protones, las partículas energéticas solares y rayos cósmicos, por fortuna, una de las capas externas de la atmósfera, la Magnetósfera, que es el límite del campo magnético terrestre, cubre la tierra y crea una especie de escudo magnético a su alrededor, protegiéndonos de radiaciones de partículas de alta energía provenientes del Sol y de otros cuerpos espaciales.

El ozono estratosférico se constituye en el principal filtro de la radiación ultravioleta proveniente del Sol, ya que, si no es absorbida y alcanza la superficie de la tierra, puede incrementar los casos de cáncer en la piel, cataratas y afectar el sistema inmunológico en los humanos.

La absorción de radiación UV-B por el ozono es una fuente de calentamiento de la estratosfera, que contribuye a que en esta región se presenten incrementos de temperatura con la altura. Debido a lo anterior, el ozono desempeña un papel importante en el control de la temperatura de la atmósfera terrestre.

Figura 10. Mecanismo de producción de ozono estratosférico



Fuente: elaborada a partir de: scientific Assessment of Ozone Depletion: 2002. Twenty questions and answers about the ozone layer. OMM. 2002.). IDEAM.

Impactos ambientales negativos de la basura espacial

Desde el inicio de la era espacial se han lanzado cerca de 30.000 cohetes, incluyendo vuelos orbitales y suborbitales. Con el tiempo se ha comenzado buscar una solución para la basura espacial generada por estos lanzamientos que con el tiempo se han vuelto un gran problema, no sólo para los nuevos lanzamientos sino para los activos estratégicos que ya están en órbita, sin embargo, poco se ha hablado de la huella ambiental de las operaciones espaciales, como por ejemplo el impacto negativo del uso de combustibles para estos lanzamientos y su impacto no solo en el ecosistema terrestre sino en el espacio que rodea la tierra.

A pesar de que la carrera espacial lleva relativamente poco tiempo, sus impactos ambientales negativos ya se empiezan a evidenciar, sin embargo, aún falta mucho por conocer al respecto, pues, aunque la cifra de lanzamientos es pequeña comparada con las actividades dentro del planeta, muchos científicos han advertido del riesgo para el clima y la dinámica de los ecosistemas, en especial cuando estos vuelos se desarrollen a gran escala en un relativamente corto plazo.

Al inicio de la carrera espacial en la denominada Guerra fría, el afán de conquistar primero el espacio, no dejó ver el costo que se podría pagar desde otros puntos de vista, la basura espacial no fue considerada desde los inicios como un problema y sólo hasta que empezó a representar una amenaza se dio inicio a los intentos de darle un manejo adecuado en los lanzamientos venideros, sin embargo, ¿cómo mitigar el problema ya existente?

Los conceptos de sostenibilidad ambiental se han implementado con más rigurosidad en las últimas décadas, y esto se ha incluido también en la planeación de misiones espaciales futuras, las nuevas misiones ya incluyen el manejo de los residuos espaciales, ya sea construyendo modelos reutilizables o con tecnología que permita su desintegración o retorno a la tierra para dar un manejo adecuado, de no hacerlo, pronto las misiones serán inviables y nuestra esperanza de conquistar el espacio se verá truncado por nuestra propia incapacidad.

Los vehículos espaciales utilizan principalmente cuatro tipos de combustible: queroseno (RP-1, o Rocket Propellant-1), hidracina (un compuesto de nitrógeno, N_2H_4) y sus derivados, hidrógeno líquido y distintos combustibles sólidos.

Los compuestos tóxicos emitidos por la combustión de los químicos utilizados como combustible, emiten varios compuestos como óxidos de nitrógeno (NO_x); algunos producen el llamado carbono negro u hollín (partículas de carbono), CO_2 , alúmina (óxido de aluminio, Al_2O_3) y gas cloro, que además de ser altamente tóxicos, aumentan el problema ya existente de gases efecto invernadero en la atmósfera terrestre, hecho que ha llamado la atención de muchos científicos que empiezan a analizar las consecuencias y el verdadero impacto de estas operaciones.

Estudios pioneros revelaron que los cohetes propulsados por combustibles sólidos y queroseno causaban una destrucción total del ozono en la estela dejada a su paso, pero que había también un efecto, aunque pequeño, por la dispersión de estos contaminantes.

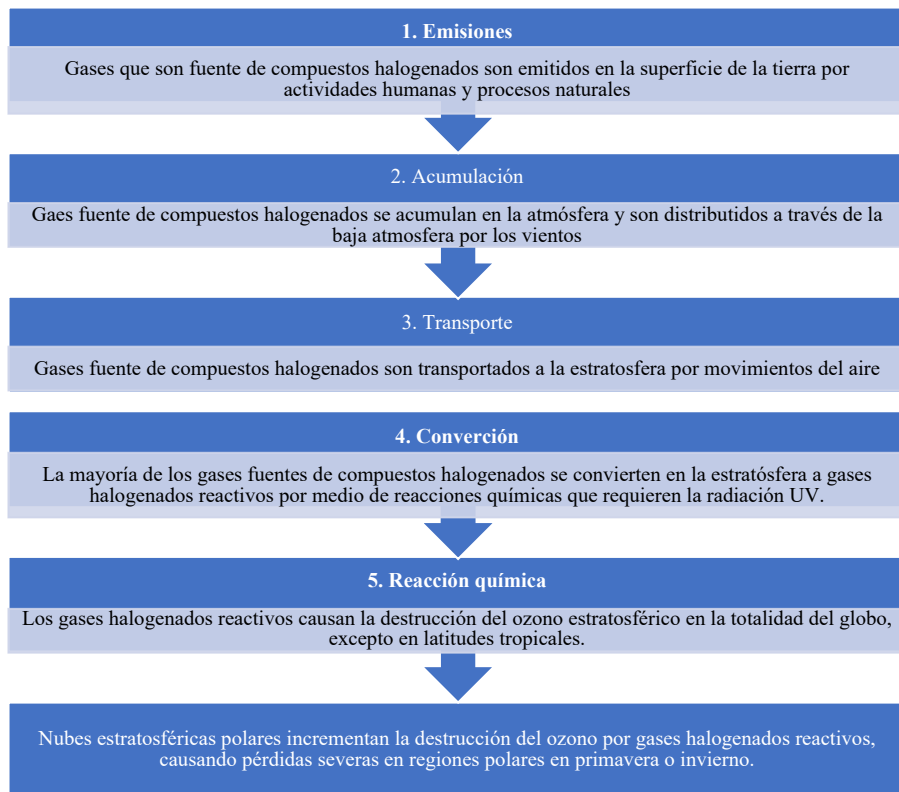
Más recientemente, otros estudios han analizado el impacto de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) —como CO_2 y vapor de agua—, del carbono negro y de otros contaminantes que contribuyen al calentamiento global, como los NO_x .

Aunque la cantidad de combustibles quemados por los cohetes es menos del 1% de la utilizada por los aviones comerciales, y por lo tanto sus emisiones son mucho menores, el problema es dónde se liberan; según explica a OpenMind el químico atmosférico Christopher Maloney, del Cooperative Institute for

Research in Environmental Sciences de la Universidad de Colorado y la Administración Atmosférica y Oceánica de EEUU, “los cohetes difieren en que liberan el carbono negro directamente en la estratosfera; debido al transporte atmosférico relativamente lento, el carbono negro puede persistir en esta región de la atmósfera mucho más tiempo (3-5 años)”. Maloney añade que, en el caso de los cohetes, la proporción de carbono negro emitido frente al total de sus emisiones es mucho mayor, por lo que “se necesita lanzar menos cohetes para igualar la cantidad de carbono negro emitida por los aviones”.

En la Figura 11 podemos evidenciar las etapas de destrucción del ozono atmosférico y la cual sostiene la vida en el planeta Tierra, y los estudios de estos procesos químicos nos han permitido lo frágil que es la vida ya que depende en gran medida de la atmósfera de nuestro Planeta, de ahí la importancia de protegerla y evitar acelerar este proceso con la carrera espacial en permanente aumento.

Figura 11. *Etapas en la destrucción del ozono estratosférico*





Nubes estratosféricas polares incrementan la destrucción del ozono por gases halogenados reactivos, causando pérdidas severas en regiones polares en primavera o invierno.

6. Remoción

El aire que contiene gases halogenados reactivos retorna a la tropósfera y estos gases son removidos del aire por la humedad de las nubes y la lluvia.

Fuente: elaborada a partir de: Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2002. Twenty questions and answers about the ozone layer. OMM. 2002.

Aún desconocemos el impacto real que puedan tener las operaciones espaciales tanto en la Tierra como en el espacio, pero desde ya sabemos que sus impactos pueden ser devastadores si no se planifican y minimizan desde ya, no se puede bajo ninguna circunstancia generar más residuos orbitales de los que ya existen y que requieren un tratamiento urgente, de igual manera una actividad espacial permanente traerá un aumento en la contaminación atmosférica terrestre ya que el lanzamiento de cohetes libera gases y partículas en la atmósfera y algunos combustibles de cohetes pueden generar compuestos que afectan la capa de ozono o contribuyen al cambio climático, por su parte, además de los desechos orbitales, las misiones espaciales pueden introducir contaminantes en otros cuerpos celestes, como la Luna o Marte, si no se manejan adecuadamente.

Las investigaciones espaciales y las simulaciones en el espacio pueden involucrar organismos vivos, y el transporte de estos organismos puede afectar los ecosistemas si no se toman precauciones para evitar la contaminación biológica, esto sin contar con el aumento en la cantidad de satélites y otras estructuras en órbita que puede afectar la observación astronómica y el acceso a la visión clara del cielo nocturno.

Estos impactos requieren una gestión cuidadosa y el desarrollo de tecnologías más limpias y eficientes para minimizar el daño ambiental, estos aspectos son fundamentales para planificar misiones espaciales a largo plazo, como la colonización de Marte o la creación de estaciones espaciales permanentes, las cuales son una realidad a un plazo más corto del que imaginamos.

Desafíos para el manejo de los desechos espaciales

La gestión de los desechos espaciales se ha convertido en un desafío crítico y multifacético en la era moderna de la exploración espacial. El crecimiento exponencial de la actividad espacial y el aumento de lanzamientos de satélites comerciales, especialmente las constelaciones de satélites pequeños, han exacerbado el problema de la proliferación de desechos orbitales. Este fenómeno plantea riesgos significativos para los satélites operacionales y futuras misiones espaciales, lo que impulsa a la comunidad internacional a adoptar enfoques innovadores y colaborativos para mitigar el impacto ambiental y garantizar la sostenibilidad del entorno espacial.

Proyectos a Nivel Mundial

A nivel global, diversos proyectos están en marcha para abordar el problema de los desechos espaciales. La NASA, por ejemplo, ha alineado sus esfuerzos con los objetivos de sostenibilidad delineados en la Orden Ejecutiva 14057. Su plan de ruta de sostenibilidad incluye la Instalación de Pruebas de White Sands (WSTF) (Grenier, 2024), que opera un programa integral de Gestión Ambiental. Este programa prioriza la minimización de residuos mediante estrategias como el reciclaje y la reutilización, apoyadas por el software Reuse Market Place (ReMaP), que facilita la desviación de materiales de los vertederos. Además, WSTF promueve la Adquisición Sostenible, favoreciendo productos y servicios ecológicos, e involucra al personal en el Grupo de Trabajo de Sostenibilidad a Nivel de Sitio (S2WG), que impulsa proyectos para mejorar la eficiencia en el uso de agua y energía, mientras se alcanzan los objetivos de misión. Estos esfuerzos no solo reducen el impacto ambiental de las operaciones, sino que también fomentan una cultura de sostenibilidad dentro de la organización.

En el ámbito internacional, iniciativas como la Misión de Limpieza del Espacio Exterior a través de Captura Innovadora (COSMIC), desarrollada por Astroscale Ltd en colaboración con la Agencia Espacial del Reino Unido, buscan eliminar satélites obsoletos en órbita baja terrestre (Long & Huang, 2024). De manera similar, la Iniciativa Clean Space de la Agencia Espacial Europea (ESA), iniciada en 2012, aborda el impacto ambiental de las misiones espaciales a lo largo de todo su ciclo de vida. Esta iniciativa se estructura en tres áreas clave: **(1) Diseño Ecológico**, que desarrolla

tecnologías para reducir el impacto ambiental durante la construcción de satélites; **(2) Medidas de Mitigación de Residuos**, que implementa tecnologías para evitar la generación de nuevos desechos espaciales; y **(3) Servicios en Órbita y Eliminación Activa de Residuos (ADR)**, que se centra en abordar y eliminar los desechos espaciales existentes mediante tecnologías avanzadas. Estas iniciativas reflejan un enfoque proactivo y multifacético para preservar la sostenibilidad del entorno espacial.

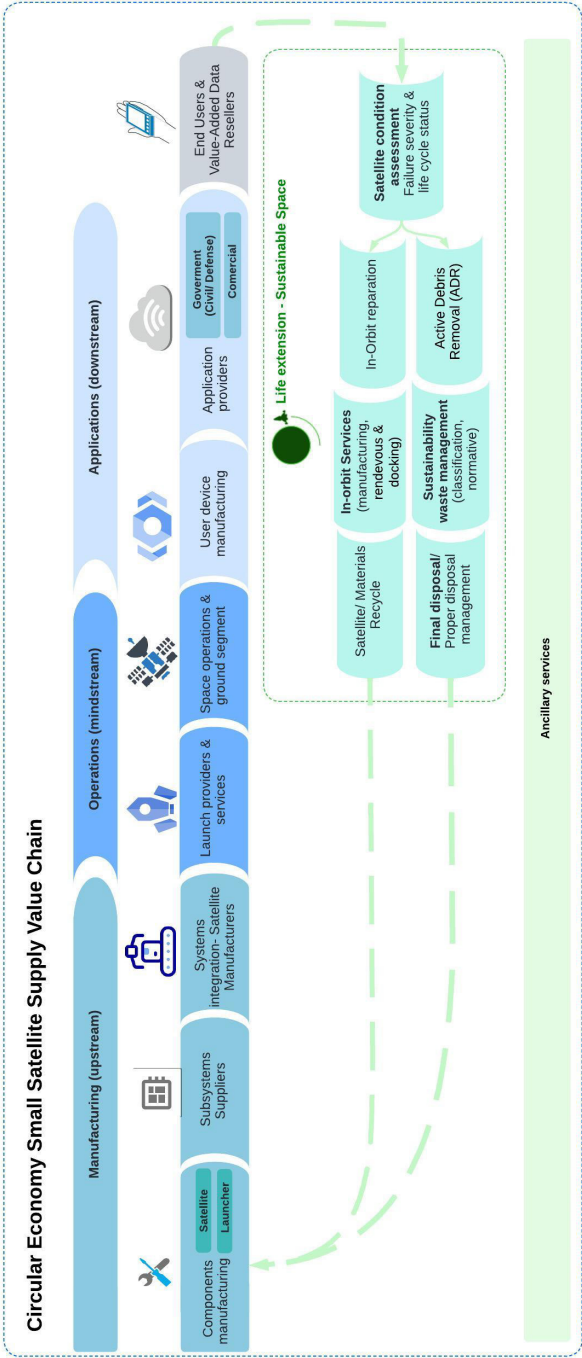
Estrategias y Tecnologías Emergentes

El creciente volumen de residuos orbitales amenaza la operatividad de los satélites actuales y futuros. La introducción del Enfoque de Residuos Cero de la ESA, presentado en 2022 (ESA, 2024), establece como objetivo que los lanzadores, naves espaciales y satélites en órbitas clave no generen desechos para 2030. Esta estrategia incluye la implementación de requisitos para garantizar la eliminación exitosa de residuos, mejorar la eliminación de órbitas y prevenir colisiones. Alcanzar este objetivo ambicioso requiere una cooperación global entre operadores, autoridades espaciales y otros interesados clave.

En este contexto, la fase de “Extensión de Vida” en la cadena de fabricación de satélites se ha vuelto crucial para la sostenibilidad. Esta propuesta sugiere la evaluación continua del estado operativo de los satélites en órbita, permitiendo reparaciones en órbita o la eliminación activa de residuos para asegurar una gestión sostenible de los satélites. La colaboración entre la NASA, la ESA y JAXA en la mejora de la fiabilidad y mantenibilidad de los satélites es esencial para minimizar el impacto ambiental y optimizar el ciclo de vida de los sistemas espaciales (Buitrago, Camps & Moncada, 2024).

La evolución de la cadena de suministro de satélites ha sido significativa, impulsada por avances tecnológicos en la fabricación, estandarización de componentes y diversificación de proveedores. Se necesita una gestión holística de la cadena de suministro que considere tanto el rendimiento como el impacto ambiental de los materiales utilizados en el espacio y durante la reentrada.

Figura 12. Cadena de Valor en satélites pequeños incluyendo la extensión de vida útil de forma sostenible



Fuente: Extraído de Buitrago, Camps & Moncada, 2024.

La preocupación creciente por la basura espacial ha impulsado iniciativas para el reciclaje en órbita y la reutilización de satélites fallidos. Estas iniciativas incluyen la inspección detallada de cada subsistema de satélite y la evaluación de sus capacidades de misión para identificar hardware funcional que pueda ser reutilizado en lugar de descartado. El concepto de “satélite como servicio” y el mantenimiento en órbita presentan oportunidades significativas para extender la vida útil de los satélites y reducir la acumulación de desechos espaciales.

Crear una cadena de suministro de satélites sostenible requiere la colaboración de múltiples interesados y el desarrollo de tecnologías innovadoras. Las investigaciones futuras deberían explorar las implicaciones políticas, legales, económicas y de seguridad de una logística espacial sostenible. Abordar estos aspectos de manera integral proporcionará información valiosa para formuladores de políticas, expertos legales y profesionales de la industria, facilitando la transición hacia un entorno espacial más sostenible y asegurando la viabilidad a largo plazo de las actividades espaciales.

Conclusiones

El fenómeno de la basura espacial es una consecuencia directa de más de seis décadas de actividad espacial intensiva, resultado del crecimiento exponencial de satélites y otros objetos en órbita. Este subproducto no intencionado, compuesto por restos de satélites obsoletos, fragmentos de cohetes y desechos generados por colisiones, plantea serios desafíos para la seguridad operativa en el espacio y para el futuro de las misiones espaciales. Las cifras presentadas, como los más de 900.000 fragmentos de más de 1 cm actualmente en órbita, subrayan la magnitud del problema.

La expansión del sector espacial, especialmente impulsada por el movimiento NewSpace, ha permitido que un número creciente de actores participe en esta industria. Esto ha resultado en el aumento de lanzamientos, lo cual agrava la problemática de la basura espacial. Las nuevas iniciativas, como las megaconstelaciones de satélites, junto con el despliegue masivo de satélites pequeños, han aumentado el riesgo de colisiones y, por ende, la producción de más desechos.

En este contexto, la basura espacial no solo pone en riesgo las operaciones actuales, sino también las futuras. Los satélites en operación se ven

obligados a realizar maniobras evasivas costosas para evitar colisiones, lo que incrementa los costos operacionales y el desgaste de los sistemas. La situación es aún más crítica para las misiones tripuladas, en las que cualquier colisión podría representar una amenaza directa para la vida de los astronautas. Además, el impacto económico de la pérdida de satélites operativos y las interrupciones en los servicios proporcionados por ellos son de gran magnitud, con posibles repercusiones graves en diversas industrias.

Por otro lado, las actividades espaciales no se limitan a la órbita terrestre baja. La basura espacial también ha comenzado a impactar en otros cuerpos celestes, como la Luna, como evidenció el impacto de un cohete en 2022. Este hecho alerta sobre los posibles riesgos ambientales que podrían presentarse no solo en la órbita terrestre, sino también en futuras misiones de exploración planetaria y asentamientos espaciales.

A nivel técnico, la basura espacial viaja a velocidades extremas que pueden causar daños severos a cualquier objeto en órbita, sin importar su tamaño. Esta realidad incrementa la complejidad de las misiones espaciales y refuerza la necesidad de desarrollar tecnologías y normativas internacionales efectivas para la mitigación de este problema.

Finalmente, la ecología humana aplicada a la carrera espacial emerge como un campo de estudio crucial para abordar los retos de la sostenibilidad en las actividades espaciales. El impacto ambiental que la humanidad ha generado en la Tierra ofrece lecciones importantes que deben ser consideradas en la exploración y colonización del espacio. Los estudios deben enfocarse no solo en la preservación del entorno espacial, sino también en la gestión responsable de los recursos y residuos para prevenir daños irreversibles tanto en la órbita terrestre como en otros cuerpos celestes. El futuro de la exploración espacial depende, en gran medida, de la capacidad de la humanidad para gestionar adecuadamente los desechos generados y para diseñar estrategias que aseguren la sostenibilidad de las actividades en el espacio.

La basura espacial es un problema de escala global que requiere atención inmediata y coordinación internacional. Los avances en tecnología espacial deben ir acompañados de normativas robustas y un enfoque ético hacia la exploración del espacio, con el fin de preservar tanto la seguridad operacional como el equilibrio ambiental en este entorno tan delicado.

Referencias bibliográficas

- (n.d.). Retrieved from <https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/quarterly-news/pdfs/ODQNV24i4.pdf>.
- (n.d.). Retrieved from <https://www.theguardian.com/science/2017/mar/26/weve-left-junk-everywhere-why-space-pollution-could-be-humanitys-next-big-problem>.
- (“63° PERIODO DE SESIONES DE LA SUBCOMISIÓN DE ASUNTOS JURÍDICOS DE LA ...”). (2023, ABRIL 15). Retrieved 2024
- Abdelkhalik, O., & Gad, A. (2011). Optimization of space orbits design for Earth orbiting missions. *Acta Astronautica*, 1307-1317.
- Buchs, R., Patel, G., Tuttle, C., & Maclay, T. (2023). Regulatory Frameworks for a Thriving Circular Space Economy. *Clean Space Industry Days. European Space Agency, ESTEC, October 17th*.
- Buitrago, J., Camps, A., & Moncada, A. (2024). Considerations for Eco-Lean-Sat Satellite Manufacturing. *MDPI- Sustainability*, 1-40.
- Buitrago-Leiva, J., El Khayati Ramouz, M., Camps, A., & Ruiz-de-Azua, J. (2024). Towards a second life for Zombie Satellites: Anomaly occurrence and potential recycling assessment. *Acta Astronautica*, 238-245.
- Changxuan, W., Zihan, J., Chao, P., & Dong, Q. (2024). Modeling Medium-Term Debris Cloud of Satellite Breakup via Probabilistic Method. *Aerospace Research Central*, 1-18.
- Cloitre, A., Dos Santos, P., & Theodoraki, C. (2023). The quadruple/quintuple helix model in entrepreneurial ecosystems: an institutional perspective on the space case study. *R & D Management*, 53, 675--694.
- ESA. (2019). <https://www.esa.int>. Retrieved from https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Spain/Doce_paises_firman_la_carta_de_basura_cero_en_el_espacio,%2022/05/2024
- ESA. (2019, DIC 12). <https://www.esa.int/>. Retrieved ABRIL 29, 2024, from https://www.esa.int/Space_Safety/Clean_Space/ESA_commissions_world_s_first_space_debris_removal
- ESA. (2024). *About space debris*. Retrieved from https://www.esa.int/Space_Safety/Space_Debris/About_space_debris
- ESA. (2024). *Basura espacial*. Retrieved from <https://blogs.esa.int/space-19plus/es/programmes/basura-espacial/>

- Espinosa, J. (2022, feb 14). La basura espacial podría convertirse en un problema sin control. (P. Rafael, Ed.) *Gaceta UNAM*, 5272(ISSN 0188-5138), 44.
- European Space Agency. (2022, April 22). *ESA's Space Environment Report 2022*. (European Space Agency) Retrieved October 11, 2022, from https://www.esa.int/Space_Safety/Space_Debris/ESA_s_Space_Environment_Report_2022
- Foreman Campins, L. (2023). *NewSpace and the European Space Economy*. Barcelona: Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya.
- Forshaw, J., Aglietti, G., Navarathinam, N., Kadhém, H., Salmon, T., Pisseloup, A., & Steyn, W. (2016). RemoveDEBRIS: An in-orbit active debris removal demonstration mission. *Acta Astronautica*, 448-463.
- Ghidini, T., Grasso, M., Gumpinger, J., Makaya, A., & Colosimo, B. (2023). Additive manufacturing in the new space economy: Current achievements and future perspectives. *Progress in Aerospace Sciences*, Volume 142.
- Giroux, H. (1997). .La pedagogía de frontera y la política del postmodernismo. *Revista Intrínsecas*(6), 96.
- Giudici, L., Colombo, C., Horstmann, A., Letizia, F., & Lemmens, S. (2024). Density-based evolutionary model of the space debris environment in low-Earth orbit. *Acta Astronautica*, 115-127.
- González, F. (2023, mayo 12). <https://es.wired.com/>. Retrieved abril 2024, <https://es.wired.com/articulos/este-mapa-muestra-la-basura-espacial-que-flota-justo-ahora-sobre-la-tierra>
- Grenier, H. (2024). *Raman Examination for Contamination: Iron Nitrate and Propellant Evaluation (Doctoral dissertation)*. Purdue University Graduate School. <https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/quarterly-news/pdfs/ODQNV24i4.pdf>. (n.d.). Retrieved from <https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/quarterly-news/pdfs/ODQNV24i4.pdf>.
- Kwon, K., Min, S., Kim, J., & Lee, K. (2023). Framework Development for Efficient Mission-Oriented Satellite System-Level Design. *Aerospace* 10.3, 228.
- Locke, J., Colvin, T., Ratliff, L., Abdul-Hamid, A., & Samples, C. (2024). *Cost and Benefit Analysis of Mitigating, Tracking, and Remediating*

Orbital Debris. Cost and Benefit Analysis of Mitigating, Tracking, and Remediating Orbital Debris. NASA.

- Long, J., & Huang, C. (2024). Obligations and Liabilities Concerning the Active Removal of Foreign Space Debris: A Global Governance Perspective. *Acta Astronautica*, 422-435.
- Margalef, L., & Arenas, A. (2006). ¿Qué entendemos por innovación Educativa? A proposito del desarrollo curricular. *Perspectiva Educacional*, 1(47), 13-31.
- Mazzucato, M., & Douglas, R. (2018). Co-creating and directing Innovation Ecosystems? NASA's changing approach to public-private partnerships in low-earth orbit. *Technological Forecasting and Social Change*, 166-177.
- Melissa Davey. (2017, marzo 25). Hemos dejado la basura por todas partes: porque la contaminación espacial podría ser el próximo gran problema de la humanidad. <https://www.theguardian.com>. Retrieved abril 25, 2024, from <https://www.theguardian.com>
- Millwood, S. (2023). *The Urgent Need for Regulation of Satellite Mega-constellations in Outer Space*. Springer Nature.
- Milo Alberto. (2023, junio 5). <https://www.ngenespanol.com/el-espacio/sputnik-1>. Retrieved abril 27, 2024, from <https://www.ngenespanol.com/el-espacio/sputnik-1-su-importancia-para-la-exploracion-del-espacio-primer-satelite-artificial/>
- Paravano, A., Locatelli, G., & Trucco, P. (2023). What is value in the New Space Economy? The end-users' perspective on satellite data and solutions. *Acta Astronautica*, Elsevier.
- Parrella, R. M., & et al. (2022). The New Space Economy and New Business Models. *New Space*, 291--297.
- Peng, K., Kou, I., & Chen, H. (2024). Space Debris. In Space Tourism Value Chain: When East Meets West. *Singapore: Springer Nature Singapore.*, 129-138.
- Roselli, N. (2011). Teoría del aprendizaje colaborativo y la teoría de la representación social: convergencias y posibles articulaciones. *Revista colombiana de Ciencias Sociales*, 2(2), 173-191.
- Rossetto, E. (2022, octubre 7). <https://www.nationalgeographicla.com/>. Retrieved abril 28, 2024, from <https://www.nationalgeographicla.com/espacio/2022/09/basura-espacial-que-es-y-que-problemas-puede-generar>

- S. Thuy Nguyen-Onstott. (2019). <https://www.nasa.gov>. Retrieved from <https://www.nasa.gov/headquarters/library/find/bibliographies/space-debris/>
- Seradata SpaceTrack. (2023, 01 31). *Number of spacecraft launches 2022-2023*. Retrieved from <https://spacetrak.seradata.com/Queries>
- Sidi, M. (1997). *Spacecraft Dynamics and Control: An Introduction*. Cambridge University Press.
- Slavin, R. (2002). *Aprendizaje cooperativo: Teoría, investigación y práctica*. AIQUE.
- Space Foundation. (2022, 27 05). *Space foundation releases the space report 2022 q2 showing growth of global space economy*. Retrieved 2023, from <https://www.spacefoundation.org/2022/07/27/the-space-report-2022-q2/>
- Stansbery Eileen K. . (2019, NOV). <https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/measurements/>. (NASA, Ed.) Retrieved ABRIL 2024, from <https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/measurements/>: <https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/measurements/>
- Starwalk.space. (2022, sept 26). <https://starwalk.space/es/news/space-junk>. Retrieved abril 27, 2024, from <https://starwalk.space/es/news/space-junk>: <https://starwalk.space/es/news/space-junk>
- T. Kennedy, J. Murray, & R. Miller. (2020, enero 16). <http://www.orbitaldebris.jsc.nasa.gov/>. (P. Phillip Anz-Meador, Ed.) Retrieved abril 25, 2024, from <https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/quarterly-news/pdfs/ODQNV24i4.pdf>
- Tucker, B., & Hank C., A. (2023). Everybody's Business to Know About Space: Cross-Disciplinarity and the Challenges of the New Space Age. *Space Policy*.
- Vega Matias. (2024, abril 17). www.biobiochile.cl/. Retrieved abril 28, 2024, from www.biobiochile.cl/: www.biobiochile.cl/

CAPÍTULO 5.

Tendencias actuales y futuras en Seguridad Operacional Espacial^{28*}

María Alejandra Corzo Zamora²⁹
Universidad Nacional de Colombia

Erika Juliana Estrada Villa³⁰
Bryan Felipe Ramírez Segura³¹
Escuela de Postgrados de la Fuerza Aeroespacial Colombiana

Resumen: La participación de Colombia en el ámbito espacial es relativamente reciente si se compara con países pioneros como Estados Unidos y Rusia, cuyos programas se remontan a la Guerra Fría. El incremento de actividades en este entorno ha evidenciado la necesidad de reglamentaciones que regulen las operaciones espaciales, en especial en lo relacionado con la seguridad operacional, un campo que en muchos casos aún carece de definiciones claras o se encuentra en proceso de consolidación. Este capítulo presenta los resultados de una caracterización del estado actual y de los principales campos de aplicación de la seguridad operacional en misiones espaciales, elaborada a partir de una revisión sistemática de literatura en bases de datos científicas. Como resultado, se ofrece un análisis sobre la clasificación de las

28 * Capítulo de libro resultado del proyecto de investigación “Caracterización del estado actual y campos de aplicación de la seguridad operacional en misiones espaciales” del grupo de investigación “CELISO” de la Fuerza Aeroespacial Colombiana. Los puntos de vista y los resultados de este capítulo pertenecen a los autores y no reflejan necesariamente los de las instituciones participantes.

29 Médico, magíster en Fisiología y Fisiología y Salud Espacial. Docente e Investigadora en Fisiología y Factores Humanos, Facultad de Medicina, Universidad Nacional de Colombia. Antigua Investigadora y docente en Seguridad Operacional. Código ORCID: 0000-0003-2401-2789. Contacto: macorzo@unal.edu.co

30 Doctora en Tecnología Educativa. Docente Investigadora de la Maestría en Seguridad Operacional Escuela de Postgrados Fuerza Aeroespacial Colombiana. Código ORCID: 0000-0001-5445-2895. Contacto: erika.estrada@epfac.edu.co.

31 Magíster en Calidad y Gestión Integral. Investigador de la Maestría en Seguridad Operacional Escuela de Postgrados Fuerza Aeroespacial Colombiana. Código ORCID: 0000-0003-1562-5479. Contacto: bryan.ramirez@epfac.edu.co.

misiones espaciales, los marcos normativos aplicables, las principales aplicaciones de la seguridad operacional y las tendencias emergentes que esta disciplina deberá atender en el mediano plazo.

Palabras clave: Misión espacial, seguridad espacial, gestión del riesgo, amenazas.

Introducción

Desde el lanzamiento del primer satélite artificial Sputnik I en 1957, las misiones espaciales han evolucionado de manera significativa en complejidad tecnológica, objetivos científicos y aplicaciones comerciales. Una misión espacial se concibe como un conjunto de actividades que buscan alcanzar un propósito específico en el entorno ultraterrestre. No obstante, la creciente magnitud de estas operaciones ha puesto en evidencia la necesidad de establecer lineamientos de seguridad operacional que garanticen el cumplimiento de sus objetivos, minimicen riesgos y dispongan de planes de mitigación frente a potenciales incidentes.

La seguridad operacional, entendida como el conjunto de principios, normas y prácticas destinadas a prevenir eventos no deseados y a mitigar sus consecuencias, se convierte en un eje fundamental para el desarrollo de programas espaciales seguros, sostenibles y eficientes. Sin embargo, el marco regulatorio y técnico en torno a la seguridad operacional en el espacio se encuentra aún en construcción, presentando vacíos en aspectos como la gestión del tráfico espacial, la mitigación de desechos orbitales, la protección planetaria y la regulación de nuevas actividades emergentes como el turismo espacial o los vuelos suborbitales.

En este contexto, el problema central que orienta esta investigación es la falta de un sistema consolidado y universalmente aceptado de seguridad operacional espacial que permita enfrentar los desafíos derivados del aumento exponencial de satélites, la proliferación de megaconstelaciones, la generación de escombros orbitales y el incremento de actores privados y estatales en el ámbito espacial. Esta ausencia de un marco integral dificulta la coordinación internacional, incrementa los riesgos de colisiones, interfiere con la sostenibilidad de las operaciones y amenaza la viabilidad futura de las misiones.

Así, la pregunta de investigación que orienta este capítulo es: ¿Cuáles son las tendencias actuales y futuras en materia de seguridad operacional espacial y de qué manera pueden contribuir a la consolidación de un marco normativo, técnico y operativo que garantice la sostenibilidad de las misiones en el espacio cercano a la Tierra?

Para dar respuesta, se desarrolló la investigación “Caracterización del estado actual y campos de aplicación de la seguridad operacional en misiones espaciales” (Fase I, 2023), inscrita en el Grupo de Investigación CELSO de la Fuerza Aeroespacial Colombiana (FAC) en cooperación con el Grupo de Neurobiología y Fisiología de la Universidad Nacional de Colombia (UNAL). Se empleó la metodología de revisión sistemática PRISMA-SR, utilizando palabras clave definidas mediante la estrategia PICO y consultas en bases de datos científicas. En una primera búsqueda se identificaron 4034 documentos, de los cuales 164 cumplieron los criterios de inclusión; en una segunda búsqueda se obtuvieron 396 documentos, seleccionando finalmente 7 de ellos.

El presente capítulo expone los principales hallazgos de dicha investigación, enfocados en la caracterización de las misiones espaciales, la revisión de la reglamentación aplicable, las aplicaciones de la seguridad operacional en el ámbito espacial y las tendencias que delinean los desafíos a mediano y largo plazo.

Descripción general de misiones y operaciones espaciales

Las misiones espaciales pueden ser clasificadas de diferentes formas según su área de aplicación, en primera medida el definir el objetivo de la misión juega un papel importante para las operaciones; las categorías indicadas por Adimurthy et al. (2007) se enfocan en *Ciencia y exploración*, *Aplicaciones*, *Desarrollo tecnológico* y *Misiones planetarias* (Tabla 1).

De acuerdo con Wittmann et. al. (2009) las misiones espaciales se pueden clasificar por el tipo de vuelo, en este el objetivo de la misión es determinante y juega un papel fundamental el tipo de vehículo a utilizar, para ello las categorías establecidas para este propósito se encaminan a la observación de la tierra, meteorología y monitoreo del clima, pruebas tecnológicas, investigación fundamental, comunicaciones, navegación, misiones militares, exploración planetaria, este último teniendo en cuenta el módulo de aterrizaje dispone de otros tipos de misión (Isaji, Maynard y Chudoba, 2018).

Tabla 1. *Síntesis comparativa de criterios de clasificación de misiones espaciales*

Criterio de clasificación	Categorías principales	Descripción resumida	Ejemplos / Aplicación
Objetivo de la misión (Adimurthy et al., 2007)	Ciencia y exploración	Estudio de radiaciones y recursos cósmicos.	Telescopios espaciales, misiones astronómicas.
	Aplicaciones	Comunicaciones, sensores remotos y navegación.	Satélites de telecomunicaciones, GNSS.
	Desarrollo tecnológico	Tecnologías para futuras misiones (reentrada, soporte vital, sistemas de protección, misiones análogas).	Vehículos de prueba, sistemas para Luna/ Marte.
	Misiones planetarias	Exploración de la Luna y planetas, propiedades físicas y químicas.	Orbitadores, rovers.
Tipo de vuelo (Wittmann et al., 2009) Tipo de vuelo (Wittmann et al., 2009)	Observación de la Tierra	Satélites en LEO con sensores ópticos, magnéticos y gravimétricos.	Teledetección.
	Meteorología y clima	GEO y LEO para monitoreo atmosférico.	GOES, Meteosat.
	Pruebas tecnológicas	Validación de materiales, robótica, navegación.	CubeSats, pruebas de reentrada.
	Investigación fundamental	Estudio de fenómenos físicos y astronómicos.	Hubble, James Webb.
	Comunicaciones	Conectividad global (36.000 km GEO).	Satélites comerciales.
	Navegación	Posicionamiento y sincronización en órbita media.	GPS, Galileo.
	Misiones militares	Aplicaciones estratégicas (observación, comunicaciones, defensa).	Satélites espías.
	Exploración planetaria	Generalmente no tripuladas (salvo Apolo).	Misiones a Marte y cometas.
	Módulos de aterrizaje	Misiones de salida, avanzada, cargo, lanzadera, reabastecimiento y recolección de muestras.	Apolo, misiones a Marte.
	Vuelos tripulados	Sistemas de soporte vital. Transporte (Soyuz, Shuttle) y larga estadía (ISS).	Misiones humanas en órbita baja.

Criterio de clasificación	Categorías principales	Descripción resumida	Ejemplos / Aplicación
Clasificación NASA 2018 (Bordi & Scolese, 2018)	Clase A	Requerimientos completos, cronograma estricto, presupuesto sin restricciones, vida útil ≥ 5 años.	Misiones insignia NASA.
	Clase B	Cronograma rígido, prioridad nacional, presupuesto amplio, vida útil ≥ 5 años.	Observación estratégica.
	Clase C	Requerimientos flexibles, vida útil 2–5 años, presupuesto limitado.	Satélites medianos.
	Clase D	Orientación experimental, vida útil 1–3 años, bajo presupuesto.	CubeSats, microsátélites.

Fuente: elaboración propia a partir de Adimurthy, V., Prasad, M. Y. S., & Shivakumar, S. K. (2007). Space mission planning and operations. *Current Science*, 93(12), 1791–1811.

Sin embargo, esta clasificación varía según la agencia espacial. Tanto la NASA como la ESA han adoptado un enfoque basado en riesgos, cuya versión más reciente (2018) busca garantizar la fiabilidad y la calidad sin comprometer los protocolos de seguridad (Bordi & Scolese, 2018; Leitner & Hyde, 2023; Sapountzoglou, 2023). En este modelo, la NASA establece cuatro categorías de misión (A, B, C y D), sintetizadas en la Tabla 1 (Clasificación NASA 2018), a partir de los siguientes parámetros:

- **Herencia directa:** proporción de componentes reutilizados de misiones previas (inversamente relacionada con el desarrollo tecnológico requerido).
- **Flexibilidad de los requerimientos:** capacidad de mantener objetivos dentro del presupuesto y cronograma, con posibilidad de ajustes ante imprevistos.
- **Tiempo de vida del diseño:** periodo durante el cual la arquitectura de la misión sigue siendo válida para cumplir sus objetivos.
- **Rigidez del presupuesto:** nivel de flexibilidad financiera a lo largo de las fases del proyecto.

Por otra parte, la Agencia Espacial Europea lleva a cabo ajustes a la clasificación de las misiones espaciales en coherencia con lo establecido por la NASA, con el fin de realizar una adecuada planeación y así garantizar el éxito en el desarrollo de estas dando cumplimiento a los tiempos de ejecución y presupuesto (Nikulainen y Tonicello, 2021).

Esta clasificación tiene como criterios de las misiones, el grado de criticidad de la misión para la estrategia de la agencia, los objetivos propios de la misión, el costo, el tiempo de vida y la complejidad. Estos criterios permiten dividir los elementos de la misión en diferentes riesgos, permitiendo una adaptación a la medida de los requerimientos necesarios y de la clasificación de los equipos (Nikulainen y Tonicello, 2021).

Posteriormente y según cada criterio, las misiones se clasifican en I, II, III, IV y V según la ponderación en cada criterio (Tabla 2).

Tabla 2. *Clasificación de las misiones espaciales en la Agencia Espacial Europea*

Criterios de misión	Tipo de misión				
	I	II	III	IV	V
Grado de criticidad para la agencia (misión, insignia, cooperación internacional, impacto, objetivos estratégicos e imagen)	Alto y extremadamente crítico	Altamente crítico	Medianamente crítico	Baja criticidad	Propósitos educativos
Objetivos de la misión (prioridad para la dirección y propósito: eje, demostración en órbita, educativa)	Alta y extremadamente prioritario	Alta prioridad	Mediana prioridad	Baja prioridad	Propósitos educativos
Costo (costo total a la finalización)	>700M€	200M—700 M€	50 M-200 M€	50 M – 1 M€	<1 M€
Tiempo de vida de la misión	>10 años	5-10 años	2-5 años	2 años-3 meses	<3 meses
Complejidad de la misión (diseño de la interfaz, cargas únicas, desarrollo de nuevas tecnologías)	Alta	Alta a media	Media a baja	Alta— baja (comercial)	baja

Fuente: tomado de Utilization of COTS in ESA Missions Nikulainen, M., y Tonicello, F. (2021).

Bajo otra perspectiva, el creciente aumento de fuerzas militares espaciales, el cual inicia con la fuerza espacial de los Estados Unidos creada el 20 de diciembre de 2019 (United States Space Force, s. f.), ha permitido una visión militar de las misiones espaciales dentro del cual se denominan Operaciones espaciales.

Mencionadas operaciones se clasifican en el interior de la Fuerza Espacial de los Estados Unidos en ámbitos como la conciencia situacional, el control espacial ofensivo y defensivo, la navegación y sincronización, la inteligencia y vigilancia, además de comunicaciones satelitales, monitoreo ambiental y funciones críticas como la advertencia de misiles y la detección de detonaciones nucleares (United States Space Force, 2020). Por su parte, las misiones espaciales análogas, consideradas parte del desarrollo tecnológico, cumplen un papel esencial en el entrenamiento y la investigación científica, ya que permiten crear escenarios educativos, ensayar protocolos operativos y probar hipótesis de alto riesgo de manera segura y multidisciplinaria, orientadas a preparar futuras misiones hacia la Luna y Marte (Kołodziejczyk et al., 2022).

Reglamentación aplicable a seguridad operacional en misiones espaciales

El campo espacial ha sido un escenario poco explorado en términos de regulación y, en consecuencia, se encuentra en constante actualización frente a nuevas actividades como el turismo espacial, los vuelos suborbitales y la utilización del espacio cercano (Near Space) mediante vehículos no tripulados. A ello se suma la creciente preocupación internacional por la gestión del tráfico espacial (Abou Yehia & Schrogl, 2010).

En este marco, la reglamentación espacial puede clasificarse en dos tipos: i) instrumentos vinculantes, como tratados internacionales, estándares técnicos y regulaciones nacionales; y ii) instrumentos no vinculantes, que funcionan como acuerdos voluntarios con contenidos de carácter ideal, muchas veces difíciles de consensuar en el ámbito internacional. Ambos mecanismos se complementan entre sí y contribuyen de manera conjunta a la construcción del marco de la legislación espacial (Oltrogge & Christensen, 2020).

Reglamentación internacional en misiones espaciales

La Oficina de las Naciones Unidas para Asuntos del Espacio Exterior (UNOOSA) alberga al Comité sobre los Usos Pacíficos del Espacio Ultraterrestre (COPUOS), creado en 1959 por la Asamblea General con el fin de regular la exploración y el uso del espacio para beneficio de la humanidad. Entre sus funciones se incluyen el estudio de las actividades espaciales, la promoción de programas de investigación y el análisis de los problemas legales derivados de la exploración espacial (COPUOS, s. f.).

Dentro de su labor normativa, el COPUOS ha emitido las Directrices sobre la sostenibilidad a largo plazo de las actividades espaciales, organizadas en cuatro secciones: i) marco político y reglamentario, ii) seguridad de las operaciones espaciales, iii) cooperación internacional, capacitación y sensibilización, y iv) investigación y desarrollo científico-técnico (Chernykh, 2018).

A nivel internacional, la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) ha incorporado progresivamente lineamientos aplicables a las actividades espaciales. Entre ellos se destacan el Material guía en buenas prácticas (2015), la integración de la aviación civil espacial en los planes de la OACI (2016) y el material de guía ASBU (2018), que incluye un mapa de tecnologías aeronáuticas y procedimientos vinculados con los viajes espaciales (ICAO Space Programme, s. f.). De manera complementaria, en Estados Unidos la Administración Federal de Aviación (FAA) ha establecido una sección específica para el transporte espacial comercial, cuyos pilares son la seguridad, las operaciones, el licenciamiento y la regulación de los puertos espaciales (Tabla 3) (FAA, s. f.; Davidian, 2017).

Tabla 3. *Reglamentación Espacial FAA*

Normatividad FAA Espacial			
✓	Regulación para transporte espacial comercial	✓	Guías para aprobaciones de seguridad
✓	Límites de riesgos colectivos para lanzamientos y reentradas con el uso de áreas de peligro establecidas	✓	Guías de seguridad para el lanzamiento y reentrada de vehículos espaciales
✓	Waivers recíprocos de recepción para actividades licenciadas o permitidas para lanzamientos y reentradas	✓	Lista de chequeo para vuelos espaciales humanos 2008
✓	Requerimientos para licencias de lanzamientos y reentradas		

Fuentes: elaboración propia datos tomados de Legislation y Policies, Regulations y Guidance - FAA

Así mismo, el Título 51 del Código de los Estados Unidos establece la reglamentación para los programas espaciales nacionales y comerciales, abarcando aspectos operativos esenciales (51 U.S.C., 2010). Este marco incluye disposiciones sobre la coordinación de actividades aeronáuticas y espaciales, medidas de seguridad y cuidados en salud, además de un programa de investigación y desarrollo. En conjunto, estas regulaciones conforman una estructura integral orientada a garantizar la seguridad y la sostenibilidad de las misiones espaciales en los Estados Unidos.

Si bien organismos como COPUOS, OACI y FAA han emitido lineamientos y directrices, la mayoría de estas disposiciones resultan declarativas y carecen de mecanismos vinculantes, lo que refleja que, pese a décadas de regulación, persiste un vacío normativo significativo en materia de seguridad operacional espacial.

Aplicaciones de la Seguridad Espacial

Como se mencionó previamente, el desarrollo de las misiones espaciales debe considerar tanto la normatividad internacional como la nacional, según corresponda. De igual forma, resulta indispensable implementar un programa específico de seguridad operacional que contemple la identificación de riesgos, los puntos de control, las medidas de mitigación y un plan de respuesta ante emergencias que puedan presentarse durante la misión. Bajo este marco, a continuación, se describen las principales aplicaciones de la seguridad espacial.

Gestión del tráfico espacial (Space Traffic Management STM)

El incremento de objetos en órbita terrestre convirtió al tráfico espacial en un tema de creciente relevancia desde los años 1980, con una normatividad en constante evolución. El Instituto Americano de Aeronáutica y Astronáutica (AIAA) impulsó esta discusión mediante talleres que analizaron la problemática y propusieron provisiones técnicas y regulatorias para garantizar un acceso seguro al espacio exterior, la realización de operaciones libres de interferencia y la viabilidad de sistemas reutilizables (Abou Yehia & Schrogl, 2010). A pesar de los avances tecnológicos, la normativa internacional, especialmente el Tratado del Espacio Exterior, ha mostrado pocos cambios en las últimas cuatro décadas, lo que contrasta con el crecimiento sostenido de las actividades espaciales y el aumento del presupuesto destinado a seguridad

y defensa (Akgun et al., 2007; Abou Yehia & Schrogl, 2010; Frandsen, 2022; Antoni et al., 2020).

El aumento del número de objetos en órbita ha elevado la probabilidad de colisiones, fallas de comunicación y otros eventos críticos. Se estima que entre el 10 y 15 % del tráfico espacial corresponde a vuelos tripulados y, más recientemente, suborbitales (Akgun et al., 2007). Adicionalmente, la proliferación de basura espacial —restos de vehículos, fragmentos producto de colisiones y partículas naturales como meteoritos— agrava la situación. Según la Agencia Espacial Europea, en agosto de 2023 se registraban 15.760 satélites lanzados desde el inicio de la era espacial, de los cuales 10.550 permanecían en órbita y cerca de 8.400 seguían activos, coexistiendo con aproximadamente 34.440 objetos residuales derivados de unos 640 eventos de rupturas, explosiones y colisiones (Manfletti, Guimarães & Soares, 2023).

En este contexto, el tráfico espacial fue definido en 2001 por la IAA como todas las fases de vida de un objeto espacial, desde el lanzamiento hasta su disposición final, incluyendo la prevención de daños inmediatos —colisiones y reentradas no controladas— y la reducción de riesgos a largo plazo mediante maniobras orbitales y relocalización de satélites (Akgun et al., 2007; Cukurtepe & Akgun, 2009; Frandsen, 2022). Posteriormente, Filho (2002) enfatizó la necesidad de establecer un sistema global de gestión del tráfico espacial sustentado en cooperación internacional, que articule hardware, redes y personal especializado. En este sentido, diversas organizaciones internacionales y agencias han sido identificadas como actores clave, tal como se resume en la Tabla 4, lo que refleja la urgencia de avanzar hacia un marco coordinado de gobernanza espacial (Akgun et al., 2007).

Tabla 4. *Organismos de cooperación del tráfico espacial*

Sistema de gestión del tráfico espacial global	
Oficina de las Naciones unidas para asuntos del espacio exterior (UNOOSA)	Implementa el programa de aplicaciones espaciales y mantiene el registro de los objetos lanzados al espacio exterior; y provee soporte para el uso de la ciencia y tecnología espacial para la economía y desarrollo social de todas las naciones.
El Comité de coordinación interagencial de basura espacial	Es un foro de cuerpos gubernamentales para la coordinación de actividades relacionadas con basura espacial alrededor de la Tierra

Sistema de gestión del tráfico espacial global	
Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU)	Estandariza y regula la radio internacional y las telecomunicaciones; así como, los espacios orbitales para satélites de comunicación geo sincrónico.
La Federación Astronáutica Internacional (IAF)	Esta organización trabaja en el avance del conocimiento sobre el espacio y el desarrollo de aplicaciones espaciales en beneficio de la humanidad.

Fuente: elaboración propia, datos tomados del Sistema de gestión de tráfico espacial Akgun, I., Cukurtepe, H., y Ince, F. (2007).

La creciente dependencia de los servicios espaciales —posicionamiento, navegación, telecomunicaciones y observación de la Tierra— subraya la necesidad de garantizar un acceso seguro e ininterrumpido a las operaciones (Giannopapa & Antoni, 2023). En este marco, la Gestión del Tráfico Espacial (STM) se entiende como un conjunto de disposiciones técnicas y regulatorias orientadas a asegurar la estabilidad y sostenibilidad de las actividades espaciales. Este concepto, incluido en la iniciativa Space 2030 de UNISPACE, promueve la cooperación internacional y el uso pacífico del espacio (Antoni et al., 2020; Giannopapa & Antoni, 2023). Un sistema de STM debe contemplar la seguridad de la información, sistemas de notificación, regulación concreta y mecanismos de implementación, inspirándose en la experiencia de la aviación y la navegación marítima. Por ello, organismos como la OACI y el UNCOPUOS son referentes clave en su desarrollo (Abou Yehia & Schrogl, 2010).

Los objetivos básicos del STM incluyen la protección de vehículos espaciales, la reducción de interferencias electromagnéticas y físicas, la prevención de anomalías derivadas del clima espacial, la optimización de recursos orbitales y la resolución de potenciales conflictos (Akgun et al., 2007; Cukurtepe & Akgun, 2009). Para alcanzar estos fines resulta esencial la Conciencia Situacional Espacial (SSA), definida como la capacidad de detectar, seguir, identificar y catalogar objetos en el espacio —satélites activos o inactivos, escombros, fenómenos de clima espacial y operaciones de proximidad— (Antoni et al., 2020; Thangavel et al., 2021; Giannopapa & Antoni, 2023). En el plano regulatorio destacan las Guías de sostenibilidad de las actividades espaciales del UNCOPUOS (UNOOSA, 2018), la Directiva de Política Espacial 3 (SPD-3) de Estados Unidos (Presidential Memoranda, 2018; Hitchens, 2019) y la Estrategia Europea para la Administración del Tráfico Espacial (2021), que dio origen al Centro de Satélites de la Unión Europea (SatCen).

El STM incorpora principios operacionales similares a los de la navegación aérea y marítima, como el derecho de paso, distancias mínimas de seguridad, zonificación orbital, reglas diferenciadas según altitud o misión y normas de entrada/salida para lanzamientos y operaciones de fin de vida (Frandsen, 2022). En este contexto, los servicios STM abarcan el monitoreo y trazabilidad de objetos espaciales, la gestión de datos, alertas de colisión, apoyo a lanzamientos y resolución de conflictos (Cukurtepe & Akgun, 2009).

Iniciativas como el consorcio CONFERS han establecido buenas prácticas para operaciones de enlace y proximidad (CONFERS, 2019; 2022). Finalmente, la dimensión militar se refleja en la Doctrina Conjunta 3-14 del Departamento de Defensa de Estados Unidos, que contempla control ofensivo y defensivo del espacio, y reconoce a la SSA como pilar fundamental al integrar dimensiones físicas, virtuales, humanas e informacionales (Hitchens, 2019; Giannopapa & Antoni, 2023).

En suma, aunque la gestión del tráfico espacial (STM) y la conciencia situacional espacial (SSA) se han consolidado como conceptos clave en la seguridad operacional, su desarrollo normativo sigue siendo incipiente. La ausencia de un marco internacional vinculante y la dependencia de lineamientos voluntarios limitan su efectividad, lo que incrementa la urgencia de avanzar hacia un sistema global de gobernanza que permita prevenir colisiones, gestionar las mega-constelaciones y garantizar la sostenibilidad a largo plazo de las actividades espaciales

Vuelos suborbitales y turismo espacial

El turismo espacial constituye un mercado emergente que introduce nuevos factores de riesgo asociados a la oferta de vuelos a clientes privados. Los vuelos suborbitales, que alcanzan aproximadamente los 100 km de altura y ofrecen cerca de 5 minutos de microgravedad, pueden emplearse para fines turísticos, transporte de carga o investigación científica (Abou Yehia & Schrogl, 2010; Buzzo et al., 2024).

Actualmente, su regulación es limitada, ya que estas operaciones se ubican en la frontera entre los ámbitos aeronáutico y espacial, lo que plantea la necesidad de un régimen híbrido que considere tanto la naturaleza de los equipos utilizados (cohetes propulsores, vehículos acoplados a aeronaves, tecnologías hipersónicas) como las condiciones de operación (Abou Yehia & Schrogl, 2010; Buzzo et al., 2024).

En Europa, diversos Estados han desarrollado leyes nacionales para regular actividades privadas en el espacio, entre ellas el Acta para el lanzamiento de objetos al espacio exterior (Noruega, 1969), el Acto de actividades espaciales (Suiza, 1982), el Acta del espacio exterior (Reino Unido, 1986), la Ley Espacial (Bélgica, 2005) y el Acta de actividades espaciales (Países Bajos, 2006) (Abou Yehia & Schrogl, 2010). Estas normas buscan garantizar la seguridad y alinearse con estándares internacionales.

Gran parte de esta normativa se centra en la certificación de vehículos, aplicando regulaciones aeronáuticas, pues los vuelos suborbitales operan en la atmósfera de forma similar a aeronaves convencionales. Por ello, las entidades llamadas a regular son la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) y, en Europa, la Agencia Europea de Seguridad en la Aviación (EASA) (Abou Yehia & Schrogl, 2010; Buzzo et al., 2024). La EASA, junto con expertos médicos, ha participado en la definición de requisitos de entrenamiento y calificación de tripulaciones, siguiendo el modelo de Estados Unidos. En este país, el documento Requerimientos para el Vuelo Espacial Humano (2010) complementa la Commercial Space Launch Act, estableciendo la obligación de licencia para operadores y tripulaciones, quienes deben certificar su entrenamiento en maniobras de vuelo y capacidad de afrontar aceleraciones, microgravedad y vibraciones (51 U.S.C., 2010a).

En Estados Unidos, la regulación se complementa con leyes como la Commercial Space Launch Amendment Act (CSLAA), la Commercial Space Launch Activities Act (2011–2012) y la Commercial Space Launch Competitiveness Act (2015), que incluye cuatro títulos: estímulos a la competitividad y emprendimiento aeroespacial, teledetección comercial, la oficina de comercio espacial y la utilización de recursos espaciales (U.S. Commercial Space Launch Competitiveness Act, 2015). Estas disposiciones abarcan tanto vuelos tripulados como no tripulados, consolidando un marco legal en evolución para el desarrollo del sector.

Protección planetaria

La protección planetaria comprende la preservación de los ambientes de los cuerpos celestes, la protección de posibles formas de vida nativas y la regulación sobre la introducción de materiales potencialmente dañinos a la Tierra (Coustenis et al., 2021; Coustenis et al., 2023). En este marco, la NASA ha definido lineamientos específicos como la NASA-STD-8719.27 (requisitos de protección biológica en vuelos espaciales), la NID 8715.129 (misiones humanas a Marte) y la NPR 8715.24 (misiones robóticas). En Europa, los

estándares ECSS-Q-ST-70-58C y ECSS-Q-ST-70-53C regulan el control de biocargas en salas limpias y la compatibilidad de materiales con procesos de esterilización, respectivamente. Todas estas disposiciones buscan reducir el riesgo de contaminación cruzada y asegurar que las misiones se desarrollen bajo criterios de seguridad biológica.

La entidad internacional que lidera estos esfuerzos es el COSPAR (Committee on Space Research), responsable de establecer lineamientos, exigir el registro de misiones con sus riesgos biológicos y asesorar en la evaluación y mitigación de estos (Coustenis et al., 2023).

Por otra parte, aunque el impacto de un asteroide contra la Tierra es un evento de muy baja probabilidad, sus consecuencias serían devastadoras. La detección temprana y una respuesta preplanificada son pilares fundamentales para reducir riesgos (Jamschon Mac Garry et al., 2024). En este sentido, el COPUOS, a través de su Action Team on Near-Earth Objects (AT-14), impulsó en 2013 la creación de la Red Internacional de Advertencia de Asteroides (IAWN) y el Grupo de Asesoría para el Planeamiento de Misión Espacial (SMPAG), como mecanismos de coordinación internacional para enfrentar amenazas de objetos cercanos a la Tierra (Jamschon Mac Garry et al., 2024).

Escombros espaciales

Los escombros espaciales se han convertido en una de las principales preocupaciones para la seguridad operacional debido a su impacto ambiental en la órbita terrestre y su interferencia con las operaciones espaciales. Un marco fundamental en este ámbito son las Guías para la Mitigación de Escombros Espaciales del Comité de Usos Pacíficos del Espacio Exterior de las Naciones Unidas (UNCOPUOS), que apoyan los esfuerzos internacionales para reducir este riesgo (Dalledonne, 2021). Su monitoreo, de acuerdo con el tamaño de los objetos, forma parte del sistema de Conciencia Situacional Espacial (SSA), descrito previamente en el apartado de STM.

En el plano técnico, la ISO publicó en 2011 la norma ISO 24113: Sistemas Espaciales – Requisitos para la Mitigación de Escombros Espaciales, revisada en 2019 y 2023, que define lineamientos para lanzadores, vehículos orbitales y otros objetos espaciales con el fin de minimizar riesgos. Esta norma ha sido adoptada en el marco de la Cooperación Europea para la Estandarización Espacial (ECSS) (Gleason, 2020; ISO, 2022).

De manera complementaria, el Comité Interagencial de Coordinación de Escombros Espaciales (IADC), integrado actualmente por 13 agencias lideradas por la NASA, ha establecido guías internacionales basadas en tres principios fundamentales: prevenir rupturas en órbita (colisiones y explosiones), retirar vehículos y etapas al final de su vida útil en un máximo de 25 años tras la misión, y limitar la liberación de objetos durante operaciones normales (Gleason, 2020).

Pese a la existencia de estándares como la ISO 24113 y de iniciativas multilaterales como las guías del IADC, la gestión de los escombros espaciales sigue siendo fragmentada y no vinculante. La falta de mecanismos de cumplimiento efectivos limita su impacto, lo que evidencia la necesidad de un marco global obligatorio que permita enfrentar de manera coordinada uno de los principales riesgos para la sostenibilidad de las actividades espaciales

Tendencias de la seguridad misiones espaciales

La seguridad operacional en misiones espaciales abarca distintos niveles, desde las operaciones en tierra hasta las misiones tripuladas. En este ámbito se emplea el término seguridad espacial (space safety), indispensable para el desarrollo sostenible y el adecuado desempeño de misiones de todo tipo: tripuladas, no tripuladas, comerciales, científicas, exploratorias y militares (Pelton et al., 2020).

El propósito de la seguridad espacial es proteger la vida humana, las infraestructuras terrestres y orbitales, así como los ambientes relacionados con las misiones, ya sean terrestres, orbitales o planetarios. Este concepto se centra en amenazas involuntarias, como errores de diseño, fallas técnicas, errores humanos o fenómenos naturales, que deben ser anticipados y mitigados (Pelton et al., 2020).

Los campos de aplicación de la seguridad espacial integran intereses nacionales, internacionales y globales, e incluyen procesos de mitigación de riesgos, diseños basados en riesgos y controles de peligros operacionales. En la práctica, estos componentes suelen aplicarse de manera simultánea, como se ilustra en la Figura 1.

Figura 1. *Campos de aplicación de la seguridad operacional espacial*



Fuente: Traducido de Pelton et al. (2020).

La Asociación Internacional para la Seguridad Espacial (IAASS) fue creada con el fin de promover una cultura de seguridad que abarque todos los aspectos de las misiones espaciales: vehículos, estaciones, hábitats extraterrestres, equipos y cargas útiles, garantizando entornos seguros para el público, las tripulaciones y demás participantes (Pelton et al., 2020). En este marco, la seguridad operacional espacial busca mitigar o prevenir condiciones peligrosas de origen humano o natural que puedan ocasionar muertes, enfermedades, pérdidas de sistemas y equipos o incluso daños al ambiente (Pelton et al., 2020).

Aunque los accidentes espaciales son poco frecuentes, suelen percibirse como fallas institucionales. El riesgo de pérdida de vidas en vuelos espaciales se estima en 1 por cada 100 vuelos, en contraste con la aviación comercial, que en Estados Unidos alcanza 1 en 10 millones de vuelos al año (Pelton et al., 2020). Esta diferencia resalta la necesidad de establecer un nivel aceptable de seguridad, concepto que no depende solo de factores técnicos, sino también culturales, económicos y políticos, definidos por cada nación a través de sus regulaciones.

En este sentido, autoridades como la Administración Federal de Aviación (FAA) y la Agencia Europea de Seguridad en Aviación (EASA) sirven como referentes regulatorios para operaciones espaciales (Pelton et al., 2020). De forma complementaria, la NASA creó en 2015 el equipo de Mission Operations Planning (MOP), encargado de planificar las actividades de vuelo, desde la arquitectura y estrategia de operaciones hasta la preparación en tierra, el lanzamiento y la disposición final de los vehículos (Sea, 2017).

De igual manera, la NASA dispone de la *Oficina de Seguridad y Aseguramiento de la Misión*, encargada de garantizar el cumplimiento de directivas y procedimientos orientados al fortalecimiento del programa de seguridad institucional. Entre estos documentos destacan la NPD 8700.1E, que establece la *Política de seguridad y éxito de la misión (NASA Policy for Safety and Mission Success)*, y la NPR 8715.3, que define los *Requisitos generales del programa de seguridad (General Safety Program Requirements)*. En la Tabla 5 se presentan de manera consolidada los principales procedimientos que regulan la seguridad espacial en la NASA (Shivers, 2010).

Tabla 5. Procedimientos de seguridad espacial NASA

Código	Nombre
NPD 8700.1	NASA Policy for Safety and Mission Success
NPD 8700.3	Safety and Mission Assurance (SMA) Policy for Spacecraft, Instruments, and Launch Services.
NPD 8710.3	NASA Policy for Limiting Orbital Debris Generation
NPD 8710.5	NASA Safety Policy for Pressure Vessels and Pressurized Systems
NPR 8715.7	Expendable Launch Vehicle Payload Safety Program
NPD 8720.1	NASA Reliability and Maintainability (RyM) Program Policy
NPD 8730.5	NASA Quality Assurance Program Policy
NPR 7120.5	NASA Program and Project Management Processes and Requirements Lessons Learned Process
NPR 7120.6	Systems Engineering Procedural Requirements
NPR 7123.1	NASA Software Engineering Requirements
NPR 7150.2	Risk Management Procedural Requirements
NPR 8000.4	Human-Rating Requirements for Space Systems
NPR 8705.2	Risk Classification for NASA Payloads Probabilistic Risk Assessment (PRA)
NPR 8705.4	Procedures for NASA Programs and Projects
NPR 8705.5	Safety and Mission Assurance Audits, Reviews, and Assessments
NPR 8705.6	Range Safety Program
NPR 8715.5	NASA Procedural Requirements for Limiting Orbital Debris
NPR 8715.6	NASA Safety and Mission Assurance Roles and Responsibilities for Expendable Launch Vehicle Services
NASA-STD-8709.2	Expendable Launch Vehicle Payload Safety Review Process Standard
NASA-STD-8719.8	Software Safety Standard
NASA-STD-719.13	Software Assurance Standard
NASA-STD-8739.	Guidelines and Assessment Procedures for Limiting Orbital Debris
NSS 1740.14	Standard Practice for Safety Systems
MIL-STD-882	Safety Requirements Document
SSP 50021	Licensing and Safety Requirements for Launch
AFSPCMAN-91710	Natural Orbital Environment Guidelines for Use in Aerospace Vehicle Development
NASA TM 4527	

Fuente: Elaboración propia tomado de (Shivers, 2010).

El crecimiento de las operaciones espaciales civiles ha impulsado la definición de estándares internacionales de seguridad. La IAASS publicó el documento IAASS-SSI-1700: Safety Standard – Commercial Human-Rated Space Systems, orientado a la protección del personal de vuelo, vehículos y sistemas de lanzamiento frente a los riesgos del vuelo espacial (IAASS, 2018; Gleason, 2020). Este marco refleja la rápida evolución de la seguridad

operacional espacial, un campo en constante desarrollo debido a los avances tecnológicos y al incremento de objetos en órbita (Oltrogge & Alfano, 2019), donde la conciencia situacional espacial (SSA) y la gestión del tráfico (STM) se consolidan como elementos críticos (Hilton et al., 2019).

Para enfrentar estos desafíos, resulta necesario fortalecer los sistemas de SSA y las estructuras de reporte de datos, así como actualizar la regulación internacional para incorporar criterios relacionados con nuevas arquitecturas, como las megaconstelaciones en órbita baja (Long & Zhang, 2024). Desde 1957 hasta la actualidad, se han lanzado alrededor de 3.400 satélites, cifra que continúa aumentando con la expansión del sector comercial y el despliegue de microsátélites para telecomunicaciones y observación remota (Maclay et al., 2021). Este incremento ha intensificado la preocupación por el tráfico espacial, la generación de escombros y su impacto ambiental orbital, lo que ha llevado a definir la Gestión del Ambiente Espacial (SEM) como el marco integral para mitigación y remediación de residuos (Maclay et al., 2021).

La SEM contempla cuatro principios esenciales: (1) prevención de la creación intencional de escombros; (2) reducción del riesgo de explosiones accidentales; (3) mitigación de colisiones con objetos conocidos; y (4) disposición post-misión de vehículos y etapas (Maclay et al., 2021). En este contexto, los nanosatélites (1–10 kg) y los CubeSats representan un reto particular, pues su reducido tamaño dificulta la detección y rastreo, y su similitud estructural complica la diferenciación entre ellos (Skinner, 2020).

La prevención efectiva se apoya en sistemas de SSA, que permiten predecir órbitas y calcular riesgos de conjunción, complementados con asociaciones de datos como la Space Data Association, que facilitan la coordinación entre operadores (Maclay & McKnight, 2021). Ejemplos institucionales incluyen el Centro de Operaciones Espaciales Conjuntas (JSpOC) de EE. UU., que rastrea más de 22.000 objetos, y servicios privados como LeoLabs, Lockheed Martin, Boeing y ExoAnalytics, que ofrecen capacidades de monitoreo mediante radares y telescopios (Paul et al., 2010; Pelton, 2020).

Autores como Pelton, Sgobba y Trujillo (2020) enfatizan la necesidad de un enfoque integral para gestionar los desechos espaciales en un entorno cada vez más hiperconectado, mientras que Lemmens y Letizia (2020) destacan la urgencia de fortalecer marcos regulatorios y estrategias de mitigación. En esta misma línea, Hitchens (2019) advierte sobre el riesgo creciente de colisiones orbitales asociado a la proliferación de satélites y la necesidad de reemplazar constelaciones en órbita baja bajo regulaciones más estrictas.

El caso de Starlink ilustra este desafío: para abril de 2024 se contabilizaban 9.780 satélites activos, de los cuales 5.549 corresponden a esta red, incrementando así el riesgo de congestión orbital (Long & Zhang, 2024). Además, plataformas derivadas como StarShield amplían el uso de estas constelaciones a fines de seguridad nacional, replicando modelos en compañías como la China Aerospace Science and Technology Corporation, lo que incrementa las implicaciones en seguridad y defensa.

En este escenario, la seguridad operacional espacial requiere combinar SSA, STM y SEM, junto con regulación efectiva y cooperación internacional, para gestionar el creciente tráfico y mitigar los riesgos asociados a las megaconstelaciones y la generación de escombros. Solo mediante protocolos claros y estrategias de mitigación robustas será posible garantizar la sostenibilidad de las operaciones espaciales en el mediano y largo plazo (Finkleman, 2010; McKnight, 2019).

Seguridad de datos e inteligencia artificial en misiones espaciales

El creciente uso de la inteligencia artificial (IA) en el diseño de sistemas espaciales ha cobrado relevancia debido a su capacidad para ejecutar tareas que tradicionalmente requerían de la inteligencia humana, como la percepción visual, el reconocimiento de voz, la toma de decisiones y el procesamiento multilingüe. En este contexto, la Unión Europea publicó en 2019 unas guías éticas para la aplicación de la IA en el ámbito espacial, con el fin de establecer principios regulatorios y de seguridad. A partir de estas directrices, Martín y Freeland (2021) identifican cuatro elementos clave, junto con aspectos específicos y aplicaciones potenciales de la IA en futuras misiones espaciales, los cuales se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. Guías éticas en inteligencia artificial

Elementos clave	Aspectos particulares	Aplicaciones
Agencias y usuarios deben entender e interactuar con la IA de forma satisfactoria.	Teledetección y vigilancia para una amplia gama de misiones, como el cambio medioambiental, la seguridad nacional y el seguimiento aéreo y marítimo.	Robótica en el espacio, incluidos vehículos de extensión de misión, apoyo a vehículos espaciales tripulados y naves espaciales como vehículos de transporte automatizados con capacidad para la toma de decisiones en exploración, reparación, identificación y adaptación durante las misiones.

Elementos clave	Aspectos particulares	Aplicaciones
La IA requiere algoritmos para su seguridad que lidie con errores o inconsistencias durante el ciclo de vida del sistema de IA.	Comunicaciones entre la tierra y el espacio, y de satélite a satélite (especialmente en el caso del mega/grandes satélites, constelaciones de pequeños satélites, utilización de radiofrecuencias, comunicaciones ópticas-láser, radar y otras tecnologías.	Vehículos de lanzamiento y tripulados reutilizables, incluido el uso de IA sofisticada para facilitar el regreso a la Tierra al término de la misión correspondiente.
Los ciudadanos deben controlar totalmente sus datos y el sistema de IA debe garantizar la privacidad y la protección de datos.	Análisis de datos, incluidas las cuestiones políticas y normativas inherentes a la recopilación de cantidades masivas de información, y cómo puede utilizarse dicha información, así como la privacidad de los datos.	Minería/explotación de asteroides, incluido el análisis de sustancias a partir de muestras de asteroides.
Los sistemas de IA deben ser documentados y trazados como principio de transparencia.	Los satélites como alternativa a los sistemas terrestres, incluida la computación en nube, los servicios transfronterizos de banda ancha y otros métodos de transferencia de datos e información.	Misiones a Marte y otros objetivos que incluyen tránsito de información, maniobras y retorno.
Mecanismos de responsabilidad y fiabilidad deben ser utilizados para todos los sistemas de IA.		

Fuente: datos tomados de The Advent of Artificial Intelligence in Space Activities: New Legal Challenges. Maclay, T. y McKnight, D. (2021).

Aseguramiento de las operaciones espaciales

Dentro de los campos de aplicación de la seguridad operacional espacial se encuentra la Garantía de las Operaciones Espaciales (SOA, Space Operations Assurance), cuyo propósito es asegurar la efectividad y seguridad de las misiones. La SOA integra dominios clave como la Conciencia Situacional Espacial (SSA), la Gestión del Tráfico Espacial (STM) y la Gestión del Ambiente Espacial (SEM), y su implementación requiere de esquemas de cooperación público-privada, como el propuesto Consorcio del Sistema de Garantía de las Operaciones Espaciales (SOAC).

El núcleo de la SOA se fundamenta en la gestión del riesgo, organizada en tres componentes principales. En este marco, el STM resulta esencial para el comando y control de satélites, así como para coordinar las interacciones entre operadores y la población de escombros rastreados. Para que el STM funcione de manera eficaz, debe responder en tiempo real a necesidades críticas como la fiabilidad del vehículo (despliegue, operación y retiro), la identificación y resolución de interferencias de radiofrecuencia, la provisión de un marco temporal–espacial para la orientación y la integración de sistemas de soporte a la toma de decisiones automatizada (McKnight, 2019).

De acuerdo con Skinner et al. (2019), el STM debe además incluir mecanismos de protección frente a pérdidas, degradación o interrupción de capacidades y servicios espaciales, la capacidad de emitir advertencias ante amenazas y peligros, y la preservación a largo plazo del ambiente espacial. Estos elementos abarcan también la seguridad en lanzamientos y puestas en órbita, la evaluación de riesgos en reentradas, el desarrollo de sistemas autónomos y resilientes, y el monitoreo del cumplimiento de marcos normativos, políticas y guías internacionales.

En este ecosistema, el SSA aporta información crítica sobre la posición y estado de los objetos espaciales, así como sobre condiciones electromagnéticas y meteorología espacial. Dichos insumos permiten caracterizar el entorno orbital y constituyen la base para la actuación coordinada de sistemas como STM, STC, SDA y SEP.

No obstante, persisten importantes desafíos. Oltrogge y Christensen (2020) identifican brechas en la gobernanza del tráfico espacial que incluyen la falta de control de calidad y normalización de datos, la ausencia de procedimientos estandarizados en operaciones de encuentro y proximidad, y una limitada capacidad de verificación independiente. También destacan vacíos en la definición de “reglas de la vía”, la gestión de anomalías, el uso de satélites como sensores, la remoción activa de escombros y la protección de datos sensibles. Estas carencias evidencian la urgencia de fortalecer los marcos regulatorios y técnicos que sustentan la seguridad y sostenibilidad de las operaciones espaciales.

Aspectos de la industria privada en vuelos espaciales

Como se mencionó en el apartado de legislación, la industria espacial privada ha tomado como referencia los mecanismos reguladores de la aviación civil. Sin embargo, la necesidad de protocolos específicos en seguridad operacional espacial ha impulsado la creación de acuerdos y normas dirigidos al sector privado. Un ejemplo es la Enmienda a la Ley de Lanzamientos Espaciales Comerciales (CSLAA, 2004), que busca alternativas regulatorias complementarias a la FAA, reconociendo que los niveles aceptables de riesgo varían según el sistema y evolucionan con los cambios tecnológicos y socioeconómicos (Sgobba, 2015).

En este campo, la seguridad operacional se logra mediante la implementación de requerimientos agrupados en dos conceptos: tolerancia a fallos, basada en redundancias y barreras para mantener servicios pese a errores; y prevención de fallos, orientada a reducir su probabilidad a través de márgenes de diseño, selección de materiales, componentes de alta fiabilidad y control de calidad. Estos principios se enmarcan en normas técnicas y buenas prácticas reconocidas internacionalmente (Sgobba, 2015).

Otro referente clave es la Cooperación Europea para la Estandarización Espacial (ECSS), establecida en 1993 para armonizar el aseguramiento de calidad en los productos espaciales. Actualmente reúne a Eurospace, agencias y entidades de países como Alemania, Países Bajos, Noruega, Italia y Reino Unido (Sgobba, 2015; ECSS, s. f.).

En conjunto, la seguridad de las misiones espaciales experimenta una evolución acelerada impulsada por la creciente complejidad de las operaciones. Las principales tendencias incluyen la gestión proactiva del riesgo, la cooperación internacional para consolidar normas globales, el uso de tecnologías avanzadas para monitoreo y planificación, y un mayor énfasis en la sostenibilidad orientada a mitigar escombros y preservar el entorno espacial. Para enfrentar estos retos se requieren acciones prioritarias como fortalecer alianzas público-privadas, invertir en investigación y desarrollo, consolidar un marco regulador sólido y capacitar talento especializado.

El futuro de la exploración y explotación espacial depende, en consecuencia, de un marco integral de seguridad operacional que combine cooperación internacional, innovación tecnológica y compromiso de la industria privada. Solo mediante protocolos claros y colaboración global será posible garantizar operaciones seguras y sostenibles, protegiendo el entorno espacial para las generaciones futuras.

Conclusiones

Desde el lanzamiento del Sputnik I en 1957, la tecnología y el alcance de las misiones espaciales han evolucionado significativamente. Estas misiones, concebidas como un conjunto de actividades dirigidas a un objetivo específico en el contexto espacial, requieren de protocolos de seguridad sólidos que minimicen riesgos y garanticen su ejecución eficaz.

La seguridad operacional se consolida, por tanto, como un pilar fundamental en el desarrollo de programas espaciales. Los resultados de esta revisión sistemática evidencian que la categorización de misiones según su propósito —ciencia, aplicaciones y desarrollo tecnológico— permite identificar con mayor precisión riesgos y necesidades, lo que facilita la implementación de medidas de control y mitigación.

Asimismo, la reglamentación internacional en materia de seguridad espacial se encuentra en permanente construcción, impulsada por nuevos escenarios como el turismo espacial, el uso de vehículos no tripulados y la creciente relevancia de la gestión del tráfico espacial (STM). No obstante, persiste la falta de un marco unificado que integre los múltiples instrumentos normativos vigentes y que atienda de manera eficaz la congestión en órbita baja y la acumulación de escombros espaciales, desafíos reconocidos desde la década de 1980.

Los hallazgos también destacan la necesidad de fortalecer la cooperación internacional para consolidar un sistema global que regule el STM y permita la mitigación de residuos orbitales. Iniciativas como las directrices del UNCOPUOS, la norma técnica ISO 24113 y los lineamientos del IADC representan pasos relevantes, pero insuficientes frente a la magnitud del reto. De igual forma, la protección planetaria y la prevención de riesgos biológicos o impactos de asteroides requieren sistemas de predicción y respuesta coordinados, como los impulsados por COSPAR, la IAWN y el SMPAG.

En conjunto, los documentos revisados subrayan la importancia de garantizar que las misiones espaciales sean seguras, sostenibles y transparentes, desde las operaciones en tierra hasta las misiones tripuladas. La magnitud del riesgo, considerablemente mayor que en la aviación comercial, obliga a robustecer los marcos regulatorios y técnicos.

En el contexto nacional, los primeros avances de Colombia, como la operación del FACSAT-2 y las investigaciones lideradas por la EPFAC junto con la Maestría en Seguridad Operacional, marcan un punto de partida valioso. Iniciativas como la identificación de peligros en lanzamientos, el uso de

globos estratosféricos y el diseño de un programa de prevención de accidentes espaciales constituyen una base sólida para la futura normatividad nacional en seguridad operacional espacial.

En síntesis, el futuro de la exploración y explotación espacial depende de la consolidación de un marco integral de seguridad operacional, que combine cooperación internacional, innovación tecnológica y regulación efectiva. Solo a través de estos esfuerzos coordinados será posible garantizar un entorno espacial seguro, sostenible y asequible para las próximas generaciones.

Referencias bibliográficas

- 51 U.S.C. (2010a). 14 CFR Part 460—Human Space Flight Requirements. <https://www.ecfr.gov/current/title-14/part-460>
- 51 U.S.C. (2010b). NATIONAL AND COMMERCIAL SPACE PROGRAMS. <https://uscode.house.gov/view.xhtml?path=/prelim@title51yedition=prelim>
- Abou Yehia, J., y Schrogl, K.-U. (2010). European regulation for private human spaceflight in the context of space traffic management. *Acta Astronáutica*, 66(11-12), 1618-1624. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2009.10.024>
- Adimurthy, V., Prasad, M. Y. S., y Shivakumar, S. K. (2007). Space mission planning and operations. *Current Science*, 93(12), 1791-1811.
- Akgun, I., Cukurtepe, H., y Ince, F. (2007). Space Traffic Management System: Challenges and prospects. *Proc. Int. Conf. Recent Adv. Space Technol.*, RAST, 97-102. <https://doi.org/10.1109/RAST.2007.4284107>
- Antoni, N., Giannopapa, C., y Schrogl, K.-U. (2020). Legal and Policy Perspectives on Civil–Military Cooperation for the Establishment of Space Traffic Management. *Space Policy*, 53.
- Bordi, F., y Scolese, C. J. (2018). A new approach to mission classification and risk management for NASA space flight missions. *Proc. Int. Astronaut. Congr.*, IAC, 2018-October.
- Buzzo, G., Travascio, L., y Vozella, A. (2024). Commercial space-flight: Regulatory framework assessment and safety perspectives.

- Journal of Space Safety Engineering, 11(2), 326–334. <https://doi.org/10.1016/j.jsse.2024.04.004>
- Chernykh, I. (2018). International legal aspects on sustainable development of outer space activities: Combine Safety and Effectiveness in the long-term. Proc. Int. Astronaut. Congr., IAC, 2018-October.
- Commercial Space Transportation | Federal Aviation Administration. (s. f.). Recuperado 27 de junio de 2023, de <https://www.faa.gov/space>
- CONFERS. (2022). CONFERS Recommended Design and Operational Practices. <https://satelliteconfers.org/publications/>
- COPUOS. (s. f.). Recuperado 17 de octubre de 2023, de <https://www.unoosa.org/oosa/en/ourwork/copuos/index.html>
- Coustenis, A., Hedman, N., Doran, P. T., Al Shehhi, O., Ammannito, E., Fujimoto, M., Grasset, O., Groen, F., Hayes, A. G., Ilyin, V., Kumar, K. P., Morisset, C.-E., Mustin, C., Olsson-Francis, K., Peng, J., Prieto-Ballesteros, O., Raulin, F., Rettberg, P., Sinibaldi, S., Zaitsev, M. (2023). Planetary protection: An international concern and responsibility. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 10. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fspas.2023.1172546>
- Coustenis, A., Hedman, N., Doran, P. T., Al Shehhi, O., Ammannito, E., Fujimoto, M., Grasset, O., Groen, F., Hayes, A., Ilyin, V., Kumar, K. P., Morisset, C.-E., Mustin, C., Olsson-Francis, K., Peng, J., Prieto Ballesteros, O., Raulin, F., Rettberg, P., Sinibaldi, S., Zaitsev, M. (2023). Planetary protection: Updates and challenges for sustainable space exploration. *Acta Astronautica*. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2023.02.035>
- Daliedonne, S. (2021). International environmental law and environmentally harmful space activities: Learning from the past for a more sustainable future. *Journal of Property, Planning and Environmental Law*, 13(2), 139-151. <https://doi.org/10.1108/JPEL-09-2020-0040>
- ECSS. (s. f.). Members | European Cooperation for Space Standardization. Recuperado 24 de octubre de 2023, de <https://ecss.nl/organization/members/>
- Finkleman, D. (2010). Space situational awareness and space traffic management standardization. En *Space Safety Regulations and Standards* pp. 137-145). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-1-85617-752-8.10012-1>

- Frandsen, H. O. (2022). Looking for the Rules-of-the-Road of Outer Space: A search for basic traffic rules in treaties, guidelines and standards. *Journal of Space Safety Engineering*, 9(2), 231-238. <https://doi.org/10.1016/j.jsse.2022.02.002>
- Giannopapa, C., y Antoni, N. (2023). Space traffic management and its dual use: Space security strategies and cooperation in Europe. *Acta Astronautica*, 212, 41–47. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2023.01.038>
- Gleason, M. P. (2020). Establishing space traffic management standards, guidelines and best practices. *Journal of Space Safety Engineering*, 7(3), 426-431. <https://doi.org/10.1016/j.jsse.2020.06.005>
- Hitchens, T. (2019). Space traffic management: U.S. military considerations for the future. *Journal of Space Safety Engineering*, 6(2), 108-112. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.jsse.2019.04.003>
- IAASS. (2018). IAASS-SSI-1700 Commercial Human-Rated System (SAE Technical Paper WP-0011). SAE International. <https://doi.org/10.4271/WP-0011>
- ICAO Space Programme. (s. f.). Recuperado 27 de junio de 2023, de <https://www.icao.int/airnavigation/AeroSPACE-Transport/Pages/default.aspx>
- Isaji, M., Maynard, I., y Chudoba, B. (2018). Surface access architecture modeling: Trend analysis and classification from a lander database. 2018 AIAA SPACE and Astronautics Forum and Exposition. Scopus. <https://doi.org/10.2514/6.2018-5131>
- ISO. (2022, abril 12). Space systems — Space debris mitigation requirements. ISO. <https://www.iso.org/standard/72383.html>
- Jamschon Mac Garry, L., Albrecht, R., y Camacho-Lara, S. (2024). Diplomatic, geopolitical and economic consequences of an impending asteroid threat. *Acta Astronautica*, 214, 496–504. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2023.10.052>
- Kołodziejczyk, A. M., Harasymczuk, M., Kołodziejczyk, A. M., y Harasymczuk, M. (2022). Educational and Scientific Analog Space Missions. En *Lunar Science—Habitat and Humans*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.101392>
- Kurkcü, C., Erhan, H., y Umut, S. (2011). Unmanned aerial systems' near-space operation concept. *RAST - Proc. Int. Conf. Recent Adv. Space Technol.*, 17-22. <https://doi.org/10.1109/RAST.2011.5966815>

- Lemmens, S., y Letizia, F. (2020). Space Traffic Management Through Environment Capacity. En *Handb. Of Space Security: Policies, Applications and Programs: Second Edition* (pp. 845-864). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-23210-8_109
- Long J. y Zhang O. (2024) Pillars of space traffic management in the era of LEO mega-constellations: A global perspective, *Advances in Space Research*, Volume 74, Issue 2, 2024, Pages 800-816, ISSN 0273-1177, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.04.011>.(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117724003430>)
- Maclay, T., Everetts, W., y Engelhardt, D. (2021). Responsible satellite design and operational practices: A critical component of effective space environment management (SEM). *Journal of Space Safety Engineering*, 8(2), 150-154. <https://doi.org/10.1016/j.jsse.2021.02.005>
- Maclay, T., y McKnight, D. (2021). Space environment management: Framing the objective and setting priorities for controlling orbital debris risk. *Journal of Space Safety Engineering*, 8(1), 93-97. <https://doi.org/10.1016/j.jsse.2020.11.002>
- Manfletti, C., Guimarães, M., y Soares, C. (2023). AI for space traffic management. *Journal of Space Safety Engineering*, 10(4), 495–504. <https://doi.org/10.1016/j.jsse.2023.08.007>
- Martin, A.-S., y Freeland, S. (2021). The Advent of Artificial Intelligence in Space Activities: New Legal Challenges. *Space Policy*, 55. <https://doi.org/10.1016/j.spacepol.2020.101408>
- McKnight, D. (2019). A practical perspective on Space Traffic Management. *Journal of Space Safety Engineering*, 6(2), 101-107. <https://doi.org/10.1016/j.jsse.2019.03.001>
- Nikulainen, M., y Tonicello, F. (2021). Utilization of COTS in ESA Missions.
- Oltrogge, D. L., y Christensen, I. A. (2020). Space governance in the new space era. *Journal of Space Safety Engineering*, 7(3), 432-438. <https://doi.org/10.1016/j.jsse.2020.06.003>
- Paul, J., Cefola, P., y Weeden, B. C. (2010). OPEN-SOURCE SOFTWARE SUITE FOR SPACE SITUATIONAL AWARENESS AND SPACE OBJECT CATALOG WORK. 4th ICATT, Madrid, Spain.
- Pelton, J. (2020). Space Security in the Context of Cosmic Hazards and Planetary Defense. En *Handb. Of Space Security: Policies, Applications and*

- Programs: Second Edition (pp. 1025-1041). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-23210-8_89
- Pelton, J. N. (2020). Security Concerns Related to Smallsats, Space Situational Awareness (SSA), and Space Traffic Management (STM). En *Handb. Of Small Satellites: Technology, Design, Manufacture, Applications, Economics and Regulation: With 476 Figures and 92 Tables* (pp. 827-847). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-36308-6_47
- Pelton, J. N., y Jakhu, R. S. (2010). Introduction to space safety regulations and standards. En J. N. Pelton y R. S. Jakhu (Eds.), *Space Safety Regulations and Standards* (pp. xli-xliv). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-1-85617-752-8.10036-4>
- Pelton, J., Sgobba, T., y Trujillo, M. (2020). Space Safety. En *Handb. Of Space Security: Policies, Applications and Programs: Second Edition* (p. 265-298). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-23210-8_50
- Presidential Memoranda. (2018). Space Policy Directive-3, National Space Traffic Management Policy – The White House. <https://trumpwhitehouse.archives.gov/presidential-actions/space-policy-directive-3-national-space-traffic-management-policy/>
- Seal, D. (2017). NASA's current initiative to improve operations planning. *IEEE Aerosp. Conf. Proc. IEEE Aerospace Conference Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/AERO.2017.7943823>
- Sgobba, T. (2015). Proposal for Organizing Industrial Cooperation on Commercial Space Safety and Technical Standards. *Journal of Space Safety Engineering*, 2(1), 23-30. [https://doi.org/10.1016/S2468-8967\(16\)30036-2](https://doi.org/10.1016/S2468-8967(16)30036-2)
- Shivers, C. H. (2010). NASA space safety standards and procedures for human-rating requirements. En *Space Safety Regulations and Standards* (pp. 3-15). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-1-85617-752-8.10001-7>
- Skinner, M. A. (2020). Small Satellites and Their Challenges to Space Situational Awareness (SSA) and Space Traffic Management (STM). En *Handb. Of Small Satellites: Technology, Design, Manufacture, Applications, Economics and Regulation: With 476 Figures and 92 Tables* (pp. 1373-1386). Springer International Publishing; https://doi.org/10.1007/978-3-030-36308-6_75

- Skinner, M. A., Jah, M. K., McKnight, D., Howard, D., Murakami, D., y Schrogl, K.-U. (2019). Results of the international association for the advancement of space safety space traffic management working group. *Journal of Space Safety Engineering*, 6(2), 88-91. <https://doi.org/10.1016/j.jsse.2019.05.002>
- Skinner, M. A., Oltrogge, D., Strah, M., Rovetto, R. J., Lacroix, A., Kumar, A. K. A., Grattan, K., Francillout, L., y Alonso, I. (2022). Space traffic management terminology. *Journal of Space Safety Engineering*, 9(4), 644-648. <https://doi.org/10.1016/j.jsse.2022.09.001>
- Thangavel, K., Gardi, A., Hilton, S., Afful, A. M., y Sabatini, R. (2021). TOWARDS MULTI-DOMAIN TRAFFIC MANAGEMENT. *Proc. Int. Astronaut. Congr., IAC, D3*. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85124805911ypartnerID=40ymd5=03d86d5e416803ace6f27a1bdb204e1d>
- United States Space Force. (s. f.). (2019) History. Recuperado 24 de mayo de 2023, de <https://www.spaceforce.mil/About-Us/About-Space-Force/History/>
- United States Space Force. (2020). Space Operations: Joint Publication 3-14. https://www.jcs.mil/Portals/36/Documents/Doctrine/pubs/jp3_14Ch1.pdf
- UNOOSA. (2018). A/AC.105/2018/CRP.20—Guidelines for the Long-term Sustainability of Outer Space Activities. https://www.unoosa.org/oosa/oosadoc/data/documents/2018/aac.1052018crp/aac.1052018crp.20_0.html
- Wittmann, K., Hallmann, W., y Hanowski, N. (2009). Introduction. En *Handbook of Space Technology* (pp. 1-30). John Wiley y Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9780470742433.ch1>

CAPÍTULO 6.

Planeación Logística para el Desarrollo Espacial^{32*}

MY. Jennifer Astrid Duarte Alarcón³³

Yeisson Alexis Rincón Cuta³⁴

Escuela de Postgrados de la Fuerza Aeroespacial Colombiana

Resumen: El desarrollo estratégico de la logística espacial enmarcada en el desarrollo del sector económico para Colombia como país emergente, requiere validar las condiciones estratégicas para el desarrollo de capacidades alineadas con el marco normativo en el que se ha comprometido el País. Uno de los aportes reales a la planificación logística está en la proyección de los objetivos a plantearse en el desarrollo del sector logístico espacial. Resaltar los objetivos de cada uno de los ejes temáticos de la logística aeronáutica, visibiliza la necesidad de articular las capacidades productivas del sector aéreo con el sector espacial, para la proyección de las actividades de abastecimiento, distribución, transporte, almacenamiento, en atención a las operaciones espaciales que se derivan de la misionalidad institucional. La revisión documental y científica entorno al desarrollo de capacidades y la

32* Capítulo de libro resultado del proyecto de investigación “Desarrollo Espacial en Colombia y aportes de la Fuerza Aeroespacial Colombiana”, del Grupo de Investigación en Ciencias Militares y Aeronáuticas (GICMA) de la Fuerza Aeroespacial Colombiana, categorizado en A por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (Minciencias) y registrado con el código COL140489. Los puntos de vista y los resultados de este capítulo pertenecen a los autores y no reflejan necesariamente los de las instituciones participantes.

33 Profesional de las armas. Magíster en Recursos Digitales aplicados a la Educación (Universidad de Cartagena de Colombia). Licenciada en Educación Básica en Recreación y Deporte (Universidad de Cundinamarca). Investigadora de estrategias metodológicas aplicadas y filosofías de mejoramiento continuo aplicado en logística aeronáutica. Rectora de Institución Educativa del sector defensa, Directora de Programa de Maestría en Logística Aeronáutica (Escuela de Postgrados de la FAC) y exgerente de ruta para el Instituto de Recreación y Deporte de Bogotá. Código ORCID: 0009-0002-1194-7358. Contacto: jennifer.duarte@epfac.edu.co.

34 Candidato a Doctor en Ingeniería de la Universidad Tecnológica (México). Magíster en Sistemas integrados de gestión de Calidad, Ambiente, Seguridad y salud en el trabajo y responsabilidad social empresarial de la Universidad Internacional de la Rioja (Logroño – España), Especialista en Formulación y Evaluación Social y económica de proyectos e ingeniero industrial de la Universidad Católica de Colombia. Docente e investigador de la Escuela de Postgrados de la Fuerza Aeroespacial Colombiana en el programa de Logística Aeronáutica. Código ORCID: 0000-0002-5086-3985. Contacto: ingeniero.alexisrincon@gmail.com; yeisson.rinconc@epfac.edu.co.

idónea planificación logística de países como Argentina y Brasil, aunado con el análisis de productos y servicios patentados para el sector espacial, permite fundamentar la debilidad de las condiciones actuales y plantear estrategias para el desarrollo espacial, desde una perspectiva logística planificar las actividades en el sector económico aeroespacial, lo que permitirá alinear adecuadamente la proyección institucional de la Fuerza Aeroespacial Colombiana con la “Política de Reindustrialización, hacia una economía del conocimiento, incluyente y sostenible” establecida por el Gobierno Nacional de Colombia para la vigencia 2022 – 2026.

Palabras clave: Operaciones logísticas, misiones espaciales, sector espacial, logística aeronáutica, planeación.

Estudio del sector espacial desde la perspectiva logística y de capacidades

Para el desarrollo del capítulo, se debe partir de la base que fundamenta el estado del arte, la identificación de brechas y el planteamiento de la hoja de ruta logística como eje de desarrollo industrial para el sector productivo espacial en Colombia. Se debe resaltar que el “espacio” dejó de ser un esfuerzo exclusivamente gubernamental para convertirse en un sistema productivo; la frontera final es desconocida, sin embargo, expresa altos niveles de exigencia para articular tanto la investigación, como el desarrollo de manufactura avanzada. Requiriendo así desarrollar soluciones y capacidades orientadas a la atención de necesidades como software especializado para el procesamiento y analítica de datos, al igual que servicios de soporte habilitados de acuerdo con la misión a desarrollar.

En la investigación realizada desde el proyecto **Herramientas de gestión para la logística aeronáutica** realizado por el programa de Maestría en Logística Aeronáutica (MAELA), el cual, generó la publicación de artículos orientados a la gestión por capacidades y el libro titulado Metodologías aplicadas a la gestión de la logística aeronáutica de (Rincon, Rincon, & Hoyos, 2024), en el que, se aborda el cómo configurar la gestión por capacidades para una organización mantenedora, sin embargo, proyectar la gestión logística para un sector espacial, requiere del análisis preliminar de las capacidades ya existentes en el sector y el cómo orientar los esfuerzos para que un país como Colombia pueda orientar sus limitados recursos económicos, y explotar todo su potencial humano, técnico, tecnológico, geoestratégico, entre otros

abordados en los diferentes capítulos de este libro. Por lo que estudiar desde la base de las buenas prácticas y recomendaciones de organizaciones internacionales y las publicaciones patentadas, es un inicio en la investigación hacia la consolidación del análisis para el desarrollo de capacidades logísticas.

Consolidar el ciclo de vida del negocio espacial con base en estándares de clase mundial, permite establecer parámetros, criterios de decisión, políticas, metas y un plan de trabajo basado en buenas prácticas. Lo primero que se debe expresar en términos logísticos, es la definición del propósito del negocio, que dentro de la experiencia mundial se pueden extraer bases desde la iniciativa de Cooperación Europea para la Normalización Espacial (ECSS), la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OECD), la Oficina de las Naciones Unidas para Asuntos del Espacio Ultraterrestre (UNOOSA), la Agencia Espacial Europea (AEE / EAS), Instituto Europeo de Política Espacial (ESPI), la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA), entre otras organizaciones “la mayoría” civiles como la Organización de estándares internacionales (ISO); las cuales, logran consolidar recomendaciones y buenas prácticas basadas en datos, sustentado a través del desarrollo de productos como patentes de productos y servicios relacionados con el espacio (OECD, 2024, pág. 146). Conforme a lo anterior, se han creado otras instituciones desde diferentes perspectivas, alineándose con las organizaciones previamente relacionadas, y que aportan desde lo táctico u operativo.

Los acuerdos ARTEMIS firmados por Colombia y la NASA en donde se consolidó la adhesión del país a partir del 10 de mayo de 2022, conllevó al acceso de datos científicos sobre futuras exploraciones. Colombia tiene la posibilidad de participar en el programa ARTEMIS, generando la necesidad de estructurar una propuesta de investigación y desarrollo que contribuya al esfuerzo de exploración y asentamiento lunar, como preámbulo de misiones posteriores a Marte. Con este propósito, se crea la Comisión Colombiana del Espacio (CCE)³⁵ y la Política de Desarrollo Espacial consolidado en la (Política de desarrollo espacial: condiciones habilitantes para el impulso de la competitividad nacional, 2020), en el esta, se establecieron como antecedentes enfocados a las debilidades y oportunidades enfocadas al sector:

35 Creada por el Decreto 2442 de 2006

Tabla 1. Debilidades y Oportunidades de Colombia

Debilidades	Oportunidades
Ausencia de una visión estratégica de largo plazo basada en productos tangibles en el sector espacial.	Establecer una visión de largo plazo eficiente y productiva en la política para el desarrollo espacial.
Barreras a las iniciativas privadas basadas en tecnologías espaciales.	Resolver las barreras de entrada a las iniciativas que contribuyan a la productividad, diversificación y sofisticación del aparato productivo del país
Débil entorno institucional para la articulación entre instancias y actores.	Generar un entorno institucional que promueva la articulación entre actores e instancias y la eficiencia del gasto en servicios satelitales.

Fuente: elaborado por el autor, análisis realizado a la política del desarrollo espacial y del (CONPES, 2020).

En el caso de la OCDE, se caracteriza la economía espacial como un conjunto de actividades que habilitan infraestructura crítica en la Tierra, estableciendo el propósito de las primeras capacidades orientadas a la observación, la navegación y las comunicaciones. Focalizando la inversión pública y privada en países que, pese a la volatilidad macroeconómica, confían en las potencialidades asociadas de las actividades del sector, así como del nivel de madurez que estas están alcanzando (OECD, 2024) orientando las políticas para el desarrollo del sector espacial, contribuyendo al desarrollo económico, tecnológico y ambiental.

En términos logísticos y aplicados a Colombia, se requiere del estudio y el análisis de capacidades en países que al igual que Colombia tienen como referencia su posición geográfica, así como a los alcances tecnológicos y económicos del país. De las estrategias generales como la producción de nuevos materiales, articulación civil-militar, desarrollo de capacidades y competencias humanas, se evalúa la transferencia del conocimiento para el desarrollo del sector espacial. Las líneas específicas para el desarrollo de capacidades de observación, comunicación y navegación para usos civiles y militares que (Barrero-Barrero & Baquero-Valdés, 2022) sintetizan y que asocian con entidades responsables en Colombia, consolidan parte del entorno institucional para la articulación entre actores e instancias y la eficiencia del gasto en servicios satelitales, ahora la tarea es el desarrollo de capacidades del

sector privado. Por lo tanto, las estrategias deben estar orientadas a gestionar las barreras de entrada a la iniciativa que contribuyan a la productividad, diversificación y sofisticación del aparato productivo del país. De acuerdo con el (OECD, 2024, p. 22) se establecen los perímetros principales del sector, su clasificación depende de los niveles en que el país este dispuesto a participar dentro de la cadena de suministro, A continuación, se describen los tres niveles (Ups-Mid-Dow), estableciendo que existen servicios transversales relacionados en la Tabla 17, la cual delimita el alcance en términos de flujo de materiales, información y valor:

- **Upstream:** Investigación, desarrollo y fabricación de satélites, lanzadores y subsistemas, como ejemplo actual es el FACSAT-1 (Portilla Barbosa & Murcia Piñeros, 2021) y 2 (Rincón Urbina et al., 2023), proyectos UNAL en antenas y baterías espaciales (Satélites colombianos en el espacio, 2025).
- **Midstream:** infraestructura espacial y la prestación de servicios terrestres basados en señales o datos satelitales como estaciones TT&C, control de misión, gestión del espectro, el ejemplo actual está en la FAC para control de FACSAT (Fuerza Aérea Colombiana, 2022), ANE en asignación de frecuencias.
- **Downstream:** la prestación de servicios derivados de datos satelitales: aplicaciones en agricultura, monitoreo ambiental, seguridad, IoT satelital, como ejemplo se encuentran startups que usan imágenes de FACSAT-2.

Con lo anterior, se configura la plataforma para consolidar el marco orientado al desarrollo de capacidades en el sector económico espacial de Colombia, delimitando el alcance logístico, conllevando al estudio de productos y procesos por nivel y bajo las clases sugeridas en el catálogo internacional de patentes, con lo cual, los productos de la gestión de la cadena de suministro espacial, parten del aporte real en el sector, y conforme a lo establecido en los niveles de preparación tecnológica (TRL) como se aborda en la Tabla 2.

Tabla 2. Análisis de capacidades y brechas en Colombia

Nivel SCM	Subsegmento	Capacidades / experiencias existentes	Brechas logístico-industriales	Palancas de política / compra
Upstream	Electrónica espacial (COTS “Space-grade”, Sistema de Armeses, PCBA)	Capacidades electrónicas y sistemas de monitoreo duales (aeronáutico/defensa) transferibles	Certificación ECSS (Q/ST-20, -60) y ensayos ambientales (vibro acústico, T-VAC) faltantes localmente.	Programas de desarrollo de proveedores con ECSS; convenios de ensayo con laboratorios regionales.
	Estructuras y compuestos	Industrias de materiales y mecanizados de precisión	Calificación de procesos (soldadura, bonding, outgassing, EEE parts)	Incentivos a inversiones de largo plazo en pruebas y calificación de procesos ECSS
	Software embebido / FPGA / ASIC	Talento en software seguro (aéreo / defensa)	Estándares ECSS-E-ST-20-40 y Q-ST-60-03 para ASIC/FPGA; toolchains y verificación	Laboratorios con flujos de verificación y revisión de diseño bajo ECSS
	Integración y pruebas	Experiencias universitarias y de prototipado; estudios de lanzamiento	Infraestructura de entrenamiento y campo de pruebas inexistente; aseguramiento de producto	PPP para centro entrenamiento avanzado nacional; acuerdos con zonas de seguridad en aeropuertos
Midstream	Segmento terreno, antenas, RF	Experiencia en la recepción NOAA / EO en universidades; redes GNSS	Escalabilidad, continuidad de servicio, ciberseguridad	Adquisición pública de estaciones de tierra y NMS con SLA
Downstream	Observación terrestre / Geo analíticas	Alta demanda pública (gestión del territorio, ambiente, agro, riesgos)	Escaso producto - market fit y falta de portafolios sectoriales	Compras públicas de analítica como servicio con catálogos de casos de uso
Transversal	Estándares y QA	Cultura aeronáutica/ISO 9100/9110	Migración a ECSS y auditorías de proveedores	Programa nacional de adopción ECSS (ECSS-Q-ST-20, -70, -80)

Fuente: adaptado por el autor de (ECSS-Q-ST-60-03C – ASIC, FPGA and IP Core product assurance, 2023), (Technology readiness level (TRL) guidelines, 2017), (ECSS-Q-ST-60-03C, 2023) y (ECSS-Q-ST-20C Rev.2 DIR1, 2016)

En respuesta a la exigencia de las cadenas de suministro resilientes, sostenibles y seguras, se abordó el análisis de desarrollo de Colombia, en donde el primer esfuerzo político consolidó la Comisión Colombiana del Espacio (CCE), la cual fue creada por el Decreto 2442 de 2006 y soportada por el (Consejo Nacional de Política Económica y Social, 2020) con el CONPES 3983 del 13 de enero de 2020. Con el propósito de consolidar la política de desarrollo espacial, a través de las condiciones habilitantes para el impulso de la competitividad nacional, conllevó a constituir la base institucional para transitar de usuario de datos a productor de soluciones y componentes; así mismo, limitando la explotación por concepto de soberanía con base en el artículo II del Tratado del Espacio Exterior, del cual, Colombia está jurídicamente vinculada y ratificada por el (U.S. DEPARTMENT OF STATE, 2024) a partir del 21 de marzo. Alineado con lo anterior, Colombia es parte del sector comercial espacial, el cual no se centra en los elementos jurídicos de suelo, subsuelo, aire y mar; conllevando a alinearse con el derecho espacial público, considerado como la primera condición habilitante para atraer inversión, cooperación y certificación internacional de proveedores. Razón que motivo el (Decreto 2442 de 2006, 2006), el CONPES 2983, entre otros.

Las tendencias globales abordadas en el estudio, sustentan la expansión del sector privado, la verticalización parcial de integradores dominantes, la modularización de nichos de negocio, abriendo las puertas desde diferentes frentes técnicos y comerciales para el desarrollo de industria certificada en electrónica, mecánica, civil, arquitectura, informática, de software, para soportar la gestión y el control de estructuras, arneses, software embebido, pruebas y servicios como el análisis de datos del espacio exterior, entre muchos otros como también incluye, la fabricación de equipos como receptores, antenas de recepción de señal, etc. así como, de servicios transversales como: estandarización, certificación, aseguramiento de calidad, formación y financiación. Lo que promete ser un mercado más amplio y con menor exigencia de requisitos en cuanto inversión, en comparación con el Upstream (OECD, 2024, p. 83).

La cadena de valor del sector espacial en Colombia se diferencia por regiones y el nivel de madurez de los parques tecnológicos y clústeres aeroespaciales (Morante Granobles et al., 2021), así mismo, se apoya en capacidades locales e identifica una serie de oportunidades para el cierre de brechas normativas, tecnológicas, de capital humano y de certificación. La hoja de ruta se encuentra enmarcada en la logística integrada con el enfoque industrial, la cual está basada en las compras públicas, y en las estrategias de articulación

universidad e industria, entorno a las buenas prácticas que se evalúan para obtener certificaciones sobre estándares internacionales. La gran problemática se encuentra en los recursos para la investigación y desarrollo (I + D). En síntesis, el sector espacial es una carrera de los países que quieren aprovechar las oportunidades de consolidar un nuevo ciclo económico, así como, garantizar beneficios para las partes interesadas del sector de forma directa e indirecta, en este sentido ahondar en países como:

- Argentina que a través de sus políticas promovió la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE), acompañado de iniciativas como la sociedad Satélites de Aplicaciones Científicas – Espacial (INVAP), y la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA).
- Brasil que a través de sus políticas creó la Agencia Espacial Brasileña (AEB), como el órgano responsable de formular, coordinar y ejecutar la Política Espacial, la cual se basa en la operación del Centro de Lanzamiento de Alcântara (CLA) y la base de lanzamiento de Barreira do Inferno.

Por las capacidades relacionadas, estos países lideran desde la integración satelital, ensayos y misiones. En el caso de Argentina con el sistema de dos satélites de observación terrestre de la agencia espacial de Argentina (SAOCOM), demostrando que fábricas de componentes y centros de pruebas, pueden ser viables en países latinoamericanos si se combinan la política industrial, la demanda pública y las normas técnicas (de Oliveira Matos, 2025). Con lo que el desarrollo de la **estructura productiva** de Argentina y Brasil permiten estudiar las lecciones aprendidas y buenas prácticas que pueden ser transferibles a otros países con las mismas aspiraciones. En términos académicos se ha fundamentado la evolución heterogénea de programas espaciales sudamericanos (Dallamuta, Perondi & Rocha de Oliveira, 2023), recomendando la estrategia de cooperación para nivelar la capacidad y las economías de escala. En complemento de la Tabla 2. Análisis de capacidades y brechas en Colombia, se abordan hallazgos aplicables a la industria de un país emergente como Colombia, en términos de industrialización por sector y operación a certificarse, se evidencian la falta de apalancamiento de la demanda pública como impulsor para el sector, la incertidumbre en el valor percibido por usuarios finales, la resiliencia empresarial para la sostenibilidad de las cadenas de suministro, los parques industriales y clústeres aeroespaciales. Conllevando al análisis de brechas principales en Colombia.

Brecha 1: Integración entre Autoridades de estado y civil para el desarrollo del sector aeronáutico, debilitando los procesos de licenciamiento, registro, seguros y la mitigación de desechos como se consolida en los acuerdos

internacionales relativos a las actividades en el espacio ultraterrestre (UNOOSA.org, 2025)

Brecha 2: Escasa adopción de certificación bajo estándares internacionales como ECSS, FAA, entre otros, en pymes proveedoras como lo aborda la (European Cooperation for space standarization, 2016)

Brecha 3: Integración regional para atender insuficiencias de capacidad interna, a través de acuerdos que permitan sostener un plan de desarrollo, el cual, permita la planificación logística de los proveedores en las diferentes capas de sector, así como de proyectos tecnológicos complejos, en: Industria energética con fuentes renovables y alternativas, Sector biomédico, sistema de salud y pruebas médicas, comunicaciones terrestres y ultra espaciales, y para el diseño y construcción de sistemas espaciales. (European cooperation for space standarization, 2017)

Brecha 4: Desarrollo de capital humano para sostener la ingeniería de producto espacial y programas de soporte logístico.

Determinar que brecha es más importante o prioritaria para el desarrollo depende de la forma en que el gobierno desarrolle su política para incentivar el crecimiento del sector espacial, si bien las políticas son de largo plazo, estas deben tener una estructura con visión nacional e integrada con la industria privada, conllevando a planificar un proyecto que integre los propósitos de crecimiento y cierre de brechas, soportado en estándares y buenas prácticas que deben soportarse en una estructura escalonada, como por ejemplo: aplicando las normas Q-ST-20, para luego Q-ST-70/80, E-ST-20-40/Q-ST-60-03, y con ello permitiendo el desarrollo de circuitos integrados para aplicaciones específicas (ASIC) y circuitos integrados de semiconductores (FPGA). Lo anterior acompañado con auditorías, inspecciones y acompañamiento en la precalificación de proveedores del sector espacial.

Como resumen del estado del arte, los diferentes expertos aportan sus criterios para el desarrollo de la cadena de suministro en países como Colombia, partiendo de la capa Upstream, se documentaron los productos y procesos clave para las plataformas de satélites pequeños también llamados CubeSat, los cuales, la Fuerza Aeroespacial Colombiana ya realizó dos misiones apoyadas desde el **diseño de FACSAT 1 y 2** (Rincón et al., 2023), este último documenta la integración de doble carga útil, como la observación espacial y el espectrómetro; y las compensaciones entre el costo y la vida útil, aportando base metodológica replicable para universidades y pymes locales, provenientes de las siguientes alternativas:

- Diseño e integración de Ensamblaje, Integración y Pruebas (AIT) y Vehículos Inteligentes Autónomos (AIV).
- Electrónica de potencia.
- ADCS con star-tracker.
- Radios SDR.
- Cargas útiles EO y espectrómetros SWIR. (OECD, 2024)
- Estudio de tendencias en propulsión eléctrica. (EPO, ESPI and ESA, 2024)
- Manufactura aditiva.

Siguiendo con la capa Midstream, resaltando los productos y procesos clave como telemetría, seguimiento y control de misión (TT&C), orientadas a estaciones terrestres que conectan la red satelital, requiriéndose la aplicación de estándares del Comité Consultivo para Sistemas de Datos Espaciales (CCSDS), con lo cual desarrollar la base de interoperabilidad y servicios de red, partiendo de (Recommendation for Space Data System Standards, 2021), las cuales fueron acogidas y permitieron el avance de publicado por la (Agencia Nacional del Espectro, 2025) con la expedición de los permisos de estaciones terrenas, criterios y contraprestaciones bajo Resolución 376/2022.

Abordar la Innovación y propiedad intelectual (PI) en la cadena de suministro conlleva a estudiar las Tendencias de patentes, los retos jurídicos y la implicación para Colombia, con lo que priorizar el desarrollo de PI en algoritmos de procesamiento de la Capa Downstream, antenas, terminales y módulos Radio (RF) en la Capa Midstream y con el desarrollo de los CubeSat; debe planear la protección de los desarrollos futuros, producto de una política nacional. Se listan las alternativas de productos con alta probabilidad de ser patentables por eslabón en Colombia, los cuales se orientan principalmente en:

- Estructuras fijas y desplegables para satélites CubeSat de 3 a 12 Unidades, bajo parámetros del Sistema de determinación y control de actitud de sensores estelares de bajo costo.
- Suministro de energía de emergencia (EPS), a través de baterías optimizadas para órbita terrestre baja (LEO) (Rincón et al., 2023).

- Antenas de matriz en fase para servicios de órbita no geoestacionaria (NGSO)

Clases de productos patentados que afectan la decisión de producir o abastecer

Para el desarrollo de la planeación logística, se aborda la necesidad de determinar que abastecer y que producir, en la actualidad y partiendo de las bases de datos de patentes como las del Centro de Información Tecnológica y Apoyo a la Gestión de la Propiedad Industrial (CIGEPI), que hace parte de la Delegatura para la Propiedad Industrial de la Superintendencia de Industria y Comercio en Colombia, se construye la Tabla 3, con lo que se configuran los parámetros para productos y sistemas validados en entornos reales, para adoptar los productos ya patentados o tomarlos como referencia en cualquier gestión de innovación, siendo así como la planificación varía entre cada capacidad logística, como se encuentra abordada en la Figura 1, por objetivos y ejes temáticos desde la perspectiva logística.

En sinergia, pero desde una perspectiva de validación en entornos de laboratorio, operacionales relevantes, alcanzando el prototipo funcional en un entorno real, se presentan los productos y procesos de la Tabla 4, correspondientes a niveles de madurez de industria del 4, 5 y 6. Cabe resaltar la estrategia orientada a los productos con alcance transversal, los que pueden ser apoyados con la academia, los consultores y asesores, extendiéndose a servicios para el alcance de: Calidad y certificación de proveedores aéreos, detección de anomalías de telemetría en órbita, desarrollo de tecnología para gemelos digitales, la administración del ciclo de vida de satélites nacionales como los CubeSat de la FAC, siendo no menos importante la gestión de configuración y serialización. Siendo así como **Clases IPC sugeridas** cuentan con la categorización internacional de patentes y su codificación completa, se presenta en la Tabla 4. Por último, se presenta la propuesta de estudiar la función crítica, desde los componentes analíticos y experimentales para realizar pruebas de concepto, como los casos de propulsión eléctrica, magnética, iónica, entre otros innovadores aplicados al sector.

Tabla 3. *Relación de productos previamente patentados del nivel TRL 7 y 8*

TRL	Subgrupo/Producto-Proceso	Clases IPC ³⁶ sugeridas	Posibles solicitantes colombianos
7	Automatización de programación de pases multi-GS	G06F; G06Q	Pymes software; universidades
	Calidad y certificación de proveedores Aéreos y Espaciales	G05B; G06Q	Integradores; academia–industria
	Detección de anomalías en telemetría (en orbita)	G06N; G06F	Universidades; pymes IA
	Estaciones terrenas TT&C compactas	H01Q; H04B	FAC; universidades; pymes RF
	Fusión de datos satélite–dron–IoT	G06F; G06N	Pymes IoT; agrotecnología; universidades
	Gestión de configuración y serialización	G06F; G06Q	Pymes software; integradores
	Harness y conectores de grado espacial	H01R; H01B	Pymes cableado; integradores
	Modelos de programación y SLA para desastres	G06Q; G06F	Entidades públicas; operadores; pymes
	Tuberías para EO: corrección radiométrica, geométrica, nubes	G06T; G01N	Pymes analíticas; universidades; FAC
	SDR y waveforms (CCSDS, TM/TC)	H04B; H04L	Universidades; pymes software/hardware
8	Subgrupo/Producto-Proceso	Clases IPC sugeridas	Posibles solicitantes colombianos
	Catálogo STAC, tasking y APIs de ordering	G06F; G06Q	Pymes software; entidades públicas
	IA/ML para agricultura, ambiente y seguridad	G06N; G06T	Pymes IA; universidades
	Planificación espectral y homologación (procesos ANE)	H04W; H04B	FAC; operadores; consultoras

Fuente: adaptado por el autor, información tomada de repositorios de patentes.

36 Clasificación Internacional de Patentes

Con la fundamentación anterior queda abordar el análisis de la oferta, según la demanda observada desde el planteamiento de las políticas de desarrollo espacial y las condiciones habilitantes para el impulso de la competitividad nacional.

Tabla 4. *Relación de productos previamente patentados del nivel TRL 4, 5 y 6*

TRL	Subgrupo/Producto-Proceso	Clases IPC sugeridas	Posibles solicitantes colombianos
4	Front-end RF (LNA, filtros, duplexers, LNAs criogénicos livianos)	H03F; H01P; H01Q; H04B	Universidades; pymes RF; aliados internacionales
	OBC/aviónica tolerante a radiación	G06F; B64G	Universidades; pymes electrónicas
5	Subgrupo/Producto-Proceso	Clases IPC sugeridas	Posibles solicitantes colombianos
	ADCS: ruedas de reacción, magnetorquers, sensores estelares; algoritmos control	B64G 1/24; G01C; G01S	Grupos aeroespaciales universitarios; FAC
	Estructuras y mecanismos desplegables (bisagras, mástiles, paneles)	B64G; F16F; F16C; H02S	Universidades (UNAL, UAN, ITM), FAC (CEMA), SENA; pymes metalmecánicas
	Mitigación de interferencias y anti-jam	H04B 1/10; H04K	Universidades; pymes ciber-RF
	Subgrupo/Producto-Proceso	Clases IPC sugeridas	Posibles solicitantes colombianos
6	Antenas (patch arrays, reflectarray, reconfigurables)	H01Q; H04B	ITM, UNAL, UAN; pymes RF; FAC
	Ciberseguridad E2E satelital	H04L 9/; G06F	Pymes ciberseguridad; universidades
	Compresión/codificación (CCSDS; códecs avanzados)	H04N; H04B	Universidades; pymes DSP
	EPS/Power: MPPT, BMS, baterías (Li-ion, alternativas orgánicas)	H02S; H02J	UNAL; pymes energía; FAC
	Gateways HTS para NGSO y automatización	H04B; H04W; H01Q	Operadores satelitales; integradores
	Gemelos digitales y PLM para nanosatélites	G05B; G06F	Pymes software; integradores
	Manufactura aditiva y recubrimientos (lubricación seca, térmicos)	C23C; B33Y; C09D	SENA; pymes materiales; universidades
	Rotores y control de seguimiento	F16H; H01Q	Pymes mecatrónicas; universidades

Fuente: adaptado por el autor, información tomada de repositorios de patentes.

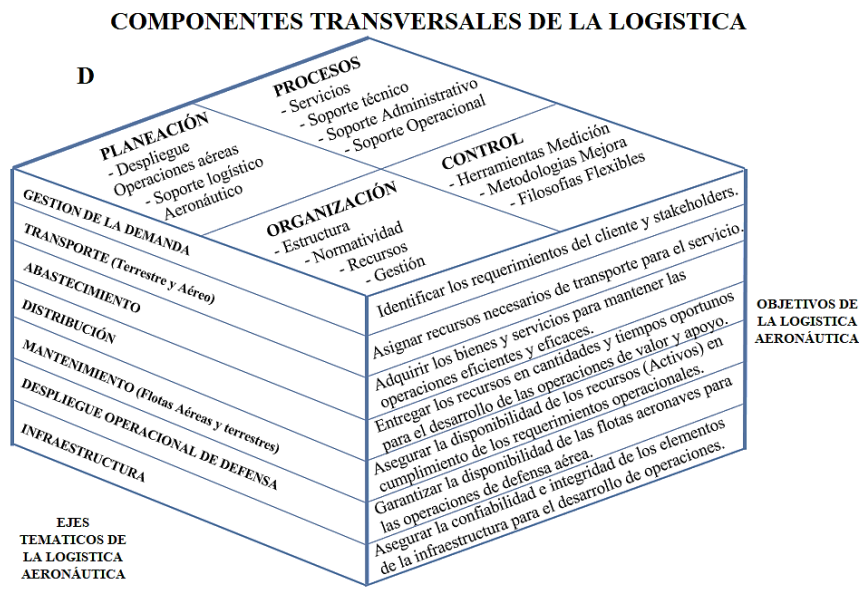
Con la fundamentación anterior queda abordar el análisis de la oferta, según la demanda observada desde el planteamiento de las políticas de desarrollo espacial y las condiciones habilitantes para el impulso de la competitividad nacional.

Demanda de operaciones logísticas para misiones espaciales

El desarrollo de cualquier sector o ciclo económico requiere satisfacer las necesidades y aspiraciones de la población que directa e indirectamente se afecta con el mismo, buscando principalmente el crecimiento en términos económicos, sociales y de bienestar, mientras asegura la sostenibilidad ambiental en el desarrollo de las operaciones de valor y de soporte en términos logísticos. (Rincon Cuta, 2024, p. 76) establece la parametrización temática para explicar la diferencia inherente de las metodologías, herramientas y objetivos requeridos para atender la demanda de las operaciones logísticas de manera efectiva; así mismo, profundiza en la necesidad de orientar todos los esfuerzos al cumplimiento de objetivos clave y resultados de acuerdo con la temática como se presenta en la Figura 1 el primer eje temático es la demanda, que tiene por objetivo identificar los requerimientos del cliente y demás stakeholders. En este punto es importante establecer que al unificar las exigencias de la demanda en un solo termino, debe entenderse que estos pueden ser basados en oportunidades de negocio o de mejora, así como, la búsqueda de la solución de un problema; por tanto, de manera introductoria se establece que, para abordar la demanda debe existir una estructura base para cada uno de los profesionales inmersos en las operaciones logísticas.

En la figura se presenta una relación de procesos de valor y soporte con las oportunidades que tiene Colombia para el desarrollo de capacidades orientadas al sector espacial, en donde, se resalta las capacidades actuales que prospectivamente pueden llegar a ser adaptadas y de las estrategias de negocio que debería ser una de las premisas del gobierno para alcanzar la meta de fortalecer el sector espacial Colombiano.

Figura 1. Objetivos generales por eje logístico temático



Fuente: tomado de Rincón Cuta, 2024.

Como se ha mencionado, se debe partir de dos elementos importantes en cada ciclo de negocio, como lo establecen (Porter, 2015) y (Martínez, 2019) con el planteamiento de procesos principales y secundarios bajo el contexto de cadena de valor logística, propendiendo a desarrollar la estructura organizacional basada en procesos. En el sector castrense, se encuentran los procesos estratégicos, operativos y tácticos, los anteriores, así como muchos otros, difieren en la selección de términos militar a civil como “táctico – operativo y misional – operativo”, pero conllevan al mismo resultado, encontrando que las metodologías como el diagrama de flujo de datos y materiales, el mapeo de flujo de valor, el lienzo CANVAS, la herramienta del BCG y el mapa estratégico del Balance Score Card, convergen en procesos de valor, es decir, los asociados directamente con el desarrollo de los productos y servicios, y los procesos de soporte que permiten a los procesos principales, alcanzar sus resultados.

La construcción de capacidades espaciales en Colombia se basa en el objetivo estratégico de “generar las condiciones habilitantes y el entorno institucional para que, con una visión de largo plazo, el sector espacial contribuya a la

productividad, la diversificación y la sofisticación del aparato productivo del país” (Departamento Nacional de Planeación, 2020).

En este marco, la Fuerza Aeroespacial Colombiana reconoce la importancia de aprovechar la ubicación geoestratégica del país y las oportunidades que de ella se derivan para impulsar el desarrollo científico, tecnológico y académico en múltiples áreas del conocimiento. Esta visión permite articular la proyección de la demanda futura del sector con la manera en que dicha demanda puede convertirse en motor del crecimiento económico nacional.

Abordar el desarrollo del sector espacial implica planificar de manera rigurosa la logística necesaria para su sostenimiento: actividades de soporte, infraestructura técnica y formación de talento especializado. Esto exige consolidar un conocimiento avanzado que permita responder a los desafíos operativos y tecnológicos propios del dominio espacial.

En consecuencia, el fortalecimiento de este sector demanda una articulación efectiva entre el Estado y la empresa privada. Solo mediante esta alianza será posible consolidar un ecosistema espacial robusto, capaz de impulsar la innovación, generar capacidades estratégicas y contribuir al desarrollo integral del país.

Conforme a la ruta planteada desde el análisis del conocimiento actual y la proyección del sector espacial, estructurar la necesidad de formalizar como estrategia la inclusión de empresas privadas de diferentes sectores industriales de manufactura y servicios de transporte, mantenimiento, metrología, asesoría, entre otras que pueden ya encontrarse establecidas dentro del portafolio de capacidades en el sector industrial. Conlleva a disminuir la presión de consolidar capacidades propias del estado, y fortalecer el ciclo económico espacial orientado a la competitividad.

Las alternativas de demanda principal en el sector espacial, se enfocan en el desarrollo de misiones relacionadas con las orbitas MEO y LEO, presentándose diferencias en las características de las plataformas de lanzamiento, sin embargo, la importancia de abordar el origen del ciclo de negocio para la logística espacial, permite proyectar el soporte transversal requerido en términos de planeación, organización, procesos y control a desarrollarse en cada eje temático para las diferentes misiones espaciales, así entonces, se requiere comprender la misión en su mayor nivel de detalle, implicando abordar los diferentes aspectos operacionales y de apoyo abordados en la Tabla 5, lo que permite impulsar las oportunidades de negocio, que tienen su origen en la planeación de la misión.

En la siguiente relación se abordan operaciones que generan valor, las cuales son parte integral del desarrollo del sector espacial, y se relaciona con una economía en desarrollo que requiere de establecer prioridades, que se articulan con los objetivos misionales de organizaciones del sector espacial en diferentes países, resumidos en:

- Desarrollo tecnológico, técnico e infraestructura.
- Desarrollo de competencias humanas
- Diseño y desarrollo operacional.

Tabla 5. *Introducción al análisis de la demanda y procesos de apoyo para el desarrollo de un sector espacial*

Operaciones		Oportunidades	
Que generan valor	De apoyo requeridas	De negocio actuales	De estrategias de negocio
Desarrollo de conocimiento especializado.	Diseño curricular. Procesos de certificación.	Carreras profesionales en ingeniería, ciencia, TI, finanzas, derecho, recursos humanos, comunicación y gestión de instalaciones	Formación técnica, tecnológica y profesional específica para sostenibilidad de capacidades.
Desarrollo Tecnológico	Fabricación de componentes Clase 3 y 4.	Fabricantes de componentes sin certificación aeronáutica. Parques tecnológicos en etapa de desarrollo, introducción y maduración en el mercado.	Impulso comercial para el desarrollo de capacidades Nacionales certificadas.
	Consolidación de incubadoras de fabricación y certificación.	Clústeres incipientes para el desarrollo de la industria.	Desarrollo ciclo económico para proveedores nacionales.
Prospectiva tecnológica y operacional	Vigilancia tecnológica permanente del sector espacial	Estudios sectoriales estatales o de Patrimonio autónomo EJ: Ministerio de defensa, Ministerio de comercio, Colombia productiva.	Desarrollo de productos innovadores y homologados con Certificado de Diseño, tipo y de producción.

Operaciones		Oportunidades	
Que generan valor	De apoyo requeridas	De negocio actuales	De estrategias de negocio
Tecnología Básica Científica	Preparación oportuna para misiones futuras conforme al plan estratégico del sector.	Desarrollo de planes emergentes.	Desarrollo de proyectos con productos tangibles. Fortalecimiento de capacidades de fabricación, a través de la experimentación. Fortalecimiento de capacidades logísticas y de suministro.
Investigación avanzada en infraestructura telemática.	Desarrollo de infraestructura y protocolos para trabajo e investigación detallado y maduración de productos innovadores.	Desarrollos individuales de empresas a otros sectores, adaptables a equipos genéricos. Proveedores internacionales de equipos especializados.	Fortalecimiento de capacidades de fabricación, a través de la experimentación. Desarrollo de patentes Desarrollo de nueva tecnología. Mejora de tecnología existente.

Fuente: elaboración propia.

Capacidades ancla para fortalecer el sector espacial

Con base en lo desarrollado por la Fuerza Aeroespacial Colombiana (FAC) en los últimos años, se han desarrollado capacidades de observación de la Tierra, monitoreo ambiental y reconocimiento militar para labores de inteligencia, a través del centro de operaciones espaciales, articulando el desarrollo de los objetivos de desarrollo del sector espacial. Partiendo de la infraestructura desarrollada, para el despliegue de las capacidades en proyectos de fabricación de satélites, nanosatélites llamados CubeSat. Se deben analizar desarrollos, para nuevas capacidades internas y externas, en conjunto con la promoción de nuevo conocimiento, operaciones y la planificación logística para su desarrollo, desde el diseño hasta la operativización.

Desglosado el origen de la demanda en términos de misiones de lanzamiento espacial (Tabla 5), de operaciones de valor y de apoyo (Tabla 6), el lector ya podrá inferir que de la necesidad de cumplimiento de la misión, se estructuran las operaciones a desplegar, lo cual, hace dependiente de la política definida y el alcance de la estrategia para cada uno de los objetivos; por lo que, las operaciones espaciales se enmarcan en los ejemplos de infraestructura y telemática avanzada. Propendiendo a planificar con base en la exigencia de

consolidar un conjunto de capacidades conjuntas para el desarrollo social, tecnológico, económico y en alineación directa con las exigencias ambientales del planeta, a causa de, la limitación de los recursos técnicos y económicos de un país en desarrollo.

Importancia de las operaciones logísticas para misiones espaciales

Partiendo del origen de la demanda de operaciones logísticas, su importancia radica en que constituyen un soporte esencial para el cumplimiento de la misión institucional. Ninguna operación u oportunidad de apoyo se desvía de los ejes temáticos definidos para el sector. Los componentes transversales de la logística y dichos ejes se desarrollarán a continuación, comenzando con el análisis de estrategias orientadas al fortalecimiento de una infraestructura adecuada para el sector espacial colombiano.

Análisis de estrategias de Infraestructura espacial

El primer análisis se centra en la infraestructura necesaria para una plataforma de lanzamiento, la cual se clasifica según su capacidad y desde una perspectiva operacional, dependiendo de si el lanzamiento es tripulado o no. En términos de alcance, la altitud que debe alcanzar el cohete determina los requisitos de la plataforma; por ejemplo, para acceder a una órbita geoestacionaria (GEO) se requieren instalaciones de gran envergadura, similares a las del Centro Espacial Kennedy (KSC) en Florida, operado por la NASA. También destacan la Base de la Fuerza Espacial de Cabo Cañaveral en Florida y la Base de la Fuerza Espacial Vandenberg en California, administradas por la Fuerza Aérea de Estados Unidos. A partir del estudio de estas instalaciones se evidencia la necesidad de contar con áreas operacionales y de seguridad que cumplan los estándares internacionales.

El lugar donde se ubique debe contar con instalaciones para el sistema adecuado de deflectores de llamas el cual debe estar durante la primera etapa de ignición de los propulsores de un cohete, en el caso de:

- El FALCON 9 tiene 9 motores Merlin 1D con 845 KN – thrust/unid.
- El RAPTOR 2 tiene 33 motores del Super Heavy con 230 TN de Thrust/Unid.

Lo anterior constituye la base para definir la demanda asociada a una política que aspire a posicionar a Colombia como proveedor de servicios de

lanzamiento de cohetes. No obstante, este propósito implica una inversión significativa, largos periodos de desarrollo y la planificación de procesos lo suficientemente competitivos como para enfrentar la oferta existente en otros países ubicados en la línea del ecuador.

Uno de los factores de mayor impacto económico, ambiental, técnico y social es la reacción de los motores durante la fase de propulsión. La logística necesaria para las misiones espaciales exige reducir la frecuencia de vuelos destinados al transporte de suministros, satélites o módulos habitacionales, al tiempo que se debe garantizar una gran capacidad de carga útil. Con motores de última generación como el RAPTOR 3, la capacidad prevista por lanzamiento puede alcanzar hasta 150 toneladas métricas a órbita baja terrestre (LEO) en configuración reutilizable, y cerca de 250 toneladas cuando se trata de suministros o carga no reutilizable.

En cuanto al vehículo Super Heavy, clasificado como un lanzador superpesado, su meta operacional también se sitúa alrededor de las 150 toneladas, aunque estas prestaciones aún se encuentran en fase de pruebas. Estos parámetros muestran que la competencia internacional se caracteriza por estándares cada vez más exigentes, lo que plantea retos considerables para cualquier país que aspire a consolidarse como actor relevante en el mercado de servicios espaciales.

De acuerdo con lo anterior, las capacidades de infraestructura requeridas puede atenderse en Colombia en Nariño, considerando la variadas altitudes de la región y la cercanía con la línea del ecuador, sustentándose en su cercanía a zonas costeras, convirtiéndose en una oportunidad de desarrollo para el país, así mismo, cuenta con accesos viales y oportunidades de diversificación de capacidades que requieren incluirse en el desarrollo de iniciativas de estado con recursos privados y públicos para el desarrollo del sector. En términos de benchmarking, se realiza un análisis de las potencias sur americanas ya mencionadas anteriormente, para establecer los diferentes enfoques misionales y los operadores que el país puede tener como punto de comparación para adoptar estrategias que propendan por la consecución oportuna de éxitos y evite el consumo de recursos necesarios para las diferentes actividades.

Tabla 6. *Alternativas de capacidades espaciales para una plataforma de lanzamiento*

Lanzamientos tripulados	Lanzamientos no tripulados
Cohetes Científicos	Cohetes de Defensa
Cohetes Comerciales	Cohetes Científicos
Cohetes de Turismo Espacial	Cohetes Sonda
Vehículos Suborbitales	Satélites pequeños
	Vehículos medianos y pequeños
	Equipos para comunicación y telemática

Fuente: elaboración propia.

En principio el análisis de las políticas y la implementación de estas, en un mundo globalizado, conlleva al desarrollo de capacidades con un enfoque de gestión por proyectos, en países como Argentina en términos del sector espacial, se ha permitido consolidar en la Tabla 7, las 6 iniciativas con las que llevará a la implementación diferentes capacidades misionales. Las cuales se desarrollan con financiamiento propio bajo una política nacional, con apoyos de CHINA, incrementando la inversión internacional a través de convenios de cooperación como se establece en el portafolio de las operaciones. La gran debilidad es la dependencia externa, lo que limita la operación e independencia nacional del sector espacial, sin embargo, responde a uno de los lineamientos de cooperación en el marco internacional espacial establecido por la UNOOSA.

Tabla 7. *Análisis de la proyección del sector espacial en Argentina*

Nombre	Operador	Enfoque Misional		Portafolio de Operaciones
		Comunicación y telemática	Seguimiento y control de misiones satelitales	
Estación DS3 Malargüe	Cooperación espacial vigente entre la agencia europea.	Cooperación espacial vigente entre la agencia europea y la CONAE.		Malargüe es la antena más moderna para seguimiento de misiones de exploración del espacio profundo de la Agencia Espacial Europea (ESA).

Nombre	Operador	Enfoque Misional		Portafolio de Operaciones
		Comunicación y telemática	Seguimiento y control de misiones satelitales	
Estación CLTC - CONAE-NEUQUEN		Acuerdos interinstitucionales entre China Satellite Launch and Tracking Control General (CLTC) y la (CONAE).		Brinda soporte de telemetría Seguimiento y control de las misiones del Programa Chino para Exploración de la Luna (CLEP) Programas de investigación científica del espacio lejano.
Centro Espacial Teófilo Tabanera - Córdoba			Proyectos en desarrollo para mejorar capacidades de lanzamiento.	Desarrollo y lanzamiento de satélites de observación de la Tierra
Centro Espacial Punta Indio	Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE)	Proyectado Plataforma de lanzamiento del lanzador Tronador II y III junto con el área de integración final del lanzador y el satélite que llevará abordó. En el corto plazo con dos sistemas de antenas satelitales de reflector parabólico. (Una de estas ya se encuentra instalada)		Bancos de motores de alta potencia de la primera etapa del Tronador II. Banco de ensayo de motores de alta potencia. Banco de ensayos de etapas. Banco de ensayos de turbobombas. Banco presurizado para motores de 30 toneladas.
Centro Espacial Manuel Belgrano		Recibirá información de distintos satélites de observación terrestre de órbita baja.		
Estación Terrena de Tierra del Fuego				

Fuente: elaboración propia.

Es importante resaltar que las comunicaciones, la telemática y el seguimiento y control de misiones satelitales constituyen el eje central de las iniciativas desarrolladas por Argentina. Estas capacidades han permitido identificar diversas oportunidades de negocio basadas en su infraestructura espacial y muestran el potencial de un sector que combina desarrollo tecnológico, servicios especializados y proyección internacional.

Desde una perspectiva estratégica, Argentina ha implementado más de la mitad de sus proyectos y políticas espaciales, lo que la convierte en un referente para la creación de un sector económico similar en Colombia. En este contexto, resulta fundamental destacar las alternativas operacionales que pueden apoyar el despliegue de la demanda logística en el ámbito aeroespacial. Países ubicados cerca de la línea del ecuador, como Colombia, cuentan con ventajas naturales que pueden ser aprovechadas para el desarrollo de capacidades científicas, tecnológicas y logísticas.

Brasil ofrece un ejemplo claro de este potencial. Desde el Centro de Lanzamiento de Alcántara es posible realizar misiones con vehículos medianos y pequeños hacia órbitas LEO, MEO y GEO, demostrando la viabilidad de una infraestructura de lanzamiento situada en latitudes privilegiadas. Esta experiencia evidencia un conjunto de oportunidades que podría orientar la implementación de plataformas similares en Colombia, con beneficios directos en términos logísticos y estratégicos.

En síntesis, la definición y ubicación de una plataforma de lanzamiento o de infraestructura de comunicaciones espaciales dependen de un análisis integral de variables relacionadas con política espacial, capacidades logísticas y proyección económica del sector. Estas consideraciones son esenciales para consolidar un ecosistema espacial competitivo y sostenible en Colombia.

- Eficiencia en Costos.
- Proximidad a Zonas Habitadas.
- Recursos requeridos para la gestión de seguridad espacial.
- Voluntad en la implementación de políticas establecidas

La eficiencia de los costos se mide con base en los parámetros de beneficios esperados por las actividades económicas que estas instalaciones conlleven, así como de los avances científicos que se promuevan desde la ciencia, tecnología y comunicaciones del país. Siendo así entonces, se debe abordar el siguiente análisis desde los requerimientos logísticos de apoyo que son requeridos para las diferentes capacidades. El planteamiento de estas capacidades se medirá a través de la formulación social y económica de proyectos que permitan determinar la inversión. Las alternativas deben estar orientadas a la contribución a la productividad, diversificación y sofisticación del aparato productivo del país, sin embargo, desde el enfoque logístico y de seguridad, deben gestionarse cuidadosamente debido a la proximidad a zonas habitadas y las rutas marítimas y aéreas.

Tabla 8. Análisis de capacidades cercanas a la Línea del Ecuador

País	Infraestructura	Operador	Cohetes Comerciales	Cohetes Científicos	Turismo Espacial	Diversidad de vehículos de lanzamiento	Lanzamientos en órbitas polares	Lanzamientos en órbitas sincrónicas con el sol	Lanzamientos Suborbitales	Capacidad de lanzamiento	Lanzamiento de vehículos medianos y pequeños	Comunicación y telemática	Portafolio de Operaciones
Brasil	Centro de Lanzamiento de Alcántara	Agencia Espacial Brasileña (AEB) (FAB)					X	X		LEO / MEO / GEO	X		Proporciona eficiencia en términos de combustible. Compatible con vehículos de lanzamiento medianos y pequeños. Potencial para convertirse en un centro importante para lanzamientos comerciales en el hemisferio sur
				X					X				Instalaciones para entrenamiento y desarrollo de tecnologías de lanzamiento
Guayana Francesa	Centro Espacial Guayana	Arianespace / CNES / ESA	X	X	X	X				LEO / MEO / GEO	X		
Sri Lanka (Asia)	Spaceport en la Isla de Mannar	Agencia Espacial Nacional de Sri Lanka (SLSA)	X	X									Planes para atraer inversión internacional y colaboraciones.

Fuente: elaboración propia.

Coordinación de recursos y suministros

Como se abordado anteriormente, existe gran cantidad de operaciones a las cuales desarrollar actividades de apoyo dentro de la cadena de valor y del ciclo de valor, esto corresponde a la identificación de materiales críticos y con ello la definición de alternativas de abastecimiento que dependerá de la gestión a través de proveedores especializados que soporten las certificaciones y estándares requeridos para el cumplimiento de condiciones de seguridad operacional. En estos términos, se debe resaltar la existencia de diferentes normativas que pueden llegar a aplicarse en el desarrollo de la industria espacial, los cuales son directamente relacionados con el sector aeronáutico, como lo presenta (Rincon Cuta, 2024, p. 108) donde establece además de buenas prácticas, la relación directa de las partes interesadas en el sector aeronáutico, que para proyectar las operaciones espaciales, pueden ser la base para el desarrollo acelerado del sector. Dentro de los estándares importantes a considerar están:

- AS 9110 SGC MA Requisitos para Organizaciones de mantenimiento Aeronáutico
- AS9114 Orientación para el envío directo para empresas Aeroespaciales
- AS 9115 SGCA Requisitos para organizaciones de aviación Entregable de Software
- AS 9120 SGC DA Requisitos para organizaciones de distribución de la aviación
- AS 9133 SG CA Procedimiento Calificación para piezas aeroespaciales normalizadas AC → Valida → FCO
- AS 9134 Guía para gestión de riesgos Cadena de Suministro

Los anteriores condicionan la estructura organizacional, el desarrollo de los procesos y la totalidad de requisitos para la gestión del abastecimiento de recursos y suministros de proveedores especializados, la garantía de la calidad y el fortalecimiento de los diferentes actores de la cadena de valor, en este sentido, el acompañamiento para el adecuado desarrollo de capacidades certificadas, en cumplimiento de los estándares internacionales que las autoridades planteas y que los entes de control deben hacer respetar.

Gestión de transporte y almacenamiento

Las necesidades de Infraestructura de Transporte en Colombia son cada vez más evidentes, la desventaja económica de la ruta terrestre envuelta en el cobro de rubros por el tránsito de ciertas vías del país fundamenta el factor que disminuye la competitividad del transporte de componentes hacia los sitios de lanzamiento o centros de ensamblaje, así como, el requerimiento de rutas seguras y controladas. Dada la naturaleza delicada y costosa de los equipos, a menudo se necesita transporte especializado y medidas de seguridad extremas.

Un concepto aplicado en este contexto es la coordinación de las actividades de transportes y de logística, con la filosofía del Justo a tiempo, debido a la especialización de los proveedores y componentes estratégicos suministrados, en diversas cantidades, configuraciones y para diferentes sistemas mecánicos, eléctricos, hidráulicos, entre otros que con diversas configuraciones, deben estar en el lugar exacto y en el momento adecuado, consecuentemente la articulación logística es el factor clave en el desarrollo de proyectos aeroespaciales para minimizar el almacenamiento innecesario y con ello reducir riesgos del deterioro de los bienes transportados.

Entorno al crecimiento de la Cadena de Suministro Espacial Regional (Henríquez et al., 2018), la configuración de esta conlleva a la oportunidad de Creación de una red de proveedores, factor clave para posicionar estratégicamente a Colombia como centro de distribución y de producción de componentes espaciales. Las instalaciones tecnológicas en electrónica e instrumentación desde la región centro del país, cobra relevancia cuando tiene cercanía con las instalaciones del aeropuerto internacional de la ciudad de Bogotá, lo que consolida una oportunidad para que Colombia se posicione como un proveedor regional clave de Latinoamérica,

El transporte especializado tiene grandes exigencias en la manipulación de carga delicada, la adecuada manipulación de los componentes espaciales requiere de un control extremadamente exigente a la sensibilidad en cuanto a las vibraciones, impactos y cambios de temperatura. Los vehículos deben contar con suspensión neumática o sistemas de protección contra vibraciones e igual de importante, el control de las variaciones de condiciones ambientales para evitar daños durante el traslado. Consecuentemente la administración de la seguridad del transporte contra amenazas externas como novedades por los vehículos, las carreteras, delincuencia, sabotaje, entre otros, conllevan al uso de estrategias tecnológicas de acompañamiento a través de sistemas de monitoreo

con GPS en tiempo real y protocolos de seguridad, entre ellos de escoltas. Por lo que toda operación debe estar regulada por la autoridad pertinente y se recomienda seguir lo establecido por las regulaciones internacionales de tráfico de armas (ITAR, por sus siglas en inglés). La Optimización del Transporte en la actualidad se ve altamente influenciada por diferentes variables que son susceptibles de medición, el uso de software de gestión de transporte (TMS) y herramientas basadas en inteligencia artificial puede mejorar la planificación y optimización de rutas, reduciendo costos y tiempos de entrega.

Planificación de la cadena de suministro

Desde el enfoque de procesos y tomando como referencia la experiencia del sector espacial en el contexto global, hay diversas experiencias a tener con referencia para el desarrollo del sector en Colombia, una de ellas es la interpretación de las necesidades, problemas y oportunidades del mercado, como lo establecen empresas consultoras como Space Foundation, Euroconsult, Bryce Space and Technology, las cuales han apoyado procesos de interpretación más estructurada de las tendencias, necesidades y oportunidades en el sector espacial. Por tanto, el desarrollo del sector espacial en el contexto global es tomado como referencia para exaltar factores clave para un país como Colombia, partiendo de una posición geoestratégica para el desarrollo de lanzamiento de cohetes al espacio, primera fortaleza para el desarrollo de misiones espaciales, otro atractivo es que la industria existente en el país tiene la capacidad de producir combustibles como el metano (CH₄) y el oxígeno líquido (LOx), fuentes de energía que pueden convertirse en un impulso para el sector espacial.

Impacto en la Cadena de Suministro

Todos los parámetros mencionados anteriormente, sustentan el diseño de los procesos y estrategias de la cadena de suministro para el desarrollo de misiones espaciales, tanto para actividades terrestres como de maniobras en órbita, bien sea de cambio de posicionamiento o reubicación orbital. Los eslabones de la cadena de suministro se configuran entorno a los siguientes roles:

- Proveedores de servicios.
- Proveedores de componentes y repuestos.
- Proveedores de sistemas.
- Proveedores de infraestructura.
- Proveedores logísticos.

Articulados a través de un líder de procesos, apoyado con un diagrama de flujo de valor para el desarrollo de las misiones en las cuales cada uno de los aspectos relevantes de gestión de seguridad de mantenimiento fortalece los aspectos más relevantes en el desarrollo y sostenibilidad de las capacidades, las cuales en el sector espacial se resumen en:

- La posición e inspección de satélites activos: los cuales deben ser soportados en la gestión de las trayectorias y su análisis de funcionamiento, durante su fase de evolución, desde el CubeSat hasta un satélite con mayores capacidades.
- El sostenimiento de capacidades para el desarrollo de misiones a través del reabastecimiento de combustible, mediante la articulación de sistemas duales de alimentación de energía, a través de diferentes tipos de combustible y fuentes fotovoltaicas.
- Entregas de componentes para la construcción de infraestructura como Plataformas de lanzamiento, Centro de comunicaciones
- El ensamblaje en órbita y la misma desorbitación, pueden ser servicios que conllevarían a prolongar el ciclo de vida de los activos a través de la reparación de uno o más elementos de satélites averiados que ya se encuentran en órbita.

Desarrollo de infraestructuras logísticas en el espacio

Una de las posibilidades que más desarrollo tiene en el sector espacial, es la consolidación de infraestructura orientada a las comunicaciones espaciales, entre las cuales se diferencia por el alcance de estas, como aspecto relevante para el flujo de información se tiene que desarrollar estas capacidades, con lo que realizar la evaluación del tipo de antena es una de las prioridades, cabe señalar que en Colombia ya se tiene una experiencia desarrollada con la antena del Centro de Operaciones Espaciales de la FAC, Así entonces se debe relacionar las oportunidades y aplicaciones de esta capacidad:

Tabla 9. *Aplicaciones y oportunidades de infraestructura de comunicación “Antenas”*

Tipo Antena	Descripción	Aplicaciones	Oportunidades
Parabólica de Alta Ganancia	Utilizadas en satélites y estaciones terrenas.	• Enlaces de satélites GEO con estaciones terrenas. • Comunicación entre satélites en diferentes órbitas.	• Largas distancias. • Desarrollo de sistemas de seguimiento complejos.
Helicoidales	Emiten señales en polarización circular, tienen una estructura de bobina helicoidal y son compactas.	• Satélites pequeños. • Polarización circular es necesaria para reducir el desvanecimiento.	• Excelente relación tamaño y eficiencia.
Ranura (Slot Antennas)	Eficientes en términos de espacio, por lo que al ser compactas y ligeras, son ideales para misiones en órbitas bajas.	• Satélites pequeños.	• Para proyectos de tamaño y peso críticos. • Desarrollo de estaciones de bajo perfil.
Panel Planas (Planar Array Antennas)	Dispuestos en un plano para emitir señales de manera controlada.	• Satélites en órbitas LEO o MEO	• Escaneo electrónico sin partes móviles. • reduce el desgaste mecánico.
Apertura Sintética (Synthetic Aperture Antennas)	Combinan múltiples señales recibidas para simular una antena de mayor tamaño.	• Observación de la Tierra y radar. • Misiones científicas de observación terrestre. • Exploración espacial.	• Permite alta resolución espacial sin requerir gran tamaño físico.

En la Tabla 9, se relacionan las oportunidades que tienen las antenas, en la Figura 2. Estación espacial de China en Neuquén se presenta una oportunidad aprovechada por argentina con recursos de inversión extranjera, en la que se desarrollaron capacidades con un acuerdo de servicio, en el que el 10% del

tiempo de la infraestructura será utilizada exclusivamente por el gobierno, asimismo, se denota que la capacidad de esta es el desarrollo de misiones de lanzamiento espacial, por lo que se resalta nuevamente la importancia de acordar la política para el desglose efectivo de los procesos logísticos, sin embargo la cadena logística del sector espacial, es un soporte para el fortalecimiento del nuevo sector.

Figura 2. Estación espacial de China en Neuquén



Fuente: tomada de (Infobae, 2018).

Conclusiones

En términos de Planeación logística del desarrollo espacial, se requiere políticas claras y sostenidas que reduzcan la incertidumbre de corto plazo y garanticen una visión de largo alcance. Lo que hace necesario diseñar una estrategia nacional que priorice la innovación, la investigación aplicada y la protección de la propiedad intelectual, como punto de partida para patentar y generar ventajas competitivas. Conllevando que el espacio debe ser considerado un eje estratégico de diversificación productiva, con planes que conecten la infraestructura científica, tecnológica y empresarial del país.

En términos de Organizacional, la articulación entre Estado, academia, industria y sector civil resulta indispensable para consolidar capacidades y compartir riesgos. El Estado debe asumir un rol promotor mediante incentivos fiscales, financieros y normativos que estimulen la creación de empresas y el sostenimiento de inversiones en capacidades espaciales. A nivel internacional, se requiere fortalecer alianzas con agencias espaciales,

organismos multilaterales y empresas privadas para integrarse en la cadena global de suministro espacial.

En términos de gestión por Procesos para la innovación y transferencia tecnológica, deben estar orientados a la obtención de resultados tangibles en productos y servicios espaciales que sostengan el ciclo de negocio. La cadena de valor espacial debe estructurarse con roles claros y diferenciados, permitiendo una interacción eficiente entre actores nacionales e internacionales. Conllevando a implementar procesos de formación de capital humano especializado, garantizando que exista talento técnico y científico que respalde las iniciativas de largo plazo.

En términos de establecer herramientas de control, es indispensable contar con marcos regulatorios y de gobernanza que aseguren transparencia, continuidad y eficiencia en la ejecución de los proyectos espaciales, que se sustenten en la implementación de sistemas de medición de impacto (económico, tecnológico y social) ajustando estrategias y propender a la optimización de la asignación de recursos.

Referencias bibliográficas

Agencia Nacional del Espectro. (28 de febrero de 2025). Plan Maestro de Gestión de Espectro 2022 - 2026. *Actualización Anual 2024*. Bogotá D.C., Colombia. Obtenido de https://www.ane.gov.co/Sliders/ANE%202025/Actualizacio%CC%81n_anual_2024_PMGE_versiondefinitiva.pdf

Consejo Nacional de Política Económica y Social. (13 de enero de 2020). *Política de desarrollo espacial: condiciones habilitantes para el impulso de la competitividad nacional*. Obtenido de CONPES 3983: <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3983.pdf>

Consultative Committee for Space Data Systems. (octubre de 2021). Recommendation for Space Data System Standards. *CCSDS 232.0-B-4*. Washington, DC, USA. Obtenido de CCSDS 232.0-B-4: <https://ccsds.org/Pubs/232x0b4e1c1.pdf>

Dallamuta, J., Perondi, L. F., & Rocha de Oliveira, M. E. (2023). Space missions in South America: Profile and evolutionary perspective of their development. *Acta Astronautica, Volume 206*, Pages 9-17. Doi:doi.org/10.1016/j.actaastro.2023.02.008

- de Oliveira Matos, P. (15 de march de 2025). Space Industry in Argentina, Brazil, and India: How Are Emerging Countries Joining New Space? *The Journal of Space Entrepreneurship and Innovation*, Vol. 12(No. 2). doi:doi.org/10.1089/space.2023.0045
- EPO, ESPI and ESA. (30 de may de 2024). *Propulsion systems for space*. (E. P. (EPO), Ed.) Vienna, Austria. Obtenido de <https://link.epo.org/web/business/patent-insight-reports/en-propulsion-systems-for-space.pdf>
- European Cooperation for Space Standardization. (11 de october de 2023). *ECSS-Q-ST-60-03C – ASIC, FPGA and IP Core product assurance*. Obtenido de <https://ecss.nl/standard/ecss-q-st-60-03c-asic-fpga-and-ip-core-product-assurance-11-october-2023/>
- European Cooperation for space standarization. (21 de september de 2016). *ECSS-Q-ST-20C Rev.2 DIR1*. Obtenido de Space product assurance of Quality assurance: https://ecss.nl/wp-content/uploads/2016/09/ECSS-Q-ST-20C_Rev2-DIR121September2016.pdf
- European cooperation for space standarization. (1 de march de 2017). *Technology readiness level (TRL) guidelines*. Obtenido de Space engineering: <https://connectivity.esa.int/sites/default/files/ECSS-E-HB-11A%281March2017%29.pdf>
- European Cooperation for space standarization. (11 de october de 2023). *ECSS-Q-ST-60-03C*. Obtenido de ASIC, FPGA and IP Core product assurance Space product assurance: [https://ecss.nl/wp-content/uploads/2023/11/ECSS-Q-ST-60-03C\(11October2023\).pdf](https://ecss.nl/wp-content/uploads/2023/11/ECSS-Q-ST-60-03C(11October2023).pdf)
- Función Publica de Colombia. (18 de julio de 2006). *Decreto 2442 de 2006*. Obtenido de Por el cual se crea la Comisión Colombiana del Espacio: https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=66645&utm_source=chatgpt.com
- Henríquez, G. R., Lombana, J., Gonzalez, A., Higuera, V. H., Landazury, L., Rada, J., . . . Simancas, R. A. (30 de enero de 2018). Governance and its relationship with competitiveness in a firm integrated into a supply chain. *Revista Espacios*, Vol. 39(Nº 18), p.p. 27. Obtenido de <https://www.revistaespacios.com/a18v39n18/18391827.html>
- Martínez, P. S. (Ed.). (2019). *Cadenas de valor y sostenibilidad en Latinoamérica*. México D.F., Mexico: UNAM, Facultad de Contaduría y Administración. Obtenido de <https://www.amazon.com/-/es/Paola-Selene-Vera-Mart%C3%ADnez-ebook/dp/B07RL4FM9P>

- Metalmechanica.com. (08 de Agosto de 2022). *3DLAB, nuevo centro de manufactura aditiva en Chihuahua*. Obtenido de <https://www.metalmechanica.com/es/noticias/3dlab-nuevo-centro-de-manufactura-aditiva-en-chihuahua>
- Morante Granobles, D. F., Delgado Martínez, J. A., Baquero Carrillo, D. M., Giraldo Martínez, G. A., López, W. E., Gómez Ruge, A. C., Torres Gil, K. D. (2021). *Clústeres aeroespaciales polo de desarrollo en Colombia*. (D. F. Morante Granobles, Ed.) Santiago de Cali, Valle del Cauca, Colombia: Escuela Militar de Aviación “Marco Fidel Suárez”. doi:<https://cdn227724.fac.mil.co/sites/emavi/files/2023-02/Clusteres%20Aeronauticas%20poder.pdf>
- OECD. (September de 2024). *The Space Economy in Figures*. Paris, France: OECD Publishing. doi:10.1787/fa5494aa-en
- Porter, M. (2015). *Ventaja Competitiva*. México D.F., México: Grupo Editorial Patria. Recuperado el 15 de marzo de 2024, de https://www.google.com.co/books/edition/Ventaja_Competitiva/wV4JDAAQBAJ?hl=es-419&gbpv=1&dq=la+cadena+de+valor+de+michael+porter&printsec=frontcover
- Rincón, S. R., Cárdenas García, J. M., Pirazán Villanueva, K. N., Acero Niño, I. F., Hurtado Velasco, R. H., & Cortés García, E. D. (4 de July de 2023). Critical Design of the FACSAT-2 mission CubeSat for the observation and analysis of the Colombian Territory. *Revista UIS Ingenierías, Vol. 22*(n.º3), pp. 69-86. doi:doi.org/10.18273/revuin.v22n3-2023006
- Rincon, Y. A., Rincon, J. G., & Hoyos, F. (2024). *Metodologías aplicadas a la gestión de la logística aeronáutica: fortalecimiento del enfoque de liderazgo con habilidades duras para una eficiente planificación avanzada de calidad* (Vol. Volumen 1). Bogotá D.C., Colombia: Ciencia y Poder Aéreo. doi:<https://doi.org/10.18667/9786289646917>
- Roselli, N. (2011). Teoría del aprendizaje colaborativo y la teoría de la representación social: convergencias y posibles articulaciones. *Revista colombiana de Ciencias Sociales, 2*(2), 173-191.
- Slavin, R. (2002). *Aprendizaje cooperativo: Teoría, investigación y práctica*. AIQUE.
- U.S. Department Of State. (21 de March de 2024). *Treaty on Principles Governing the Activities of States in the Exploration and Use of Outer Space*,. Obtenido de Depositary Notification: <https://www.state.gov/>

wp-content/uploads/2024/04/Space-Outer-Space-Treaty-Notification-
of-Deposit-of-Instrument-Colombia-March-21-2024.pdf?utm_
source=chatgpt.com

UNOOSA.org. (23 de march de 2025). *Status of International Agreements
relating to Activities in Outer Space*. Obtenido de Latest Depository
Notifications: [https://www.unoosa.org/oosa/de/ourwork/spacelaw/trea-
ties/status/index.html?utm_source=chatgpt.com](https://www.unoosa.org/oosa/de/ourwork/spacelaw/treaties/status/index.html?utm_source=chatgpt.com)

CAPÍTULO 7.

Desafíos Técnicos y Políticos para Desarrollar la Capacidad Nacional de Lanzamiento de Activos Espaciales desde Territorio Colombiano^{37*}

TC. Carlos Alberto Pauwels Romero³⁸

Carlos Enrique Álvarez Calderón³⁹

Escuela Superior de Guerra “General Rafael Reyes Prieto”

Resumen: Este artículo aborda el desafío de identificar la ubicación óptima en Colombia para el lanzamiento de activos espaciales, considerando tanto los desafíos técnicos como los políticos en el territorio colombiano. En un contexto en el que otros países de la región ya están implementando sus propios sitios de lanzamiento, el potencial para impulsar la economía y reforzar la soberanía nacional es indiscutible, sin embargo, la elección de una ubicación para un lugar

37* Capítulo de libro resultado del proyecto de investigación “Desafíos y nuevos escenarios de la seguridad multidimensional a nivel nacional, regional y hemisférico en el decenio 2015-2025”, del grupo de investigación Centro de Gravedad, de la ESDEG, categorizado como A por MinCiencias y registrado con el código COL0104976. Los puntos de vista en pertenecen a los autores y no necesariamente reflejan el pensamiento de las instituciones participantes. Los puntos de vista y los resultados de este capítulo pertenecen a los autores y no reflejan necesariamente los de las instituciones participantes.

38 Teniente Coronel de la Fuerza Aeroespacial Colombiana. Profesional en Administración Aeronáutica de la Escuela Militar de Aviación “Marco Fidel Suárez”. Magíster en Seguridad y Defensa Nacionales de la Escuela de Superior de Guerra. Comandante del Grupo de Educación Aeronáutica del Comando Aéreo de Combate No. 3. Código ORCID: 0009-0008-0564-8128. Contacto: carlos.pauwels@fac.mil.co.

39 Profesional Oficial de Reserva de la Fuerza Aeroespacial Colombiana. Candidato a Doctor en Estudios Estratégicos, Seguridad y Defensa de la Escuela Superior de Guerra “General Rafael Reyes Prieto”. Magíster en Relaciones Internacionales de la Pontificia Universidad Javeriana y Magíster en Coaching Ontológico Empresarial de la Universidad San Sebastián (Chile). Politólogo de la Pontificia Universidad Javeriana. Becario del Centro de Estudios Hemisféricos de Defensa “William J. Perry”. Docente Investigador de la Escuela de Superior de Guerra, Escuela de Inteligencia y Contrainteligencia, Escuela de Postgrados de la Fuerza Aeroespacial Colombiana, Escuela de Inteligencia Aérea y Academia Naval de Estudios Estratégicos. Columnista de la Revista Aeronáutica de la Fuerza Aeroespacial Colombiana. Código ORCID: 0000-0003-2401-2789. Contacto: carlos.alvarez@esdeg.edu.co.

de lanzamiento en Colombia es un dilema crítico que requiere un equilibrio entre diversos factores fundamentales. A través de una metodología de análisis detallado de los factores políticos que nos permitan determinar la importancia de un puerto espacial para Colombia, seguido de una definición de elementos técnicos, se determina una clasificación de criterios potenciales para designar las posibles ubicaciones factibles de lanzamiento de activos espaciales desde nuestro territorio. Este enfoque integral proporciona una base sólida para futuras decisiones políticas y técnicas en el desarrollo de la capacidad espacial de Colombia. En este sentido, se ofrece una perspectiva objetiva y exhaustiva del desafío de establecer una infraestructura de lanzamiento espacial viable en el país, alineándose con las tendencias regionales.

Palabras clave: Activos Espaciales, Lanzamiento, Territorio, Ubicación, Multicriterio.

Introducción

Desde los albores de la exploración del espacio hasta las misiones actuales, la humanidad ha sido impulsada por un inextinguible deseo de contemplar las estrellas. Antes de la carrera espacial de la Guerra Fría en 1957 entre los Estados Unidos de América (EEUU) y la Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas (URSS), el ser humano ya se cuestionaba sobre los enigmas que nos presenta el espacio exterior, así como el anhelo de algún día llegar a la Luna, Marte o tal vez aprovechar los recursos naturales que podrían ofrecernos asteroides ricos en metales preciosos. La exploración espacial y el lanzamiento de activos espaciales desarrollados durante la carrera espacial de la Guerra Fría sirvieron como catalizador para impulsar diversos sectores, que van desde las comunicaciones y la meteorología hasta la investigación científica, la defensa y seguridad de una Estado. Además, lograron hitos que incluyen el lanzamiento del primer satélite en órbita (el Sputnik-1 de la URSS), el envío del primer ser vivo al espacio (la perra Laika, también por la URSS), el primer hombre en la Luna (Neil Armstrong) por EE. UU y la primera estación espacial en órbita (la estación soviética MIR). Estos eventos han sentado las bases para los avances contemporáneos en la exploración espacial (Álvarez Calderón, Corredor Gutiérrez, et al., 2020).

Otros hitos significativos para la humanidad fueron el despliegue de las sondas Voyager 1 y 2, el Telescopio Espacial Hubble para capturar impresionantes vistas del cosmos, el Mars Pathfinder, el rover Curiosity y Perseverance con el

primer dron aéreo desplegado en otro planeta, el Ingenuity. Llegamos incluso al despliegue del Telescopio Espacial James Webb, el cual revolucionará nuestra comprensión del universo. Como lo expresó Thomas Zurbuchen, Administrador Asociado de la Dirección de Misiones Científicas de la NASA: “El Telescopio Espacial James Webb será la instalación científica más poderosa y compleja jamás enviada al espacio, y explorará todas las fases de la historia cósmica” (Cesari, 2023, p. 23).

Colombia, a través de instituciones académicas y la Fuerza Aeroespacial Colombiana (FAC), no ha quedado al margen de este anhelo de conquistar el espacio. El país está en proceso de desarrollar su capacidad espacial mediante la implementación de diversas iniciativas tanto en los ámbitos civil como de defensa. Colombia incursionó en el campo de los satélites de manera tardía con el lanzamiento de su primer nanosatélite, el LIBERTAD-1, en 2007. Posteriormente, la FAC lanzó el nanosatélite avanzado FACSAT-1 en noviembre de 2018. Estos proyectos han establecido las bases iniciales para el desarrollo futuro de capacidades espaciales, con el objetivo de posicionar a Colombia como un País líder en el ámbito espacial en la región de América Latina. Esto se logra aprovechando su posición geográfica estratégica y la experiencia de su personal especializado (Rincón et al., 2020).

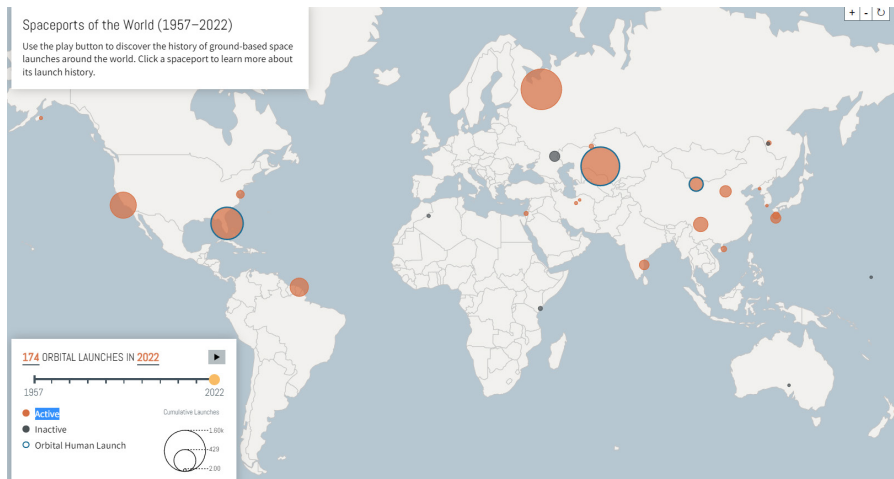
En la actualidad, el proyecto FACSAT-2 “Chiribiquete” fue lanzado con éxito por la FAC a través de la compañía SpaceX desde la base aeroespacial de Vandenberg en los Estados Unidos a bordo de un cohete tipo Transponder-7 en abril de 2023 (Saumeth, 2023). Satélites como el FACSAT-2 tienen la capacidad de realizar misiones de observación de la Tierra para identificar posibles amenazas ambientales, combatir la minería ilegal, llevar a cabo operaciones de vigilancia de infraestructuras energéticas y viales, además de monitorear las fronteras utilizando tecnología de última generación.

Cada lanzamiento de activos espaciales, desde cualquier ubicación en el globo terrestre, no solo profundiza el conocimiento y la perspectiva humana, sino que también amplía las posibilidades para futuras exploraciones y beneficios potenciales. Desde la minería de asteroides hasta la búsqueda de vida extraterrestre, se despliegan infinitas oportunidades para la humanidad, abriendo así una nueva era de descubrimiento y avance. Se evidencia cuán crucial es el desarrollo espacial para un Estado. Es esencial destacar que los avances en la exploración espacial y nuestra comprensión del universo no ocurren de manera aislada o aleatoria, sino que siguen un proceso lógico y estructurado (Hegel, 2011). Este proceso comienza fundamentalmente con el desarrollo de una plataforma o lugar desde el cual se lanzan activos espaciales al espacio, es decir, una Estado debe tener la capacidad de enviar objetos al

espacio desde su propio territorio. Tal es el caso de la base espacial de Alcántara en Brasil, la cual, mediante un convenio de salvaguardias tecnológicas aprobado por el Congreso de Brasil y firmado por los presidentes Trump y Bolsonaro, permitió la reactivación de ese centro de lanzamiento. Esta base es una de las mejor ubicadas del mundo debido a su cercanía al Ecuador. Se estima que Alcántara generará un volumen de negocios de 10.000 millones de dólares a partir de 2040, lo cual equivale al 1% de la productividad total del sector espacial a nivel mundial, que es de 300.000 millones de dólares (Alfonso, 2021).

El advenimiento de la era espacial ha transformado nuestra comprensión del universo y nuestro lugar en él. En este contexto, los lugares de lanzamiento desempeñan un papel crítico en el éxito de cualquier programa espacial y contribuyen de manera significativa y estratégica al desarrollo de un país. Desde 1957 hasta la fecha, el número de puertos espaciales en todo el mundo ha ido en aumento, como se muestra en la Figura 1.

Figura 1. Lanzamientos orbitales de 1957 a 2022



Fuente: tomado de “Space Threat Assessment 2023”, por. Aerospace Security, 2023.

Colombia, con su ubicación geográfica privilegiada y su creciente interés en el desarrollo de capacidades espaciales, se posiciona como un país con potencial para establecer un programa espacial en su propio territorio. Sin embargo, surge la interrogante crucial: ¿cuál es la ubicación más idónea en Colombia para instaurar un lugar de lanzamiento de activos espaciales, tomando en

cuenta los desafíos técnicos y políticos inherentes al desarrollo de la capacidad de lanzamiento nacional desde su territorio?

Para abordar esta cuestión, este artículo se plantea tres objetivos que permitirán discernir la ubicación más apropiada para el lanzamiento de activos espaciales en suelo colombiano. En primer lugar, se analizará la relevancia de establecer un Puerto Espacial en Colombia, examinando los factores políticos que podrían influir en la elección de una ubicación. La política espacial, tanto a nivel nacional como internacional, puede ejercer un impacto significativo en esta decisión, a la par de consideraciones económicas y sociales. Además, la capacidad propia de lanzamiento resulta crucial para la seguridad y defensa nacional al eliminar la dependencia de otras naciones o entidades en la puesta en órbita y mantenimiento de activos espaciales, tales como satélites con funciones estratégicas en campos que abarcan desde las comunicaciones y la observación hasta el desarrollo tecnológico, la seguridad y la defensa nacional (De Carlos, 2013).

En segundo lugar, se identificarán y evaluarán los criterios técnicos indispensables para seleccionar una ubicación de lanzamiento de activos espaciales. Estos criterios podrían incluir aspectos como la cercanía al Ecuador, las condiciones climáticas, la infraestructura preexistente, las vías de acceso y la ubicación geográfica, entre otros factores que puedan influir en la viabilidad de establecer un lugar de lanzamiento en el territorio colombiano (Dachyar & Purnomo, 2018).

Para concluir, se emplearán métodos de análisis multicriterio, ampliamente utilizados por naciones e instituciones para determinar ubicaciones óptimas no solo para instalaciones espaciales, sino también para distintos tipos de infraestructura, que varían desde centros comerciales hasta universidades (Dachyar & Purnomo, 2018). Además, se empleará un enfoque descriptivo para evaluar factores tanto políticos como técnicos. Mediante estas herramientas, se procurará evaluar y priorizar las ubicaciones de lanzamiento en base a diversos criterios técnicos. La meta es proporcionar una guía sólida para orientar el futuro desarrollo espacial en Colombia.

Por consiguiente, el presente capítulo se desarrolla bajo un diseño exploratorio de carácter teórico–metodológico, orientado a establecer las bases conceptuales y analíticas necesarias para la futura formulación de estudios empíricos sobre la viabilidad de un puerto espacial en Colombia. En tal sentido, el objetivo no es presentar resultados concluyentes derivados de trabajo de campo o levantamiento de datos primarios, sino proponer un marco analítico preliminar que permita comprender los factores críticos asociados a la selección de sitios

de lanzamiento y su pertinencia en el contexto nacional. La aproximación metodológica seguida combina dos componentes fundamentales:

1. **Revisión bibliográfica y documental.** Se efectuó un análisis sistemático de literatura académica y técnica relativa a la política espacial, el poder espacial y los métodos empleados en la selección de sitios de lanzamiento en distintos contextos internacionales. Este ejercicio permitió identificar los criterios más frecuentes y relevantes en el marco de referencia global, garantizando así la coherencia del presente estudio con estándares comparativos.
2. **Aplicación conceptual del método Analytic Hierarchy Process (AHP).** Con base en la revisión realizada, se construyó una propuesta de matriz jerárquica multicriterio, estructurada a partir de nueve criterios técnicos comúnmente aceptados en la literatura especializada. La aplicación del AHP en este capítulo tiene un carácter ilustrativo y exploratorio, pues se fundamenta en datos secundarios y simulaciones conceptuales que buscan mostrar la pertinencia del modelo en la toma de decisiones estratégicas. La validación de la coherencia interna se efectuó mediante el cálculo de la Razón de Consistencia (RC), garantizando un nivel aceptable de consistencia en los juicios empleados.

La naturaleza del capítulo implica reconocer ciertas delimitaciones epistemológicas y metodológicas. En particular, el estudio:

1. No incorpora levantamiento de datos empíricos primarios (mediciones *in situ*, estudios geoespaciales de alta resolución o encuestas a expertos nacionales).
2. No constituye un resultado de investigación empírica verificable, sino una propuesta metodológica preliminar orientada a abrir el campo de discusión académica y estratégica sobre la capacidad nacional de lanzamiento.
3. Se limita a demostrar la aplicabilidad del análisis multicriterio en el contexto colombiano, sin pretender agotar todas las variables técnicas, económicas y políticas que deberían considerarse en un estudio de factibilidad integral.

En consecuencia, este capítulo debe ser comprendido como una contribución exploratoria al debate académico y estratégico, cuyo valor radica en: (i) sistematizar el marco teórico y metodológico aplicable al problema de investigación; (ii) identificar factores críticos de carácter técnico y político

para la toma de decisiones futuras; y (iii) delinear una ruta metodológica susceptible de ser empleada en investigaciones empíricas posteriores con mayor nivel de validación.

La Explotación y Desarrollo Espacial como Herramienta Estratégica para Colombia

El desarrollo de una capacidad propia de lanzamiento de activos espaciales, a lo que denominaremos “explotación y desarrollo espacial”, constituye una herramienta estratégica de gran potencial para reducir de manera significativa la incertidumbre y los conflictos inherentes en cualquier escenario bélico, lo que se conoce como la “niebla” en un contexto de guerra (Silva Rueda et al., 2020). A pesar de ello, el propio Clausewitz subrayaba que los factores y las consecuencias de los conflictos armados son sumamente complejos e impredecibles. La guerra, por lo tanto, se convierte en un acto de fuerza para obligar al adversario a acatar la voluntad propia (Barroso, 2022). El desarrollo y la explotación espacial emergen como elementos fundamentales para equilibrar la balanza regional y lograr superioridad estratégica y táctica en situaciones de conflicto. Esta superioridad ofrece una visión y preparación en tiempo real (Silva Rueda et al., 2020).

La innovación y desarrollo espacial confieren una ventaja significativa en el espacio, capaz de proporcionar a un Estado una ventaja crucial. Para Colombia, un país en vías de desarrollo, el espacio exterior no se presenta como inalcanzable y sus ventajas pueden ser cruciales tanto para la seguridad y defensa nacional como para el avance social y económico. En esta perspectiva, el interés por ingresar a la carrera espacial no es una excepción para Colombia, que ha expresado su intención de desarrollar la capacidad nacional para el lanzamiento de activos espaciales. No obstante, para alcanzar este objetivo, es necesario superar desafíos políticos que presentan implicaciones significativas para la seguridad y defensa nacional.

En 2010, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM) publicó *Experiencias en el uso y aplicación de tecnologías satelitales para la observación de la Tierra*, un libro que resalta la importancia de la información meteorológica satelital como una herramienta decisiva en la planificación de operaciones militares, poniendo de relieve la información meteorológica como recurso clave para la aplicación del SIMFAC (Sistema de Información Meteorológica de la FAC). Además, se destaca la importancia de un programa de investigación en desarrollo satelital y aplicaciones en

observación de la Tierra, lo que permite al Estado colombiano respaldar diversas funciones institucionales y centrar sus esfuerzos en el desarrollo científico y tecnológico. Asimismo, resulta relevante subrayar que la CCE (Comisión Colombiana del Espacio) resalta la utilidad de los satélites para la observación en áreas como hidrología, oceanografía y prevención de desastres, entre otros.

En 2020, el Gobierno colombiano presentó el Consejo Nacional de Política Económica y Social (CONPES) 3983, una iniciativa que busca establecer una política de desarrollo espacial en el país. En el resumen ejecutivo del documento, se menciona la falta de información en el sector como una de las causas de que la industria espacial no haya prosperado en Colombia (Mónico Muñoz et al., 2022). Dado que Colombia es un país en desarrollo que busca alcanzar autonomía en tecnología espacial, el CONPES 3983 de 2022 sobre política de desarrollo espacial expone los siguientes aspectos: (i) la creación de un marco institucional y legal sólido para el sector espacial, incluyendo la formación de un Consejo Nacional de Desarrollo Espacial y la definición de roles y responsabilidades para las entidades involucradas, (ii) el fortalecimiento de la capacidad técnica y científica del país en el ámbito espacial mediante la promoción de la formación de recursos humanos especializados, la mejora de infraestructuras y el estímulo a la investigación y desarrollo, (iii) la promoción de la inversión privada en el sector espacial a través de incentivos fiscales y la creación de un entorno propicio para el desarrollo de nuevas empresas y emprendimientos, (iv) el impulso de la industria espacial en Colombia mediante la creación de clústeres empresariales y la participación de las empresas nacionales en proyectos espaciales internacionales, y (v) el refuerzo de la cooperación internacional en el ámbito espacial a través de la consolidación de acuerdos y alianzas con otros países y organismos internacionales.

En línea con el desarrollo de la industria espacial, el gobierno colombiano ha establecido acuerdos Artemis con la NASA, destinados a regular el uso y la protección del espacio. Sin embargo, la falta de una agencia espacial estatal ha obstaculizado la firma de acuerdos futuros. Considerando que otros países de la región cuentan con agencias espaciales para suscribir estos acuerdos, Colombia necesita establecer una agencia espacial estatal y pública para asegurar los recursos necesarios para el crecimiento en esta área. “Se necesita una agencia estatal y pública para asegurar los recursos para que el país pueda iniciar esta carrera espacial, ya que tenemos un gran potencial” (Monsalve, 2018, párr. 5).

Para ilustrar la necesidad de contar con la capacidad de lanzamiento de activos espaciales en su territorio y con total autonomía, es instructivo considerar el

ejemplo descrito en el libro “El Espacio Exterior: Una Oportunidad Infinita para Colombia - El Cielo no es el Límite: El Futuro Estelar de Colombia”. En este libro se describe un escenario hipotético en el que la falta de autonomía en las capacidades espaciales de Colombia conduce a una grave vulnerabilidad en seguridad y defensa nacional (Silva Rueda et al., 2020). En este escenario, un país vecino, en medio de una crisis interna, utiliza sus avanzadas capacidades satelitales propias para generar incidentes fronterizos. Mientras tanto, Colombia lucha por rastrear movimientos enemigos y mantener comunicaciones militares eficientes debido a la falta de capacidades propias y a restricciones y costos elevados impuestos por potencias extranjeras, ya que depende completamente de contratos y acuerdos internacionales para mantener sus capacidades.

Colombia necesita establecer una política estatal que fomente la creación de capacidades autónomas de recursos espaciales en lugar de depender de soluciones externas funcionales sin una base estructural sólida (Álvarez Calderón & Corredor Gutiérrez, 2020). Desde una perspectiva realista, el poder espacial se convierte en un factor estratégico crucial, ya que los estados buscan maximizar su propio interés y seguridad tomando decisiones racionales según sus intereses (Barbé, 1987). En este contexto, el control del espacio ultraterrestre se convierte en una herramienta esencial para ejercer poder y obtener una ventaja militar (Colby, 2016). Esto permite, por ejemplo, establecer imágenes de inteligencia de alta calidad que facilitan la toma de decisiones por parte del alto mando, así como proporcionar pronósticos meteorológicos en tiempo real para reducir la incertidumbre en un teatro de operaciones, un factor esencial para diseñar una estrategia efectiva (Clausewitz, 2016).

En esta línea, la voluntad política resulta crucial para que una nación desarrolle y aproveche el espacio de manera efectiva. Es esencial que el sector político del país comprenda la importancia de la explotación espacial. Sin embargo, la carencia de una capacidad de lanzamiento propio sitúa a Colombia en una desventaja estratégica considerable. La seguridad y defensa nacional podrían verse comprometidas debido a la imposibilidad de acceder a la tecnología necesaria o a la dependencia de intermediarios estatales, tratados u organizaciones privadas. Estos actores poseen la capacidad de manipular o negar información de acuerdo a sus propios intereses. Sin embargo, en la actualidad, aquellos que dispongan de capacidades autónomas, tanto tangibles como intangibles, para acceder al espacio exterior podrán aprovechar los abundantes recursos del Universo (Álvarez Calderón et al., 2020). En este contexto, la soberanía espacial, que se refiere a la capacidad de un estado para controlar y gestionar sus propios recursos espaciales, se convierte en un componente central de la seguridad nacional en el actual escenario geopolítico.

Este ejemplo ilustra la falta de autonomía colombiana en la explotación y exploración espacial y demuestra una debilidad significativa en seguridad y defensa nacional. Es imperativo que se revisen las políticas públicas tanto nacionales como internacionales de Colombia en relación al uso del espacio ultraterrestre. El Estado necesita una política que promueva la creación de una capacidad autónoma de lanzamiento de activos espaciales desde territorio colombiano en lugar de soluciones funcionales sin una base estructural real y eficiente.

Importancia de un puerto espacial en Colombia: Clave para el Desarrollo Estratégico Nacional

Para comprender la relevancia de un sitio de lanzamiento de activos espaciales en Colombia, es esencial abordar la noción de poder espacial y su relación con la seguridad multidimensional, ya que esto influye de manera sustancial en la determinación política de un estado respecto a la explotación y el desarrollo del espacio.

A pesar de los intentos de relacionar el poder espacial con teorías de poder naval y aéreo, Klein argumenta que tal asociación no es factible. Aunque en la Guerra Fría, el poder espacial estuvo fuertemente ligado al prestigio nacional y a la superioridad militar, en la actualidad está más relacionado con factores civiles, comerciales, militares y de inteligencia (Klein, 2004). Este concepto se desvincula de otros poderes asociados a ambientes terrestres, ya que las fuerzas espaciales operarían en su propio medio, el espacio vacío (Álvarez Calderón, Hernández Jara, et al., 2020). Además, se sostiene que el poder espacial sigue las leyes del movimiento planetario de Kepler (Harter, 2006), lo que lo distingue de otros conceptos de poder.

Muller (2015) definen el poder espacial como la capacidad de un actor estatal o no estatal para lograr objetivos globales a través del control y explotación del entorno espacial. Lior (2001) lo simplifica, describiéndolo como la habilidad de usar el espacio y evitar que el enemigo haga un uso confiable de él. Álvarez et al. (2020) proponen que el poder espacial es la facultad y voluntad de usar capacidades espaciales tanto civiles como militares, en apoyo a la seguridad y desarrollo nacionales y para cumplir intereses nacionales. Harter (2006) establece que el poder espacial involucra:

- El espacio es el último terreno elevado.
- El espacio es un medio distinto con sus propias teorías, doctrinas y políticas.
- El poder espacial potencia a cada comandante y ejército.
- Las fuerzas espaciales respaldan todos los niveles de guerra simultáneamente.
- La superioridad espacial afecta no solo lo militar sino también lo económico de una nación.
- Para controlar el espacio se necesitan herramientas de percepción y acción.
- Las fuerzas espaciales requieren un mando centralizado por especialistas.
- El poder espacial es una función de la capacidad total de una nación.
- El poder espacial alcanza su potencial con una fuerza espacial independiente.

Considerando estas perspectivas, se propone que el poder espacial en el contexto de la explotación y desarrollo espacial se refiere a la capacidad y autonomía de un estado o entidad para operar en el espacio. Esto abarca diversas habilidades y recursos, incluyendo infraestructura espacial para el lanzamiento y mantenimiento de activos en órbita. Esto demanda conocimientos y talento, formando expertos en campos como astronomía e ingeniería aeroespacial. A nivel de gobernanza, la política y legislación espacial deben influir en regulaciones internacionales para demostrar una voluntad política sólida. Todo esto se enmarca en una economía espacial que busca aprovechar oportunidades en todos los campos disponibles.

Es crucial comprender que, si definimos el poder espacial como la capacidad y autonomía de un estado o entidad para operar en el espacio, entonces debemos analizar su relación con la seguridad multidimensional y su influencia en la voluntad política respecto a la explotación y desarrollo espacial. En este contexto, exploramos la posibilidad de crear una capacidad propia de lanzamiento de activos espaciales desde Colombia (Puerto Espacial). Para entender este vínculo, es útil considerar que después de la Guerra Fría, la seguridad y defensa nacional se expandieron de lo meramente militar a lo multidimensional (Font & Ortega, 2012).

En esta nueva perspectiva, el espacio exterior adquiere un rol crucial. El concepto moderno de “interés nacional” se origina en el siglo XV, especialmente en las ideas realistas de figuras como Maquiavelo y Clausewitz, quienes argumentaban que la protección de intereses vitales era la razón principal para la acción de un Estado, incluso la guerra (Herrero de Castro, 2010). En este contexto, el espacio se convierte en una nueva arena de interés nacional debido a su importancia estratégica y económica, con estados invirtiendo en tecnologías espaciales y satélites. Estos desempeñan papeles cruciales en la infraestructura económica global, reforzando la idea de que el espacio es fundamental para la supervivencia y prosperidad estatal en el siglo XXI. Esto también se aplica a la mayoría de países en América del Sur, donde el acceso al espacio exterior es un asunto de interés nacional (Figura 2).

Figura 2. Importancia estratégica del espacio exterior en la región

ARGENTINA	ECUADOR	PERÚ	BRASIL	CHILE
DOCUMENTO: Libro blanco de seguridad y defensa p.62. ALUSIÓN: Comisión Nacional de Actividades Espaciales, CONEA como agencia de importancia.	DOCUMENTO: Política de Defensa Nacional, pp.20 y 60. ALUSIÓN: Implementación de políticas que permiten una explotación del recurso aeroespacial.	DOCUMENTO: Libro Blanco de Defensa Seguridad, pp. 69, 70, 91 ALUSIÓN: Involucran el tema aeroespacial como propulsor de la defensa aeronáutica.	DOCUMENTO: Libro Blanco de Defensa Nacional, pp. 41, 42, 58, 111, 149. ALUSIÓN: Hablan de lo aeroespacial como “sector” y como “sistema” que fortalece la defensa aérea. Mencionan el espacio exterior como un tema de “primera importancia” y un “sector estratégico”.	DOCUMENTO: Libro de Defensa Nacional de Chile, pp. 61, 287, 289, entre otras ALUSIÓN: Es eje estratégico para ciberdefensa, guerra electrónica, sistemas de mando y control, teledetección, telecomunicaciones, geo información, medicina aeroespacial e industria aeroespacial.

Fuente: elaboración propia, con base en Pastrana (2020).

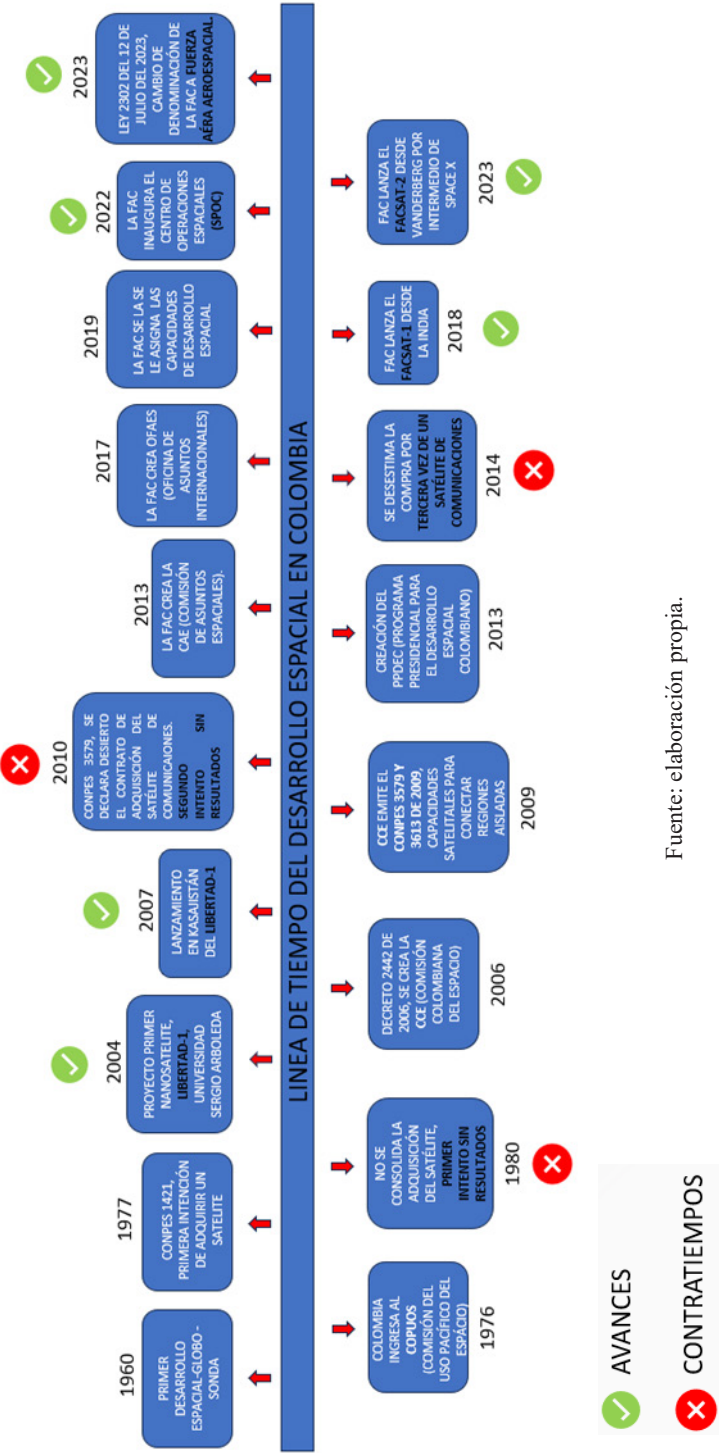
Aunque no existen registros textuales que transcriban la Política Espacial Colombiana, es importante destacar que se han realizado esfuerzos específicos para orientar y planificar la política nacional de desarrollo y aplicación de tecnologías espaciales (Silva Rueda y otros, 2019). Esta política ha ido tomando forma a partir de información recopilada de documentos oficiales, decretos, actas, CONPES, acuerdos, presentaciones, decisiones y acciones desde la inclusión de Colombia en el COPUOS en 1976 (Cancillería, 2023). En la actualidad, se podría afirmar que la política pública espacial colombiana se centra en la consecución de una capacidad satelital propia. Este objetivo se enfoca en facilitar planes y programas de telecomunicaciones y observación terrestre con fines económicos, sociales, de seguridad y defensa. Si bien la

exploración espacial brinda notables beneficios científicos, económicos y militares a cualquier Estado, Colombia aún no ha establecido una visión a largo plazo en este ámbito (Ayazo, 2021).

Es necesario destacar ciertos aspectos donde la política espacial colombiana podría mejorar. En primer lugar, no se centra de manera determinante en el desarrollo de tecnología espacial propia. Esto presenta una carencia importante, ya que la capacidad de generar tecnología espacial interna es un elemento clave para avanzar en este campo. Además, la política actual no aborda adecuadamente la necesidad de lograr independencia en el lanzamiento de activos espaciales a órbitas geoestacionarias o en la realización de misiones al espacio profundo. Para el lanzamiento de los satélites LIBERTAD-1, FACSAT-1 y FACSAT-2, Colombia recurrió a intermediarios como el Centro Espacial Ruso de Baikonur en Kazajistán, el Centro Espacial Satish Dhawan en India y SpaceX desde la base aeroespacial de Vandenberg en Estados Unidos, respectivamente. Alcanzar esta independencia es fundamental para asegurar una posición competitiva en el ámbito espacial regional y para lograr el desarrollo estratégico del país.

Para comprender la posición actual de Colombia en la explotación y desarrollo espacial, es esencial trazar una línea de tiempo de su política pública en este ámbito. A pesar de las notables ventajas geográficas como la cercanía al ecuador y la presencia de dos salidas al mar, factores que según Mahan (1890) son cruciales para que un estado alcance la categoría de gran potencia debido al poder marítimo (Álvarez et al., 2020), Colombia no ha logrado posicionarse como líder en el desarrollo espacial. Un análisis cronológico de la política espacial nos permitirá comprender las causas subyacentes de esta situación hasta la fecha (Figura 3).

Figura 3. Análisis línea de tiempo del desarrollo espacial en Colombia



Fuente: elaboración propia.

A pesar de haberse unido tempranamente al Comité de las Naciones Unidas para la Utilización del Espacio Ultraterrestre con Fines Pacíficos (COPUOS) en 1976, la voluntad del Estado colombiano para desarrollar una política espacial sólida ha sido históricamente limitada. Esto se manifiesta en tres intentos fallidos de adquisición de un satélite y en la carencia de una estrategia espacial clara en la planificación estratégica nacional. Además, la estrategia de comunicación ha sido deficiente, no logrando movilizar a los actores privados que podrían impulsar el sector espacial (Silva Rueda et al., 2020).

Es importante notar que la inversión privada, como es evidente en otros Estados con empresas como SpaceX y Blue Origin, desempeñan un papel clave en el desarrollo del sector espacial. Sin embargo, en Colombia, el sector privado ha mostrado un interés limitado, con el único intento notable siendo el desarrollo del satélite Libertad 1 por estudiantes de la Universidad Sergio Arboleda en 2004. No obstante, en los últimos años, con el proyecto FACSAT, Colombia, a través de instituciones como la Fuerza Aeroespacial Colombiana (FAC), ha comenzado a manifestar un mayor interés en el desarrollo espacial, reflejando un cambio en las condiciones políticas y una mayor disposición.

Al explorar la evolución de la política espacial colombiana, se obtiene una comprensión más profunda de los elementos clave que están moldeando la explotación y desarrollo espacial en el país. Mediante este análisis descriptivo, se identifican varios factores que determinan la importancia de establecer un lugar de lanzamiento de activos espaciales en Colombia. En este contexto, cobra relevancia la tarea de evaluar la pertinencia de establecer un Puerto Espacial en el país y comprender cómo su implementación podría influir en el desarrollo estratégico nacional. Estos factores, dada su importancia en el panorama político actual, contribuyen a forjar una comprensión integral de la situación y las posibles implicaciones de esta iniciativa (Figura 4).

Figura 4. *Actores que determinan la importancia de un Puerto Espacial en Colombia*



Fuente: elaboración propia.

Tomando en cuenta lo previamente expuesto, a continuación, se detallan los factores que contribuyen a la comprensión de la relevancia de establecer un Puerto Espacial en Colombia:

1. **Desarrollo Estratégico Nacional:** La explotación y el desarrollo espacial son elementos fundamentales para equilibrar la balanza regional y alcanzar superioridad estratégica y táctica en situaciones de conflicto. Un puerto espacial en Colombia posibilitaría el lanzamiento autónomo de activos espaciales, reduciendo la dependencia de otros países y fortaleciendo la capacidad de defensa y seguridad nacional.
2. **Soberanía Espacial:** El control del espacio ultraterrestre se ha convertido en un componente central de la seguridad nacional en el panorama geopolítico actual. Contar con un puerto espacial propio proporcionaría a Colombia un mayor control sobre sus recursos espaciales, disminuyendo la manipulación de información por parte de actores externos y garantizando la independencia en la toma de decisiones en el espacio.
3. **Desarrollo Tecnológico:** Un puerto espacial en Colombia estimularía el desarrollo de tecnología espacial autóctona. La capacidad para diseñar, construir y lanzar cohetes y satélites impulsaría la innovación y el crecimiento en el sector tecnológico, al mismo tiempo que fomentaría la formación de profesionales altamente capacitados en disciplinas espaciales.

4. **Economía y Recursos:** La explotación espacial ofrece oportunidades económicas de relevancia, como las comunicaciones satelitales, la obtención de imágenes por satélite, el monitoreo meteorológico, la investigación científica y la exploración espacial. Además, permitiría a Colombia beneficiarse económicamente mediante la participación en proyectos espaciales comerciales y el fortalecimiento de la economía.
5. **Independencia en Lanzamientos:** En la actualidad, Colombia depende de intermediarios para llevar a cabo el lanzamiento de sus activos espaciales. Contar con un puerto espacial propio garantizaría independencia en los lanzamientos de satélites y otros elementos, reduciendo costos y restricciones impuestas por terceros.
6. **Política Espacial:** El establecimiento de una política espacial sólida y la creación de una agencia espacial colombiana son pasos cruciales para impulsar el desarrollo espacial en el país. Un puerto espacial estaría alineado con esta estrategia y proporcionaría una base estructural sólida para la explotación y el desarrollo espacial.
7. **Seguridad y Defensa Nacional:** Un puerto espacial podría mejorar la capacidad de defensa y seguridad nacional al permitir la implementación de sistemas de observación y comunicación en tiempo real, reduciendo la incertidumbre en situaciones de conflicto.
8. **Incentivo a la Inversión Privada:** Crear un entorno favorable para el desarrollo de empresas espaciales en Colombia, mediante incentivos fiscales y colaboraciones público-privadas, podría atraer inversión al sector y acelerar el desarrollo de capacidades espaciales.
9. **Cooperación Internacional:** Un puerto espacial propio podría facilitar la cooperación internacional en el ámbito espacial, permitiendo que Colombia participe en proyectos espaciales internacionales y establezca acuerdos con otras naciones y organismos globales.

Los factores que se han identificado en este estudio proporcionan un contexto fundamental para entender la importancia de establecer un puerto espacial en Colombia. Estos elementos abarcan desde el desarrollo estratégico nacional hasta la colaboración internacional en el espacio. Juntos, conforman una perspectiva integral de cómo un puerto espacial no solo fortalecería la seguridad y defensa nacional, sino que también impulsaría el desarrollo tecnológico, la economía y la autonomía espacial. Esto situaría a Colombia como un actor relevante en la exploración y explotación del cosmos en la región.

En este sentido, el siguiente objetivo primordial de este artículo es determinar los criterios técnicos necesarios para la selección de una ubicación de lanzamiento de activos espaciales. Al considerar estos criterios, se podrá establecer una base sólida para la creación de un puerto espacial que cumpla con las demandas tecnológicas y estratégicas, alineando así la visión de Colombia como un actor destacado en el escenario espacial global.

Determinación de Criterios Técnicos para la Selección de Sitios de Lanzamiento de Activos Espaciales en Colombia

Para determinar los criterios técnicos necesarios para la selección de una ubicación de lanzamiento de activos espaciales en Colombia, es fundamental comprender el concepto y las características de un puerto espacial de lanzamiento. El puerto espacial, como plataforma para el lanzamiento de activos espaciales, constituye el elemento central en este artículo. La comprensión de su naturaleza, composición y requisitos técnicos permitirá establecer los criterios apropiados para seleccionar la ubicación más idónea en el territorio colombiano.

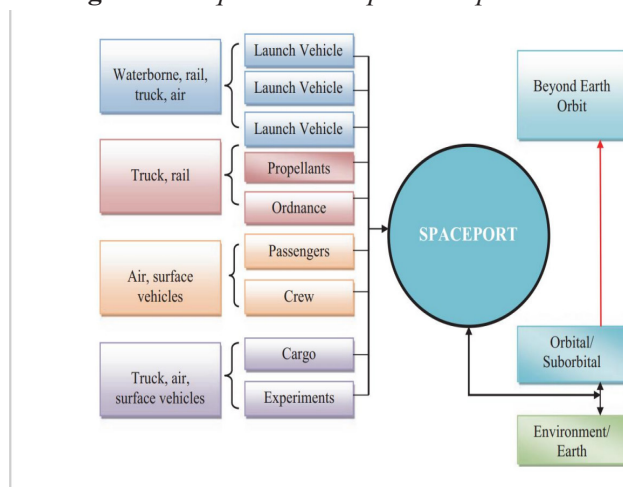
Este análisis se fundamentará en diversos estudios que definen qué es un puerto espacial de lanzamiento y cuáles son los factores técnicos esenciales para su establecimiento. Mediante este proceso, construiremos un marco de referencia técnico que nos guiará en la elección de la ubicación más adecuada para desarrollar la infraestructura espacial de Colombia.

Aunque el concepto de puerto espacial no es nuevo, se ha desarrollado a lo largo de los años, inicialmente como bases de lanzamiento de misiles intercontinentales durante la Guerra Fría. Con el tiempo, estas bases evolucionaron para convertirse en instalaciones especializadas en el lanzamiento de satélites, naves tripuladas y misiones científicas (Musa, 2020).

El estudio titulado Soluciones ingenieriles ante la elevación del mar para la implementación en estudio de un puerto espacial en la costa ecuatoriana proporciona una definición clara de lo que constituye un puerto espacial. Este se define como un conjunto de instalaciones diseñadas para facilitar la colaboración técnica y el lanzamiento de cohetes y naves espaciales. Actúa como un punto de convergencia para todos los elementos necesarios para llevar a cabo un vuelo espacial. Los componentes necesarios para el lanzamiento llegan a estas instalaciones a través de diversos medios de transporte, como el aire, el tren, el agua o la tierra. Una vez en el lugar, se ensamblan para formar

el vehículo de lanzamiento. Luego se añade el combustible y, si la misión lo requiere, se incorpora la tripulación humana (Iñiguez Noboa, 2019).

Figura 5. Esquema de un puerto espacial standart



Fuente: tomado de “Soluciones Ingenieriles ante la elevación del mar para la implementación de un Puerto Espacial en la costa Ecuatoriana”, por Iñiguez, 2019.

Ampliar nuestra comprensión del concepto de puerto espacial nos permite explorar diversas definiciones. En el libro “Mirando hacia las estrellas: una constante necesidad humana”, se introduce el concepto de regiones astropolíticas. La primera región abarca desde el nivel del mar hasta los 100 kilómetros, conocida como la línea de Karman. Esta región engloba la topografía terrestre y la transición hacia el espacio exterior. En este contexto, Álvarez propone la noción de un puerto espacial, que se refiere a instalaciones especializadas diseñadas para el lanzamiento y recepción de vehículos impulsados por cohetes (Álvarez et al., 2020). De este modo, los puertos espaciales se erigen como elementos críticos en la intersección entre nuestro planeta y el vasto espacio que nos rodea.

Otra definición de puerto espacial se encuentra en el estudio *Selección de un Puerto Espacial en Indonesia Basada en Análisis Multicriterio: Un Estudio sobre la Importancia Relativa y Prioridad Respecto a los Atributos de la Ubicación de Selección del Puerto Espacial Utilizando el Método Multicriterio*. Aquí, un puerto espacial se describe como un área terrestre o acuática utilizada o prevista para el lanzamiento y la recuperación de vehículos espaciales, ya sean orbitales o suborbitales. Esta definición abarca tanto la ubicación física como las infraestructuras y edificios asociados. Estas

instalaciones están diseñadas para desempeñar diversas funciones cruciales en las misiones espaciales, que incluyen la integración de componentes de vehículos de lanzamiento, el emparejamiento de vehículos con sus cargas útiles, el suministro y el mantenimiento de vehículos, y finalmente, el lanzamiento al espacio (Perwitasari, 2019).

Teniendo en cuenta que un puerto espacial forma parte del proceso de lanzamiento de activos espaciales y considerando las definiciones previas, podemos consolidar nuestra comprensión de un puerto espacial como un conjunto especializado de instalaciones, ubicado tanto en tierra como en agua, diseñado específicamente para facilitar el lanzamiento y la recuperación de vehículos de acceso al espacio. Esta infraestructura desempeña funciones cruciales, que abarcan desde la integración de componentes de vehículos de lanzamiento hasta el suministro y mantenimiento de combustible de los vehículos. Como elemento esencial en cualquier misión espacial, un puerto espacial también puede gestionar la preparación e integración de las tripulaciones necesarias y facilitar su lanzamiento al espacio. Con esta definición de puerto espacial en mente, el siguiente paso es identificar los criterios que influyen en la selección de una ubicación para el lanzamiento de activos espaciales. Estos criterios se han recopilado a partir de la revisión de la literatura y ofrecen una guía general para determinar la ubicación de un puerto espacial (Tabla 1).

Tabla 1. *Criterios técnicos de algunos estudios previos sobre la selección de la ubicación de un puerto espacial*

CRITERIOS TÉCNICOS					
ESTUDIO	LUGAR	AUTOR	MÉTODO	CRITERIOS	CRITERIOS COMUNES
1 Indonesia Spaceport Selection Based on Multicriteria Analysis (2018)	Indonesia	Intan Perwitasari	APH	• Distancia al ecuador. • Zona de lanzamiento. • Trayectoria de vuelo. • Cercanía a instalaciones militares. • Crecimiento económico.	• Distancia al ecuador • Trayectoria de vuelo • Seguridad física e instalaciones. • Infraestructura.

CRITERIOS TÉCNICOS					
ESTUDIO	LUGAR	AUTOR	MÉTODO	CRITERIOS	CRITERIOS COMUNES
2	Spaceport Selection Using a Novel Hybrid Pythagorean Fuzzy AHP (2022)	Turquía	Enes Demiralay, Engin Hasan, Turan Paksoy	AHP	• Distancia al Ecuador. • Infraestructura principal y de apoyo. • Trayectoria de vuelo. • Densidad de población. • Fiabilidad. • Seguridad del puerto espacial. • Costo de Operación. • Costo de transporte. • Meteorología. • Desastre potencial.
3	Spaceport Site Selection with Analytical Hierarchy Process Decision Making	Indonesia	M. Dachyar, Herry Purnomo	AHP	• Vehículos de lanzamiento. • Tipo de órbita. • Plataforma de lanzamiento. • Transporte. • Infraestructura. • Densidad de población. • Trayectoria de vuelo. • Clima. • Desastre potencial. • Ubicación geográfica. • Industria del turismo.
4	Liverpool (John Lennon) Spaceport Feasibility	Inglaterra	Alan Cross, Chris Atherton	AHP	• Factor de seguridad • Sitios de aterrizaje de emergencia • Condiciones meteorológicas • Preocupaciones medioambientales • Cuestiones económicas • Avance de la ciencia e innovación.

CRITERIOS TÉCNICOS					
ESTUDIO	LUGAR	AUTOR	MÉTODO	CRITERIOS	CRITERIOS COMUNES
5	Spaceport Design for Safety	Guayana Francesa	Isabelle Rongier	APH	-Posibilidad de lanzamientos polares y ecuatoriales. -Proximidad al Ecuador. -Tamaño del sitio para la -seguridad del lanzamiento. -Puerto de aguas profundas con suficientes instalaciones de manejo. -Un aeródromo capaz de recepcionar un avión de largo alcance. -Estabilidad política

Los criterios comunes para la selección de la ubicación de un puerto espacial incluyen:

- 1. Distancia al ecuador:** La proximidad al ecuador es una ventaja para los lanzamientos espaciales, ya que permite aprovechar la velocidad de rotación de la Tierra para proporcionar un impulso adicional a los cohetes durante el despegue.
- 2. Trayectoria de vuelo:** La ubicación geográfica de Colombia permite una variedad de trayectorias de vuelo, siendo preferible el lanzamiento hacia el este sobre el océano Atlántico para evitar sobrevolar zonas pobladas durante la fase inicial del vuelo, garantizando así la seguridad.
- 3. Seguridad de las instalaciones:** Se deben considerar factores como terremotos, inundaciones, huracanes y otros desastres naturales al evaluar la seguridad física de las instalaciones. Además, se requerirán medidas de seguridad para prevenir sabotajes o actos de terrorismo.
- 4. Infraestructura:** El puerto espacial debe contar con instalaciones de lanzamiento y control, almacenamiento de combustible, servicios de transporte y logística, bancos de prueba, soporte operativo y mantenimiento de activos espaciales.

5. **Meteorología:** Las condiciones meteorológicas pueden tener un impacto significativo en los lanzamientos. La ubicación debe considerar factores como vientos fuertes, lluvias y tormentas eléctricas que puedan poner en riesgo el lanzamiento.
6. **Costo de transporte:** El costo de transporte hacia y desde el sitio de lanzamiento es un factor crucial. Las vías de acceso deben ser adecuadas y permitir la construcción o mejora según sea necesario.
7. **Ubicación geográfica:** Además de la cercanía al ecuador, es beneficioso que el sitio esté cerca del mar para permitir lanzamientos sobre agua. Además, debe contar con suficiente espacio para las instalaciones y estar alejado de áreas densamente pobladas.
8. **Riesgos de desastre:** Tanto los desastres naturales (terremotos, inundaciones, huracanes) como los provocados por humanos (incendios, explosiones, accidentes de lanzamiento) deben ser considerados en la planificación del sitio.
9. **Sitios de aterrizaje de emergencia:** Deben existir lugares de aterrizaje de emergencia en caso de anomalías durante el lanzamiento que requieran un aterrizaje forzoso. Estos sitios deben estar alejados de áreas pobladas para minimizar riesgos.

La evaluación de estos criterios permitirá determinar la ubicación más adecuada para un puerto espacial en Colombia, considerando tanto la seguridad como la eficiencia de los lanzamientos y el desarrollo del sector espacial en el país.

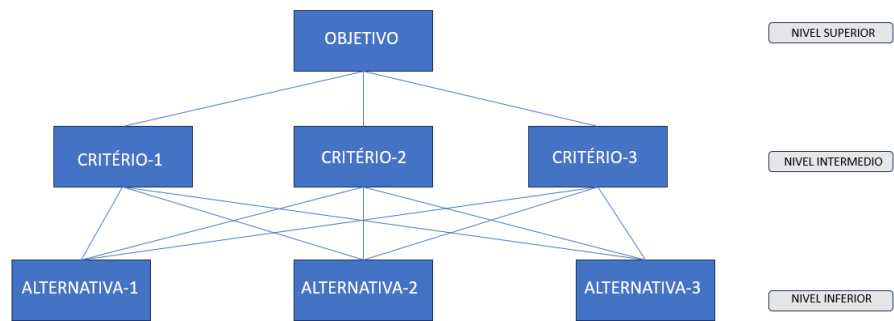
Propuesta de una Matriz de Análisis Multicriterio para la Identificación de Sitios Potenciales de Lanzamiento Espacial en Colombia

Para identificar las posibles ubicaciones de lanzamiento de activos espaciales en Colombia, se requiere proponer una matriz de análisis jerárquico multicriterio, conocida por sus siglas en inglés como Analytic Hierarchy Process (APH). Esta matriz permitirá evaluar de manera integral y comparar distintas ubicaciones de lanzamiento en el país. El análisis jerárquico multicriterio ha sido empleado en diversos estudios previos para seleccionar ubicaciones de lanzamiento de activos estratégicos en distintos países. Se trata de un enfoque cuantitativo que selecciona alternativas considerando una serie de criterios jerárquicos, que con frecuencia entran en conflicto entre sí.

La matriz abarca criterios desglosados en subcriterios, organizados en diferentes niveles. El nivel superior representa el objetivo principal, el nivel intermedio

comprende los criterios y/o subcriterios, mientras que el nivel inferior engloba las alternativas propuestas para las ubicaciones de lanzamiento (Pant et al., 2022).

Figura 6. *Ejemplo Estructura Jerárquica AHP*



Fuente: tomado de Consistency Indices in Analytic Hierarchy Process: A Review, por Sangeeta Pant et al., 2022.

Para comparar los criterios de un mismo nivel se emplean matrices de comparación pareada. Para este propósito, se utiliza la escala de valoración desarrollada por Thomas Saaty, el creador del método APH en 1980 (Pant et al., 2022). La clave fundamental de este método radica en el uso de una escala de comparación por pares. Esto se debe a que el cerebro humano es eficiente al comparar dos criterios o alternativas, pero enfrenta dificultades en comparaciones conjuntas. El AHP utiliza una escala que va del 1 al 9 (Ver Tabla 2), la cual ha demostrado su eficacia en diversas situaciones reales (Delgado & Romero, 2018).

Tabla 2. *Escala de valoración de Saatty, 1980.*

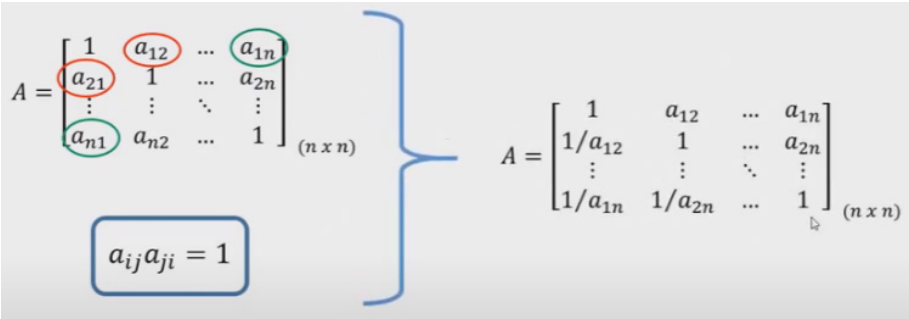
Valor	Definición	Comentarios
1	Igual importancia	El criterio A es igual de importante que el criterio B
3	Importancia moderada	La experiencia y el juicio favorecen ligeramente al criterio A sobre B
5	Importancia grande	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente el criterio A sobre el B
7	Importancia muy grande	El criterio A es mucho más importante que el criterio B

Valor	Definición	Comentarios
9	Importancia Extrema	La mayor importancia del criterio A sobre el criterio B está fuera de toda duda
2,4,6 Y 8	Valores intermedios entre los anteriores, cuando es necesario matizar	

Fuente: adaptado de “Selection of a method for social impact assessment using AHP”, por Delgado y Romero, 2018.

Para validar la coherencia de los juicios derivados de la matriz de comparaciones pareadas, el método AHP proporciona la Razón de Consistencia (RC). Esta medida nos permite evaluar si la matriz exhibe una consistencia aceptable o, por el contrario, si muestra inconsistencias. A continuación, la Figura 7 presenta una representación de la matriz comparativa pareada junto con el cálculo de la Razón de Consistencia.

Figura 7. Ejemplo de una matriz de análisis jerárquico



Fuente: adaptado de “Selection of a method for social impact assessment using AHP”, por Delgado y Romero, 2018.

La matriz de análisis de comparación pareada compara los valores en una matriz donde N corresponde al número de variables, dependiendo de los criterios seleccionados en el análisis. De esta forma, el número de comparaciones, denominado NC, se calcula como sigue:

$$NC = n(n-1) / 2$$

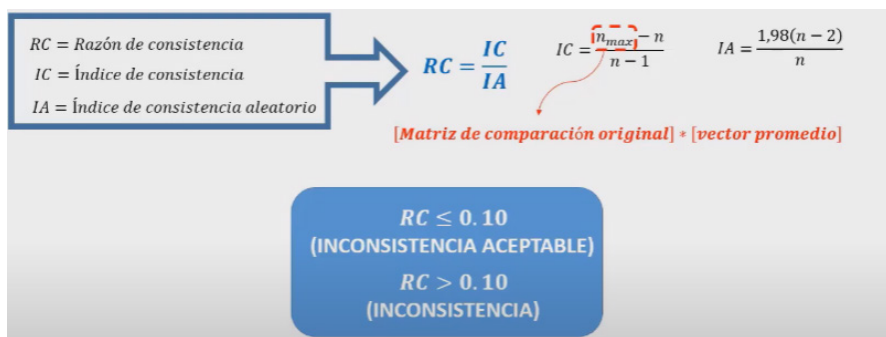
En el caso de la matriz de ejemplo, se cuenta con un conjunto de variables N igual a 3. Esto implica que se trata de una matriz de comparación pareada de dimensiones 3×3 . Los valores de 1 en la diagonal representan la comparación entre las mismas variables, y se establecen en 1 debido a que estas comparaciones se cancelan al ser evaluadas una contra otra en la matriz pareada. Así, al aplicar la fórmula para NC , el cálculo se desarrolla de la siguiente manera:

$$NC = 3(3-1) / 2 = 3$$

En este contexto, el número 3 representa la cantidad de comparaciones posibles, que se plasman en la sección superior e inferior de la diagonal en la matriz. En consecuencia, podemos afirmar que en esta matriz de ejemplo se pueden llevar a cabo un total de 3 comparaciones.

Ahora bien, la razón de consistencia corresponde a la formula mostrada en la Figura 8:

Figura 8. Razón de consistencia



Fuente: adaptado de “Selection of a method for social impact assessment using AHP”, por Delgado y Romero, 2018.

Con la ayuda de la Razón de Consistencia (RC), podemos evaluar la congruencia de los juicios extraídos de la matriz pareada. De este modo, determinamos si la RC es menor o igual a 0.10. En ese caso, la inconsistencia se considera aceptable. Por otro lado, si la RC supera el valor de 0.1, indica que hay una inconsistencia en los juicios y, en consecuencia, la matriz debe ser reevaluada.

Siguiendo el enfoque del análisis jerárquico multicriterio y basándonos en los factores técnicos establecidos en los análisis previos de diversos estudios para determinar la óptima ubicación de un puerto espacial para lanzar activos espaciales, se han identificado 9 criterios técnicos comunes que deben ser analizados mediante el método AHP. Estos criterios son los siguientes:

- Distancia al Ecuador
- Trayectoria de vuelo
- Seguridad física de instalaciones
- Infraestructura
- Meteorología
- Costo de transporte
- Ubicación geográfica
- Desastre potencial
- Sitios de aterrizaje de emergencia

Adicionalmente, al examinar la literatura y los estudios realizados en Colombia, se han identificado 4 posibles alternativas para la ubicación del lanzamiento de activos espaciales, evidenciados en la Figura 9.

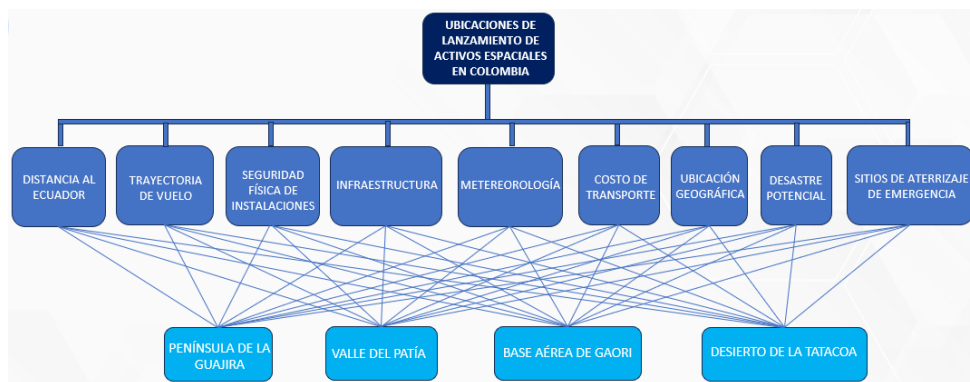
Figura 9. *Alternativas posibles de lanzamiento de activos espaciales*



Fuente: adaptado de “Geopolítica del espacio exterior: dominio estratégico del siglo XXI para la seguridad y defensa”, por Álvarez et al., 2020.

Con el objetivo principal, los criterios y las alternativas establecidas en los tres niveles de la estructura del método jerárquico, superior, medio e inferior respectivamente, podemos establecer la estructura jerárquica de nuestro problema en cuestión (Figura 10).

Figura 10. Estructura jerárquica APH



Fuente: elaboración propia.

Dentro de la estructura jerárquica, en el primer nivel, se destaca el objetivo principal: determinar la mejor ubicación para el lanzamiento de activos espaciales en Colombia. En el segundo nivel, se desglosan los 9 criterios que serán evaluados y ponderados en una matriz de dimensiones 9 x 9. En el último nivel, se presentan las 4 alternativas de ubicación junto con sus respectivas interacciones en relación a los diferentes criterios. Estas interacciones serán sometidas a comparaciones pareadas en las diversas matrices.

Siguiendo el esquema descrito, la matriz a utilizar será de 9 x 9, donde N es igual a 9, y el cálculo del número de comparaciones se determina mediante la fórmula:

$$NC = 9(9-1) / 2, NC=36$$

Aplicando la matriz de comparación pareada a los 9 criterios, determinamos el vector promedio de la matriz (Figura 11).

Figura 11. Matriz pareada de valoración de juicios.

MATRIZ DE COMPARACION POR PARES CRITERIOS																					
N	CRITERIO	Distancia al Ecuador	Trayectoria de vuelo	Seguridad física de instalaciones	Infraestructura	Meteorología	Costo de transporte	Ubicación geográfica	Desastre potencial	Sitios de Aterrizaje de emergencia	MATRIZ NORMALIZADA										VECTOR PROMEDIO
1	DISTANCIA AL ECUADOR	1,00	1,00	5,00	2,00	2,00	5,00	1,00	0,20	0,20	0,07	0,10	0,15	0,17	0,08	0,17	0,09	0,04	0,05	0,10	
2	TRAYECTORIA DE VUELO	1,00	1,00	5,00	2,00	4,00	5,00	1,00	0,20	1,00	0,07	0,10	0,15	0,17	0,16	0,17	0,09	0,04	0,23	0,13	
3	SEGURIDAD FISICA DE INSTALACIONES	0,20	0,20	1,00	0,25	0,33	2,00	0,25	0,20	0,17	0,01	0,02	0,03	0,02	0,01	0,07	0,02	0,04	0,04	0,03	
4	INFRAESTRUCTURA	0,50	0,50	4,00	1,00	2,00	3,00	2,00	1,00	0,25	0,03	0,05	0,12	0,09	0,08	0,10	0,17	0,22	0,06	0,10	
5	METEOROLOGIA	0,50	0,25	3,00	0,50	1,00	2,00	0,25	0,17	0,20	0,03	0,02	0,09	0,04	0,04	0,07	0,02	0,04	0,05	0,04	
6	COSTO DE TRANSPORTE	0,20	0,20	0,50	0,33	0,50	1,00	1,00	0,20	0,17	0,01	0,02	0,01	0,03	0,02	0,03	0,09	0,04	0,04	0,03	
7	UBICACIÓN GEOGRÁFICA	1,00	1,00	4,00	0,50	4,00	1,00	1,00	0,50	0,33	0,07	0,10	0,12	0,04	0,16	0,03	0,09	0,11	0,08	0,09	
8	DESASTRE POTENCIAL	5,00	5,00	5,00	1,00	6,00	5,00	2,00	1,00	1,00	0,35	0,49	0,15	0,09	0,24	0,17	0,17	0,22	0,23	0,23	
9	SITIOS DE ATERRIZAJE DE EMERGENCIA	5,00	1,00	6,00	4,00	5,00	6,00	3,00	1,00	1,00	0,35	0,10	0,18	0,35	0,20	0,20	0,26	0,22	0,23	0,23	
	SUMA	14,40	10,15	33,50	11,58	24,83	30,00	11,50	4,47	4,32											

Fuente: elaboración propia.

Posterior a realizar la matriz de comparación pareada con respecto a los N=9 criterios evaluamos la congruencia de juicios aplicando la fórmula de la Razón de Consistencia (Ver Figura 12).

Figura 12. Matriz de congruencia de juicios

ANALISIS DE CONSISTENCIA													Indice de consistencia	
1,00	1,00	5,00	2,00	2,00	5,00	1,00	0,20	0,20			0,10		1,03	IC= 0,15
1,00	1,00	5,00	2,00	4,00	5,00	1,00	0,20	1,00			0,13		1,30	
0,20	0,20	1,00	0,25	0,33	2,00	0,25	0,20	0,17			0,03		0,29	Indice aleatorio IA= 1,54
0,50	0,50	4,00	1,00	2,00	3,00	2,00	1,00	0,25			0,10		1,00	
0,50	0,25	3,00	0,50	1,00	2,00	0,25	0,17	0,20		x	0,04		0,44	Razón de consis RC= 0,10
0,20	0,20	0,50	0,33	0,50	1,00	1,00	0,20	0,17			0,03		0,33	
1,00	1,00	4,00	0,50	4,00	1,00	1,00	0,50	0,33			0,09		0,90	
5,00	5,00	5,00	1,00	6,00	5,00	2,00	1,00	1,00			0,23		2,50	
5,00	1,00	6,00	4,00	5,00	6,00	3,00	1,00	1,00			0,23		2,39	
											Nmax=	10,19		

Fuente: elaboración propia.

$$IC= Nmax-n /n-1 = 10,19 - 9/ 9-1 = 0,15$$

$$IA= 1,98 (n-2)/n = 1,98 (9-2) /9 = 1,54$$

$$RC= IC/IA = 0,15 /1,54 = 0,10$$

De este modo, hemos obtenido que la RC = 0.10, lo cual cumple con la regla de la Razón de Consistencia siendo menor o igual a 0.1. Esto confirma una Razón de Consistencia aceptable para la matriz en consideración.

Luego de realizar las comparaciones pareadas en la matriz correspondiente al segundo nivel de la estructura jerárquica del método AHP, el siguiente paso consiste en continuar con la creación de las demás matrices de pareo. Estas matrices deben ser elaboradas considerando la interacción de los 9 criterios del segundo nivel con las 4 alternativas del tercer nivel. Esto resulta en matrices de dimensiones 4 x 4 (Figura 13).

Figura 13. *Matrices de comparación pareada entre matrices del segundo y tercer nivel de la estructura Jerárquica APH*

Importancia Relativa de las Ubicaciones con Respecto al Criterio DISTANCIA AL ECUADOR									
Ubicaciones	PENÍNSULA DE LA GUAJIRA	BASE AÉREA DE GAORI	VALLE DEL PATÍA	DESIERTO DE LA TATACOA	MATRIZ NORMALIZADA				VECTOR PROMEDIO
PENÍNSULA DE LA GUAJIRA	1,00	5,00	3,00	5,00	0,58	0,48	0,67	0,42	0,53
BASE AÉREA DE GAORI	0,20	1,00	0,25	2,00	0,12	0,10	0,06	0,17	0,11
VALLE DEL PATÍA	0,33	4,00	1,00	4,00	0,19	0,38	0,22	0,33	0,28
DESIERTO DE LA TATACOA	0,20	0,50	0,25	1,00	0,12	0,05	0,06	0,08	0,08
SUMA	1,73	10,50	4,50	12,00					

Importancia Relativa de las Ubicaciones con Respecto al Criterio TRAYECTORIA DE VUELO									
Ubicaciones	PENÍNSULA DE LA GUAJIRA	BASE AÉREA DE GAORI	VALLE DEL PATÍA	DESIERTO DE LA TATACOA	MATRIZ NORMALIZADA				VECTOR PROMEDIO
PENÍNSULA DE LA GUAJIRA	1,00	5,00	4,00	5,00	0,61	0,48	0,73	0,42	0,56
BASE AÉREA DE GAORI	0,20	1,00	0,25	2,00	0,12	0,10	0,05	0,17	0,11
VALLE DEL PATÍA	0,25	4,00	1,00	4,00	0,15	0,38	0,18	0,33	0,26
DESIERTO DE LA TATACOA	0,20	0,50	0,25	1,00	0,12	0,05	0,05	0,08	0,07
SUMA	1,65	10,50	5,50	12,00					

Importancia Relativa de las Ubicaciones con Respecto al Criterio SEGURIDAD FÍSICA DE INSTALACIONES									
Ubicaciones	PENÍNSULA DE LA GUAJIRA	BASE AÉREA DE GAORI	VALLE DEL PATÍA	DESIERTO DE LA TATACOA	MATRIZ NORMALIZADA				VECTOR PROMEDIO
PENÍNSULA DE LA GUAJIRA	1,00	0,20	4,00	4,00	0,15	0,13	0,39	0,31	0,24
BASE AÉREA DE GAORI	5,00	1,00	5,00	5,00	0,77	0,63	0,48	0,38	0,57
VALLE DEL PATÍA	0,25	0,20	1,00	3,00	0,04	0,13	0,10	0,23	0,12
DESIERTO DE LA TATACOA	0,25	0,20	0,33	1,00	0,04	0,13	0,03	0,08	0,07
SUMA	6.50	1.60	10.33	13.00					

Importancia Relativa de las Ubicaciones con Respecto al Criterio INFRAESTRUCTURA									
Ubicaciones	PENÍNSULA DE LA GUAJIRA	BASE AÉREA DE GAORI	VALLE DEL PATÍA	DESIERTO DE LA TATACOA	MATRIZ NORMALIZADA				VECTOR PROMEDIO
PENÍNSULA DE LA GUAJIRA	1,00	3,00	4,00	4,00	0,55	0,64	0,47	0,40	0,51
BASE AÉREA DE GAORI	0,33	1,00	3,00	3,00	0,18	0,21	0,35	0,30	0,26
VALLE DEL PATÍA	0,25	0,33	1,00	2,00	0,14	0,07	0,12	0,20	0,13
DESIERTO DE LA TATACOA	0,25	0,33	0,50	1,00	0,14	0,07	0,06	0,10	0,09
SUMA	1,83	4,67	8,50	10,00					

Importancia Relativa de las Ubicaciones con Respecto al Criterio METEREOLÓGIA									
Ubicaciones	PENÍNSULA DE LA GUAJIRA	BASE AÉREA DE GAORI	VALLE DEL PATÍA	DESIERTO DE LA TATACOA	MATRIZ NORMALIZADA				VECTOR PROMEDIO
PENÍNSULA DE LA GUAJIRA	1,00	5,00	3,00	2,00	0,49	0,54	0,30	0,55	0,47
BASE AÉREA DE GAORI	0,20	1,00	3,00	0,33	0,10	0,11	0,30	0,09	0,15
VALLE DEL PATÍA	0,33	0,33	1,00	0,33	0,16	0,04	0,10	0,09	0,10
DESIERTO DE LA TATACOA	0,50	3,00	3,00	1,00	0,25	0,32	0,30	0,27	0,29
SUMA	2,03	9,33	10,00	3,67					

Importancia Relativa de las Ubicaciones con Respecto al Criterio COSTO DE TRANSPORTE									
Ubicaciones	PENÍNSULA DE LA GUAJIRA	BASE AÉREA DE GAORI	VALLE DEL PATÍA	DESIERTO DE LA TATACOA	MATRIZ NORMALIZADA				VECTOR PROMEDIO
PENÍNSULA DE LA GUAJIRA	1,00	4,00	0,33	0,50	0,16	0,40	0,15	0,13	0,21
BASE AÉREA DE GAORI	0,25	1,00	0,33	0,50	0,04	0,10	0,15	0,13	0,10
VALLE DEL PATÍA	3,00	3,00	1,00	2,00	0,48	0,30	0,46	0,50	0,44
DESIERTO DE LA TATACOA	2,00	2,00	0,50	1,00	0,32	0,20	0,23	0,25	0,25
SUMA	6,25	10,00	2,17	4,00					

Importancia Relativa de las Ubicaciones con Respecto al Criterio UBICACIÓN GEOGRÁFICA									
Ubicaciones	PENÍNSULA DE LA GUAJIRA	BASE AÉREA DE GAORI	VALLE DEL PATÍA	DESIERTO DE LA TATACOA	MATRIZ NORMALIZADA				VECTOR PROMEDIO
PENÍNSULA DE LA GUAJIRA	1,00	5,00	4,00	5,00	0,61	0,53	0,72	0,45	0,58
BASE AÉREA DE GAORI	0,20	1,00	0,25	2,00	0,12	0,11	0,04	0,18	0,11
VALLE DEL PATÍA	0,25	3,00	1,00	3,00	0,15	0,32	0,18	0,27	0,23
DESIERTO DE LA TATACOA	0,20	0,50	0,33	1,00	0,12	0,05	0,06	0,09	0,08
SUMA	1,65	9,50	5,58	11,00					

Importancia Relativa de las Ubicaciones con Respecto al Criterio DESASTRE POTENCIAL									
Ubicaciones	PENÍNSULA DE LA GUAJIRA	BASE AÉREA DE GAORI	VALLE DEL PATÍA	DESIERTO DE LA TATACOA	MATRIZ NORMALIZADA				VECTOR PROMEDIO
PENÍNSULA DE LA GUAJIRA	1,00	0,25	0,25	0,33	0,08	0,03	0,14	0,06	0,08
BASE AÉREA DE GAORI	4,00	1,00	0,25	0,50	0,33	0,14	0,14	0,09	0,17
VALLE DEL PATÍA	4,00	4,00	1,00	4,00	0,33	0,55	0,57	0,69	0,54
DESIERTO DE LA TATACOA	3,00	2,00	0,25	1,00	0,25	0,28	0,14	0,17	0,21
SUMA	12,00	7,25	1,75	5,83					

Importancia Relativa de las Ubicaciones con Respecto al Criterio SITIOS DE ATERRIZAJE DE EMERGENCIA									
Ubicaciones	PENÍNSULA DE LA GUAJIRA	BASE AÉREA DE GAORI	VALLE DEL PATÍA	DESIERTO DE LA TATACOA	MATRIZ NORMALIZADA				VECTOR PROMEDIO
PENÍNSULA DE LA GUAJIRA	1,00	5,00	5,00	4,00	0,61	0,53	0,42	0,72	0,57
BASE AÉREA DE GAORI	0,20	1,00	2,00	0,33	0,12	0,11	0,17	0,06	0,11
VALLE DEL PATÍA	0,20	0,50	1,00	0,25	0,12	0,05	0,08	0,04	0,08
DESIERTO DE LA TATACOA	0,25	3,00	4,00	1,00	0,15	0,32	0,33	0,18	0,24
SUMA	1,65	9,50	12,00	5,58					

Fuente: elaboración propia.

Tras la elaboración de las 9 matrices de comparación pareada que involucran los 9 criterios del segundo nivel y las 4 alternativas del tercer nivel dentro de la estructura del método jerárquico AHP, se procede a calcular los vectores promedio para cada criterio ponderado. Luego, se determina la ponderación de la matriz principal. A continuación, se lleva a cabo la multiplicación de cada vector correspondiente a cada criterio por su respectiva ponderación. A medida que se realiza esta operación con los distintos criterios, se suman los resultados obtenidos en cada iteración. Este proceso se repite para las 4 alternativas, siguiendo la misma metodología (Figura 14).

Figura 14. Matriz de alternativas

Ubicaciones	Distancia al ecuador	Trayectoria de vuelo	Seguridad física de instalaciones	Infraestructura	Meteorología	Costo de transporte	Ubicación geográfica	Desastre potencial	Sitios de Aterrizaje de emergencia	TOTAL
PENÍNSULA DE LA GUAJIRA	0,53	0,56	0,24	0,51	0,47	0,21	0,58	0,08	0,57	0,42
BASE AÉREA DE GAORI	0,11	0,11	0,57	0,26	0,15	0,10	0,11	0,17	0,11	0,16
VALLE DEL PATÍA	0,28	0,26	0,12	0,13	0,10	0,44	0,23	0,54	0,08	0,26
DESIERTO DE LA TATACOA	0,08	0,07	0,07	0,09	0,29	0,25	0,08	0,21	0,24	0,16
PONDERACIÓN	0,10	0,13	0,03	0,10	0,04	0,03	0,09	0,23	0,23	

Fuente: elaboración propia.

Considerando las etapas previas de análisis jerárquico de las potenciales ubicaciones para el lanzamiento de activos espaciales en Colombia, se ha llegado a una conclusión. Al evaluar los criterios del segundo nivel y las alternativas del tercer nivel, se ha determinado la mejor ubicación (Fig. 15).

Figura 15. Alternativas ponderadas

Mejor ubicación según el método de análisis jerárquico	
Península de la Guajira	0,42
Valle del Patía	0,26
Base Aérea de Gaori	0,16
Desierto de la Tatacoa	0,16



Fuente: elaboración propia con base en Google Earth.

Habiendo completado el proceso de análisis jerárquico para determinar la mejor ubicación de lanzamiento de activos espaciales en Colombia, se puede concluir lo siguiente:

El desarrollo de una capacidad propia de lanzamiento de activos espaciales se considera una herramienta estratégica de alta potencialidad para reducir la incertidumbre y la fricción en escenarios bélicos. Para lograr un equilibrio regional y obtener superioridad estratégica y táctica en caso de conflicto, el desarrollo y explotación espacial son elementos fundamentales que permiten una visión y preparación en tiempo real.

Particularmente para un país en desarrollo como Colombia, el espacio exterior ofrece ventajas vitales para las estrategias de seguridad, defensa y desarrollo

social y económico. Aunque Colombia ha expresado su interés en desarrollar una capacidad nacional para el lanzamiento de activos espaciales, enfrenta desafíos políticos que tienen implicaciones importantes para la seguridad y defensa nacional.

La creación y explotación de un puerto para lanzar activos espaciales trae consigo múltiples beneficios para Colombia. No solo se obtienen ventajas en el ámbito militar y de inteligencia, como la captura de imágenes de alta calidad para decisiones estratégicas y pronósticos meteorológicos precisos en tiempo real, sino que también se perciben ganancias tecnológicas, económicas y en el sector de las comunicaciones. Desde el punto de vista tecnológico, participar activamente en la exploración espacial impulsa la innovación y el desarrollo de tecnologías avanzadas, colocando a Colombia en la vanguardia del progreso científico y de innovación en la región.

Económicamente, el sector espacial es un motor de crecimiento, no solo por la fabricación y capacidad de lanzamiento de activos espaciales, sino también por las múltiples aplicaciones derivadas, como la teledetección, que abarca la toma de imágenes para diversos usos que van desde el monitoreo agrícola hasta la planificación urbana. Además, su uso en imágenes meteorológicas tiene un impacto directo en sectores tan diversos como la agricultura, la aviación y la energía, mejorando las previsiones y permitiendo optimizar recursos y reducir riesgos.

Desde el ámbito de las comunicaciones, la explotación espacial permite una mejor conectividad a nivel nacional, especialmente en regiones de difícil acceso, brindando oportunidades de educación, salud y negocios a poblaciones anteriormente desconectadas.

A pesar de estos innumerables beneficios, la falta de una agencia espacial propia en Colombia limita su capacidad para aprovechar plenamente estas ventajas. Por lo tanto, es esencial que se implemente una política estatal fuerte y visionaria que impulse capacidades autónomas de recursos espaciales, permitiendo no solo fortalecer la seguridad nacional, sino también catalizar el desarrollo socioeconómico y tecnológico del país en el escenario global.

A pesar de contar con ventajas geográficas que podrían posicionar a Colombia como un país referente en el desarrollo espacial, ha enfrentado dificultades para consolidarse en este campo hasta la fecha. Superar estos desafíos y desarrollar una capacidad nacional de lanzamiento de activos espaciales será crucial para el avance y fortalecimiento de la seguridad y desarrollo del país en el ámbito espacial.

Se identificaron varios criterios técnicos para la selección de la ubicación de un puerto espacial basándose en la revisión de la literatura. Estos criterios incluyen la distancia al ecuador, la trayectoria de vuelo, la seguridad física de las instalaciones, la infraestructura, la meteorología, el costo de transporte, la ubicación geográfica, el potencial de desastre y la disponibilidad de sitios de aterrizaje de emergencia.

Colombia tiene varias ventajas para la ubicación de un puerto espacial. Entre ellas, su proximidad al ecuador, que proporciona un impulso adicional a los lanzamientos, y su posición geográfica que permite una gama de trayectorias de vuelo, incluyendo el lanzamiento hacia el este sobre el océano Atlántico.

La propuesta de una Matriz de Análisis Multicriterio para la Identificación de Sitios Potenciales de Lanzamiento Espacial en Colombia se basa en el método de análisis jerárquico multicriterio (APH). Este método permite evaluar y comparar diferentes ubicaciones de lanzamiento en Colombia de manera integral. Para ello, se empleó una estructura jerárquica multicriterio basada en el método de Thomas Satty (1980) en donde se establecieron matrices de comparación pareada que han demostrado ser efectivas en diferentes estudios de selección de una ubicación para un sitio de lanzamiento de activos espaciales.

La estructura jerárquica del análisis consta de tres niveles: el objetivo principal, los criterios y las alternativas de ubicación. Se establecieron 9 criterios técnicos comunes para la evaluación, tales como distancia al Ecuador, trayectoria de vuelo, seguridad física de instalaciones, infraestructura, meteorología, costo de transporte, ubicación geográfica, desastre potencial y sitios de aterrizaje de emergencia.

Para validar la congruencia de los juicios obtenidos en la matriz de comparaciones pareadas, se calculó la Razón de Consistencia (RC). Si la RC daba menor o igual a 0.10, se considera que los juicios son consistentes. En este caso, la RC obtenida fue de 0.10, lo cual indicó que los juicios fueron aceptables.

Se procedió a comparar los criterios del segundo nivel con las alternativas del tercer nivel mediante matrices de comparación pareada de 4x4. Luego, se obtuvieron los vectores promedio y se ponderaron según la matriz principal.

La ubicación que obtuvo la mayor puntuación en el análisis jerárquico fue la Península de la Guajira, con una puntuación de 0.42, le siguieron el Valle del Patía, la Base Aérea de Gaori y el Desierto de la Tatacoa, todos con puntuaciones menores.

De acuerdo con la matriz de análisis jerárquico multicriterio, la Península de la Guajira surge como la mejor alternativa entre las 4 posiciones geográficas evaluadas. Sin embargo, esto no implica que sea el único lugar factible para considerar. Por ejemplo, Malpelo podría representar una opción geográfica viable entre otras zonas. Sería interesante abordar otras localizaciones potenciales en futuras investigaciones, como la propuesta en el presente artículo.

El desarrollo de capacidades espaciales propias y la selección adecuada de ubicaciones de lanzamiento son aspectos cruciales para el avance y fortalecimiento de Colombia en el ámbito espacial. La adopción de enfoques analíticos y estratégicos, como la Matriz de Análisis Multicriterio basada en el método APH, proporciona una herramienta efectiva y objetiva para tomar decisiones informadas y mejorar la seguridad y el desarrollo del país en temas espaciales. La identificación de la mejor ubicación potencial en la Península de la Guajira representa un paso significativo hacia el establecimiento de una capacidad nacional de lanzamiento de activos espaciales en Colombia. La Península de la Guajira se identifica como la mejor ubicación potencial para el lanzamiento de activos espaciales en el territorio nacional, según el análisis jerárquico multicriterio. Este enfoque proporciona una herramienta estratégica para la selección de sitios de lanzamiento de manera objetiva y basada en criterios técnicos.

Conclusiones

El desarrollo de una capacidad nacional para el lanzamiento de activos espaciales desde territorio colombiano es un paso estratégico fundamental para fortalecer la soberanía espacial del país, reducir la dependencia de actores internacionales y potenciar el desarrollo tecnológico, económico y de seguridad nacional. En este contexto, este capítulo ha abordado de manera integral los desafíos técnicos y políticos que implica la implementación de un puerto espacial en Colombia, estableciendo criterios para la selección de la ubicación óptima y destacando su importancia estratégica.

El análisis demuestra que, pese a los obstáculos políticos y financieros, Colombia posee condiciones geográficas favorables, como su proximidad al ecuador, que le otorgan ventajas competitivas en la carrera espacial regional. La metodología de análisis multicriterio aplicada en este estudio ha permitido identificar la Península de La Guajira como la ubicación más viable para el establecimiento de un puerto espacial, seguida del Valle del Patía, la Base

Aérea de Gaori y el Desierto de la Tatacoa. Sin embargo, estos resultados no deben considerarse definitivos, ya que futuras investigaciones podrían evaluar otras ubicaciones estratégicas, como la Isla de Malpelo, entre otras.

El establecimiento de un puerto espacial en Colombia no solo fortalecería la seguridad y defensa nacional mediante la vigilancia estratégica y el control del espacio aéreo y ultraterrestre, sino que también impulsaría la innovación tecnológica y el crecimiento económico a través de la creación de empleos altamente especializados y el desarrollo de una industria espacial propia. Además, permitiría la independencia en la colocación de satélites en órbita, facilitando aplicaciones en telecomunicaciones, monitoreo ambiental y gestión de desastres naturales.

A pesar de los beneficios evidentes, el país enfrenta importantes desafíos, entre ellos la ausencia de una agencia espacial estatal con suficiente respaldo gubernamental, la necesidad de una política pública coherente y sostenida en el tiempo, y la limitada inversión en infraestructura espacial. Para avanzar en la materialización de esta capacidad, es imperativo que el gobierno colombiano desarrolle un marco institucional robusto, fomente la cooperación internacional y estimule la participación del sector privado en el desarrollo del sector espacial.

Con base en lo anterior, se realizan algunas recomendaciones:

1. **Establecer una Agencia Espacial Colombiana:** La formación de una entidad estatal enfocada para el ámbito espacial consolidará y coordinará los esfuerzos nacionales, ofreciendo coherencia y dirección a iniciativas relacionadas con el espacio. Esta agencia, además de ser el núcleo de la estrategia espacial nacional, fortalecerá la presencia de Colombia en la arena internacional, facilitando acuerdos y colaboraciones, y atrayendo inversiones y proyectos conjuntos con entidades globales.
2. **Educación, Capacitación e Investigación:** La inversión en capital humano es fundamental para el progreso en el sector espacial. Desarrollar programas educativos especializados en ciencias espaciales, promover la formación técnica y alentar la investigación, en colaboración con universidades y centros de investigación nacionales e internacionales, capacitará a Colombia para liderar y colaborar en proyectos y descubrimientos espaciales de vanguardia.
3. **Marco Legal y Cooperación Internacional:** La creación de una legislación espacial robusta es esencial para defender los intereses de Colombia y regular las actividades en el espacio. Además, establecer y

fortalecer alianzas con organismos internacionales asegurará que Colombia esté en una posición ventajosa en tratados y acuerdos, impulsando el desarrollo autónomo y sostenido del país en el ámbito espacial. Además de validar el uso de la órbita geoestacionaria.

4. **Participación del Sector Privado:** Es esencial que el sector privado se integre activamente en las iniciativas espaciales de Colombia para impulsar el desarrollo tecnológico y la innovación. Las empresas privadas, destacando por su rápida adaptabilidad y enfoque hacia la rentabilidad, tienen el potencial de acelerar tanto la investigación como la implementación de tecnologías espaciales. Su inversión y colaboración pueden complementar y solventar los desafíos financieros que los proyectos gubernamentales suelen enfrentar. Empresas como SpaceX y Blue Origin son ejemplos palpables de cómo el sector privado puede transformar la industria espacial. Por ello, Colombia, al promover alianzas entre el sector público y privado y al incentivar inversiones en este ámbito, no solo impulsará su crecimiento en el sector, sino que también generará empleo, fomentará la innovación y fortalecerá su presencia en el mercado espacial global.
5. **Implementación de un lugar de lanzamiento de activos espaciales:** Es imperativo que Colombia considere seriamente establecer un sitio de lanzamiento de activos espaciales en su propio territorio. Al tener esta capacidad propia, el país se posicionaría estratégicamente en el ámbito espacial, ganando autonomía y reduciendo la dependencia de otras naciones para el acceso al espacio. Esta inversión representaría un avance en términos de seguridad y defensa, al contar con una visión y preparación en tiempo real, además que también impulsaría el desarrollo tecnológico, científico y económico del país. Adicional, la ubicación geográfica de Colombia y su cercanía con el Ecuador, ofrece ventajas significativas para los lanzamientos, maximizando la eficiencia del combustible y permitiendo trayectorias más flexibles. A largo plazo, este tipo de infraestructura podría atraer inversiones internacionales, consolidar alianzas estratégicas y posicionar a Colombia como un actor relevante en el mercado espacial regional.

En conclusión, el presente estudio sienta las bases para la toma de decisiones informadas sobre el desarrollo de capacidades espaciales en Colombia. La aplicación de metodologías analíticas rigurosas y la formulación de políticas estratégicas permitirán que el país aproveche su posición geopolítica para convertirse en un actor relevante en la exploración y explotación del espacio exterior en América Latina. La creación de un puerto espacial en el país es más

que una aspiración tecnológica: es una necesidad estratégica para garantizar el desarrollo sostenible, la seguridad y la competitividad de Colombia en el siglo XXI.

Referencias bibliográficas

- Aerospace Security. (2023, April 14). *Space Threat Assessment 2023*. AS. <https://aerospace.csis.org/>
- Alfonso, A. (2021). *Brasil relanza su industria espacial al abrir la base de Alcántara a EEUU*. Universidad de Navarra. <https://www.unav.edu/web/global-affairs/detalle/-/blogs/brazil-relaunches-its-space-industry-by-opening-the-alcantara-base-to-the-us#>
- Álvarez Calderón, C. E., Benavides González, E. G., & Ramírez Pedraza, Y. E. (2020). Geopolítica del espacio exterior: dominio estratégico del siglo XXI para la seguridad y defensa. In *Mirando hacia las estrellas: una constante necesidad humana: El espacio exterior: una oportunidad infinita para Colombia. Volumen 1* (pp. 87–193). Escuela Superior de Guerra. <https://doi.org/10.25062/9789585245624.02>
- Álvarez Calderón, C. E., Corredor Gutiérrez, C. G., Quiroga Cruz, R. S., & Molano Valbuena, Á. (2020). Programa espacial colombiano. In *El cielo no es el límite: el futuro estelar de Colombia: El espacio exterior una oportunidad infinita para Colombia. Volumen 2* (pp. 269–293). Escuela Superior de Guerra. <https://doi.org/10.25062/9789585245631.11>
- Álvarez Calderón, C. E., Hernández Jara, J. L., Murillo Colmenares, S., & Urbina Carrero, J. C. (2020). El poder espacial y la seguridad multidimensional. In *Mirando hacia las estrellas: una constante necesidad humana: El espacio exterior: una oportunidad infinita para Colombia. Volumen 1* (pp. 23–83). Escuela Superior de Guerra. <https://doi.org/10.25062/9789585245624.01>
- Ayazo, J. (2021, October 25). *Desarrollo espacial de Colombia: falta una visión clara y ambiciosa*. Impacto TIC. <https://impactotic.co/ciencia/desarrollo-espacial-de-colombia-video/>
- Barbé, E. (1987). El papel del realismo en las relaciones internacionales: (la teoría política internacional de Hans J. Morgenthau). *Revista de Estudios Políticos*, 57, 149–176. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=26941>

- Barroso, P. (2022, January 31). “La guerra es la continuación de la política por otros medios.” *Economía* 3. <https://economia3.com/2022/01/27/470589-la-guerra-es-la-continuacion-de-la-politica-por-otros-medios/>
- Cancillería. (2023, August 28). *Comisión de Naciones Unidas para el uso pacífico del Espacio Ultraterrestre (COPOUS)*. MRE. <https://www.cancilleria.gov.co/comision-naciones-unidas-uso-pacifico-del-espacio-ultraterrestre-copous>
- Cesari, T. (2023, August 24). *James Webb Space Telescope*. NASA. <https://blogs.nasa.gov/webb/category/james-webb-space-telescope/>
- Clausewitz, K. (2016). *De la guerra*. Greenbooks Editore. https://www.google.com.co/books/edition/De_la_guerra/_fakDAAAQBAJ?hl=es&gbpv=0
- Colby, E. (2016, January 27). *From Sanctuary to Battlefield*. Center for a New American Security (En-US). <https://www.cnas.org/publications/reports/from-sanctuary-to-battlefield-a-framework-for-a-us-defense-and-deterrence-strategy-for-space>
- Consejo Nacional de Política Económica y Social (CONPES, 3983). (2020, January 13). *Condiciones habilitantes para el impulso de la competitividad nacional*.
- Departamento Nacional de Planeación, Departamento Administrativo de La Presidencia de la República, Ministerio de Defensa Nacional... (Colombia). Obtenido El 20 de Agosto de 2023. https://www.igac.gov.co/sites/igac.gov.co/files/normograma/conpes_3983.pdf
- Dachyar, M., & Purnomo, H. (2018). Spaceport Site Selection with Analytical Hierarchy Process Decision Making. *Indian Journal of Science and Technology*, 11(10), 1–8. <https://doi.org/10.17485/IJST/2018/V11I10/96506>
- De Carlos, J. (2013). *La importancia del dominio espacial*. Artículo30. <https://articulo30.org/politica-defensa/javier-de-carlos-dominio-espacial/>
- Delgado, A., & Romero, I. (2018). Selection of a method for social impact assessment using AHP. *Revista ECIPeru*.
- Font, T., & Ortega, P. (2012). Seguridad nacional, seguridad multidimensional, seguridad humana. *Papeles de Relaciones Ecosociales y Cambio Social*, 119.

- Harter, M. E. (2006). Ten propositions regarding space power: the dawn of a space force. *Air & Space Power Journal*, 20(2), 64–79. <https://go.gale.com/ps/i.do?p=AONE&sw=w&issn=1555385X&v=2.1&it=r&id=-GALE%7CA154818024&sid=googleScholar&linkaccess=fulltext>
- Hegel, G. W. F. (2011). *Ciencia de la Lógica. VOL. I: La lógica objetiva*. ABADA Editores, S.L. <https://archive.org/details/hegel-ciencia-de-la-logica-vol.-i-ii>
- Herrero de Castro, R. (2010). El concepto de Interés Nacional. *Evolución Del Concepto de Interés Nacional*, 115(Monografías del CESEDEN).
- Iñiguez Noboa, J. D. (2019). *Soluciones Ingenieriles ante la elevación del mar para la implementación de un Puerto Espacial en la costa Ecuatoriana*. ESPOL. FIMCM: Oceanografía. <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/48137>
- Instituto de Hidrología, M. y E. A. de C. (2010). *Experiencias en el uso y aplicación de tecnologías satelitales para observación de la tierra*. IDEAM. https://books.google.com/books/about/Experiencias_en_el_uso_y_aplicaci%C3%B3n_de.html?hl=es&id=q5MiMwEACAAJ
- Klein, J. (2004, January 1). *Corbett in Orbit: A Maritime Model for Strategic Space Theory*. Brookings. <https://www.brookings.edu/articles/corbett-in-orbit-a-maritime-model-for-strategic-space-theory/>
- Lior, N. (2001). Power from space. *Energy Conversion and Management*, 42(15–17). [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(01\)00040-1](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(01)00040-1)
- Mónico Muñoz, L. F., Orduy Rodríguez, J. E., Rodríguez Ramírez, A. F., & Higuera Hernández, R. (2022). Diseño conceptual de un banco de pruebas estático para motores de cohetería tipo G y K. *Ciencia y Poder Aéreo*, 17(2). <https://doi.org/10.18667/CIENCIAYPODERAEREO.737>
- Monsalve, R. (2018, December 5). *Colombia inició su carrera espacial con un satélite*. El Colombiano. <https://www.elcolombiano.com/colombia/colombia-inicio-su-carrera-espacial-con-un-satelite-AG9769222>
- Müller, M. (2015). Assemblages and actor-networks: Rethinking socio-material power, politics and space. *Geography Compass*, 9(1). <https://doi.org/10.1111/gec3.12192>
- Musa, M. (2020, May). *Carrera espacial - ¿Qué fue?, contexto histórico, hitos y más*. Enciclopedia de Historia. <https://enciclopedia dehistoria.com/carrera-espacial/>

- Pant, S., Kumar, A., Ram, M., Klochkov, Y., & Sharma, H. K. (2022). Consistency Indices in Analytic Hierarchy Process: A Review. In *Mathematics* (Vol. 10, Issue 8). <https://doi.org/10.3390/math10081206>
- Perwitasari, I. (2019). Indonesia Spaceport Selection Based on Multicriteria Analysis: A Study on Relative Importance and Priority Regarding Spaceport Selection Location Attributes Utilizing AHP. *Proceedings of the 3rd International Conference on Indonesian Social & Political Enquiries (ICISPE 2018)*, 366(Icisp 2018), 41–45. <https://www.atlantispress.com/proceedings/icisp-18/125922564>
- Rincón, S. R., Martínez, J. M., & Cárdenas, L. (2020). The FACSAT-1: A driver project to promote spin-off initiatives in Colombia. *Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC, 2020-October*.
- Saaty, T. L. (1980). The Analytical Hierarchy Porocess. In *Priority Setting. Resource Allocation*, MacGraw-Hill, New York International Book Company.
- Saumeth, E. (2023, April 24). *El satélite colombiano Facsat-2 ya está en órbita*. Infoespacial. <https://www.infoespacial.com/texto-diario/mostrar/4261517/047-colombia-satelite-colombiano-facsat-2-esta-orbita>
- Silva Rueda, C. F., Corredor Gutiérrez, C. G., & Álvarez Calderón, C. E. (2020). Análisis de la política espacial colombiana: una perspectiva de defensa y seguridad. In *El cielo no es el límite: el futuro estelar de Colombia: El espacio exterior una oportunidad infinita para Colombia. Volumen 2* (pp. 57–83). Escuela Superior de Guerra. <https://doi.org/10.25062/9789585245631.08>

CAPÍTULO 8.

Colombia en la Antártida: Un enfoque que permitirá llegar a las estrellas^{40*}

TE. Gómez Durán César Alexis⁴¹

TE. Campos Chaparro Cristhian Antonio⁴²

TE. Sequeda Ramón Joseph Néstor David⁴³

ST. Urrea Matallana Andrés Felipe⁴⁴

Laura María Pineda Jiménez⁴⁵

Fuerza Aeroespacial Colombiana

^{40*} Capítulo de libro resultado del proyecto de investigación “Desarrollo Espacial en Colombia y aportes de la Fuerza Aeroespacial Colombiana”, del grupo de investigación “GICMA” de la Fuerza Aeroespacial Colombiana, categorizado en A por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (Minciencias) y registrado con el código COL140489. Los puntos de vista y los resultados de este capítulo pertenecen a los autores y no reflejan necesariamente los de las instituciones participantes.

⁴¹ Teniente de la Fuerza Aeroespacial Colombiana. Ingeniero Industrial. Magister en Gerencia de Proyectos. Especialista en Gerencia de Sistemas Integrados de Gestión de la Calidad. Formó parte de la X Expedición Científica de Colombia a la Antártida, donde diseñó protocolos de seguridad polar y diseño para misiones análogas de aislamiento y confinamiento, coordinando equipos interdisciplinarios y colaborando con universidades latinoamericanas y agencias espaciales. Represento a Colombia en la 11th SCAR Open Science Conference presentando hallazgos en seguridad operacional y adaptabilidad humana en ambientes polares Actualmente se desempeña como Especialista Operacional en Coordinación Científica de la Dirección de Ciencia, Tecnología e Innovación de la FAC. Código ORCID: 0009-0005-7132-4293. Contacto: cesar.gomez@fac.mil.co.

⁴² Teniente de la Fuerza Aeroespacial Colombiana. Licenciado en Biología y Química de la Universidad del Atlántico. Participó en la IX y XI Expedición Científica de Colombia a la Antártida, donde contribuyó a la identificación de posibles escenarios análogos espaciales para el entrenamiento de astronautas. En la segunda expedición, trabajó en el componente de medición ambiental e identificación de peligros operacionales, aportando al desarrollo de un diseño preliminar para una futura base de Colombia en la Antártida. Adicionalmente, en el año 2022 participó como astronauta análogo en una misión realizada en Polonia. Actualmente se desempeña como Especialista en Vigilancia Tecnológica en la Coordinación Científica de la Dirección de Ciencia, Tecnología e Innovación de la FAC. Código ORCID: 0000-0002-6908-1318. Contacto: cristhian.campos@fac.mil.co.

⁴³ Teniente de la Fuerza Aeroespacial Colombiana. Ingeniero de Sistemas, Magister en Diseño y Gestión de Proyectos Tecnológicos. Participó como Oficial de Datos de la primera tripulación de astronautas análogos de la Fuerza Aérea Colombiana en agosto de 2022, misión THOR (Polonia), así como en la segunda misión análoga en 2023, ATLAS (E.E.U.U.) y X Expedición Antártica 2024. Código ORCID: 0000-0002-6550-4117. Contacto: joseph.sequeda@fac.mil.co.

⁴⁴ Subteniente de la Fuerza Aeroespacial Colombiana. Ingeniero de Telecomunicaciones. Fue parte del equipo de la X Expedición Científica de Colombia a la Antártida, donde participó con el desarrollo de un proyecto para monitoreo ambiental mediante sistemas electrónicos. Código ORCID: 0009-0009-5006-4938. Contacto: andres.urream@fac.mil.co.

⁴⁵ Médico General de la Universidad Pontificia Bolivariana. Especialista en Medicina Aeroespacial de la Universidad Nacional de Colombia. Investigadora activa en el sector aeroespacial, ha liderado y participado en proyectos científicos orientados al fortalecimiento de la medicina en ambientes extremos.

Resumen: En las últimas décadas, la Antártida se ha convertido en un centro importante de interés científico global debido a su ubicación estratégica y condiciones extremas. En respuesta a este interés, Colombia ha tomado la decisión de participar activamente en la investigación en la Antártica con el objetivo de lograr avances significativos en ciencia y tecnología a nivel global. La Armada Nacional de Colombia ha estado liderando expediciones científicas al continente desde 2014, utilizando buques como plataformas de investigación, mientras que la Fuerza Aérea Colombiana ha respaldado estas iniciativas mediante Campañas Aéreas para transportar personal y equipamiento tanto a nivel nacional como internacional. Al principio, se enfrentó un obstáculo debido a la falta de personal especializado, pero el marco del Tratado Antártico permitió la colaboración y el intercambio de conocimientos con países con experiencia en investigación polar, como Chile y Argentina. La colaboración internacional ha permitido a Colombia llevar a cabo seis campañas aéreas hasta 2024, mientras se desarrollan numerosos proyectos de investigación en temas como la atmósfera polar, comunicaciones satelitales, fisiología humana, misiones análogas y seguridad operacional. Para el futuro, la Fuerza Aérea Colombiana tiene la intención de enfocarse en el ámbito espacial con el fin de mejorar su contribución a la investigación científica mundial y consolidar su posición como líder en la exploración espacial y antártica. Este compromiso refleja la estrategia de Colombia de utilizar su participación en la investigación antártica no solo para avanzar en el conocimiento científico, sino también para desarrollar tecnologías innovadoras que puedan ser utilizadas en futuras misiones espaciales y otros campos relacionados.

Palabras clave: Antártida, investigación polar, tratado antártico, protocolo de Madrid, exploración espacial, Fuerza Aérea Colombiana.

Introducción

El continente antártico es crucial para la investigación científica debido a sus características ambientales excepcionales y a su estatus internacional regulado por el Tratado Antártico de 1959 y su Protocolo de Madrid de 1991 que serán detallados más adelante en el capítulo, los cuales establecen un marco de cooperación científica pacífica. (Secretaría del Tratado Antártico, 1961) Como parte de estos acuerdos desde 1989, Colombia ve la participación

Se ha desempeñado como docente universitaria y de escuelas de aviación, promoviendo la formación integral del talento humano en salud aeronáutica. Código ORCID: 0000-0003-2805-3844. Contacto: lpinedaj@unal.edu.co.

en las actividades científicas en la Antártida como una oportunidad estratégica para impulsar su desarrollo científico, tecnológico y militar. Además, es un compromiso con la comunidad internacional. (Barrero-Barrero, Tovar-Zambrano, Ocampo-Nahar, et al., 2022; Barrero-Barrero, Tovar-Zambrano, Villegas-Cardona, et al., 2022; C. Calderon & Mesa, 2019)

Aunque es crucial para mantener la paz y el medio ambiente en el continente, el Tratado Antártico impone ciertas limitaciones a las Fuerzas Armadas (FFMM) de los países firmantes, restringiendo su uso para propósitos científicos y pacíficos. Las misiones de las FFMM en la Antártida, que incluyen las de la Fuerza Aérea Colombiana (FAC), se enmarcan en un esfuerzo global de cooperación científica. Muchos países, incluido Colombia, han utilizado las FFMM para facilitar la logística y el apoyo a la investigación científica en este entorno extremo, demostrando que la defensa y la ciencia pueden coexistir y complementarse. (Barrero-Barrero, Tovar-Zambrano, Ocampo-Nahar, et al., 2022; Barrero-Barrero, Tovar-Zambrano, Villegas-Cardona, et al., 2022; C. Calderon & Mesa, 2019)

Desde que Colombia se unió al Tratado Antártico, la Armada Nacional ha liderado diez misiones en el continente blanco y la FAC ha estado involucrada en la mayoría de ellas, brindando apoyo logístico, transporte de personal y carga a nivel nacional e internacional, además de desarrollar sus propias misiones científicas llamadas “Campañas Aéreas”. La FAC ha logrado investigar la respuesta fisiológica del cuerpo humano al ambiente polar, la caracterización atmosférica, las comunicaciones espaciales y el diseño de misiones análogas gracias a estas campañas. Los esfuerzos realizados por estos proyectos no solo han impulsado el progreso científico y tecnológico, sino que también han fortalecido la posición de Colombia en el ámbito global, buscando convertirse en miembro consultivo del Sistema del Tratado Antártico. (Barrero-Barrero, Tovar-Zambrano, Ocampo-Nahar, et al., 2022; Barrero-Barrero, Tovar-Zambrano, Villegas-Cardona, et al., 2022; C. Calderon & Mesa, 2019)

Por otra parte, la FAC tiene un interés en la Antártida que va más allá de la investigación científica convencional; las condiciones extremas del polo sur brindan un entorno análogo ideal para la simulación de misiones espaciales. Estos estudios son cruciales para el crecimiento de la industria aeroespacial colombiana, en la que la FAC ha mostrado un interés creciente, contribuyendo al desarrollo tecnológico y al entrenamiento especializado de su personal. (Barrero-Barrero, Tovar-Zambrano, Ocampo-Nahar, et al., 2022; Barrero-Barrero, Tovar-Zambrano, Villegas-Cardona, et al., 2022; C. Calderon & Mesa, 2019)

A lo largo de este capítulo, se presentará un análisis detallado de la participación de la FAC en las expediciones antárticas. Para ello, se empleó una metodología sustentada en la revisión exhaustiva de la literatura disponible, incluyendo documentos oficiales, reportes técnicos y publicaciones científicas relacionadas con las Campañas Aéreas Antárticas. A partir de esta base, se destacan las misiones realizadas, los logros obtenidos, los desafíos enfrentados y las contribuciones significativas en las áreas de ciencia y tecnología. Este recorrido permitirá comprender cómo las Campañas Aéreas de la FAC no solo han fortalecido la presencia de Colombia en la Antártida, sino que también han impulsado el avance del conocimiento y la innovación en múltiples áreas estratégicas para el país, preparando el camino para futuros desafíos en la exploración espacial.

Tratado antártico y protocolo de Madrid

Como se mencionó anteriormente, el Tratado Antártico de 1959, firmado inicialmente por doce países, es un hito en la diplomacia internacional que estableció la Antártida como una reserva natural dedicada a la paz y la ciencia. En el continente, este tratado prohíbe cualquier actividad militar, excepto el uso de personal o equipo militar para fines científicos o cualquier otra actividad pacífica. Además, establece que la Antártida debe mantenerse libre de disputas territoriales y promover la cooperación internacional y la investigación científica sin intervención política o territorial. En el contexto del Tratado Antártico, se ha promovido la cooperación científica a nivel mundial, lo que ha permitido la difusión abierta de los hallazgos de las investigaciones, lo que ha ayudado significativamente a ampliar el conocimiento sobre el continente y sus ecosistemas distintivos (Secretaría del Tratado Antártico, 1961).

Por su parte, el Protocolo de Madrid, establecido en 1991, amplió el alcance del Tratado Antártico al proporcionar una protección ambiental para la región. Este protocolo establece estándares estrictos para la protección del medio ambiente, como la conservación de la flora y fauna local, la prevención de la contaminación y la gestión de desechos, además de prohibir cualquier actividad minera en la Antártida. (Secretaría del Tratado Antártico, 1991) Además, el protocolo obliga a los países firmantes a llevar a cabo evaluaciones de impacto ambiental antes de realizar cualquier actividad en el continente. Esto garantiza que la Antártida esté libre de cualquier impacto negativo significativo que la presencia humana pueda causar.

Colombia, por ejemplo, se unió al Tratado Antártico en 1989 y ha demostrado su compromiso con la preservación del continente y el avance de la ciencia y la tecnología en un entorno colaborativo internacional. El país ha sido una parte activa de las conversaciones sobre la protección ambiental en la Antártida y sus estudios han ayudado a comprender mejor los efectos del cambio climático en la región. Adicionalmente, la vinculación de Colombia al Protocolo de Madrid ha permitido el desarrollo de políticas nacionales centradas en la conservación ambiental y la investigación científica, lo que ha fortalecido su posición en la comunidad internacional y ha favorecido su participación continua en expediciones científicas al continente blanco. (Barrero-Barrero, Tovar-Zambrano, Ocampo-Nahar, et al., 2022; Barrero-Barrero, Tovar-Zambrano, Villegas-Cardona, et al., 2022; C. Calderon & Mesa, 2019)

Cooperación internacional y el rol de las fuerzas armadas en la investigación científica en la antártida

Desde la ratificación del Tratado Antártico, los países signatarios han colaborado en la promoción de la paz y la ciencia en la zona mediante la transferencia de recursos, información y resultados de investigación. Este método de trabajo en equipo no solo ha permitido avances significativos en una variedad de campos científicos, sino que también ha fortalecido las relaciones diplomáticas entre las naciones involucradas. Es así como la cooperación internacional es esencial para la investigación científica en la Antártida debido a las condiciones extremas y la amplia extensión del continente, lo que hace que la colaboración entre naciones sea esencial para la logística y la realización de investigaciones de alta calidad. (Barrero-Barrero, Tovar-Zambrano, Ocampo-Nahar, et al., 2022; Barrero-Barrero, Tovar-Zambrano, Villegas-Cardona, et al., 2022; C. Calderon & Mesa, 2019)

Las FFMM de varias naciones, incluidas las de Colombia, han desempeñado un papel importante en este esfuerzo al brindar apoyo logístico y técnico a las expediciones científicas. La participación de la FAC en misiones antárticas ha sido crucial para el desarrollo de capacidades en entornos extremos, contribuyendo al transporte de personal y equipo, así como a la realización de investigaciones propias en campos como la fisiología humana, la caracterización atmosférica, las comunicaciones espaciales, entre otras. Además, la experiencia de la FAC en la Antártida ha sido un factor crucial en la preparación del personal para futuras misiones en entornos similares, como el espacio exterior, donde las condiciones ambientales presentan desafíos

comparables. (Barrero-Barrero, Tovar-Zambrano, Ocampo-Nahar, et al., 2022; Barrero-Barrero, Tovar-Zambrano, Villegas-Cardona, et al., 2022; C. Calderon & Mesa, 2019)

La participación de la FAC y otras organizaciones militares en la investigación científica en la Antártida posiciona a Colombia como un actor relevante en la investigación polar y la cooperación internacional en ciencia y tecnología. Además, refuerza su compromiso con la comunidad internacional. Esta participación es particularmente crucial ya que Colombia está cada vez más interesada en mejorar sus habilidades de exploración espacial. Esto se debe a que las enseñanzas que se aprendieron en la Antártida tienen un impacto directo en el futuro. (Barrero-Barrero, Tovar-Zambrano, Ocampo-Nahar, et al., 2022; Barrero-Barrero, Tovar-Zambrano, Villegas-Cardona, et al., 2022; C. Calderon & Mesa, 2019)

Expediciones anuales a la antártida

Descripción de las Expediciones Realizadas por la Fuerza Aeroespacial Colombiana

La FAC ha tenido un impacto en las expediciones científicas a la Antártida a través de la ejecución de proyectos de investigación liderados por su personal, tanto en el estudio del continente blanco como en la transferencia e intercambio de conocimiento científico y técnico en el campo de la medicina aeroespacial. Este esfuerzo no solo ha posicionado a la FAC como un actor clave en la cooperación internacional, sino que también ha facilitado la ejecución de expediciones científicas de alto nivel, alineadas con las prioridades establecidas en la Agenda Científica de Colombia 2014-2035 (Vargas-Ríos et al., 2014). La siguiente es una visión general de las expediciones anuales de la FAC a la Antártida desde 2015, destacando los aspectos logísticos y operativos.

Campaña Aérea a la Antártica 2014-2015 (Fuerza Aérea Colombiana, 2015)

La FAC optó por utilizar el transporte aéreo para llegar a la Antártida, a diferencia de la Armada Nacional de Colombia. Estas misiones fueron denominadas “Campañas aéreas” y conllevaban riesgos debido a las condiciones meteorológicas del continente blanco, como las temperaturas extremas, la baja visibilidad, los fuertes vientos y la pista no preparada. La

formación de la tripulación colombiana para ejecutar esta expedición se llevó a cabo en Santiago en el Grupo de Aviación N°10 de la II Brigada de la Fuerza Aérea de Chile. Después, comenzó su misión aérea en un Hércules C-130 de la FAC, volando durante más de 14 horas y 7500 kilómetros desde Bogotá, haciendo escala en Antofagasta, Santiago y Punta Arenas en Chile, hasta la Isla Rey Jorge. Con 13 oficiales y suboficiales de la Institución, llegaron a la Antártida, superando las condiciones meteorológicas difíciles y llegando con éxito y seguridad a la pista de la Base Aérea Eduardo Frei Montalva, ubicada en la Isla Rey Jorge, marcando un hito para la aviación militar colombiana en condiciones polares extremas.

II Campaña Aérea a la Antártica 2017-2018 (Comando General de las Fuerzas Militares de Colombia, 2018)

La FAC realizó su segunda campaña aérea a la Antártida entre enero y febrero de 2018, partiendo en un Hércules C-130 desde Bogotá con preparación previa en Chile para operaciones en climas extremos. En apoyo a la IV Expedición Científica del Programa Antártico Colombiano (PAA) y la Comisión Colombiana del Océano (CCO), transportó 162 personas y 43,2 toneladas de carga, incluyendo investigadores de varios países. Tras 50 horas de vuelo y múltiples operaciones en la Isla Rey Jorge, varios tripulantes fueron certificados para misiones polares, fortaleciendo las capacidades estratégicas, operativas y tácticas de la aviación militar colombiana.

III Campaña Aérea a la Antártica 2018-2019 (Fuerza Aérea Colombiana, 2019)

En el verano austral de 2018-2019, la Fuerza Aérea Colombiana llevó a cabo su tercera campaña aérea al continente blanco, liderada por el TC Marlo Julián Marín. La misión inició el 14 de enero de 2019 con 18 integrantes (5 oficiales y 13 suboficiales), quienes realizaron el trayecto en un Hércules C-130, con escalas en Santiago y Punta Arenas antes de llegar a la pista del aeropuerto Tte. Rodolfo Marsh en la Isla Rey Jorge. Durante la operación se brindó apoyo logístico y de transporte a investigadores de países como Suiza, China, Francia, Chile, Austria, Uruguay, Ecuador y México. En total se realizaron dos cruces aéreos entre Punta Arenas e Isla Rey Jorge, alcanzando 33,45 horas de vuelo, en las que se movilizaron 115 personas y 23,95 toneladas de carga. Esta experiencia permitió fortalecer las capacidades operativas de la FAC, aportar al Programa Antártico Colombiano y consolidar la participación de Colombia en investigaciones científicas en ambientes polares extremos.

IV Campaña Aérea a la Antártica 2019-2020 (Fuerza Aérea Colombiana, 2020)

En el verano austral de 2019-2020, la FAC realizó su cuarta campaña aérea al continente blanco con un Hércules C-130 y una tripulación de 10 oficiales y suboficiales especializados en operaciones polares. La misión inició en Bogotá el 17 de enero de 2020, con escalas en Santiago y Punta Arenas, llegando a la Isla Rey Jorge el 19 de enero. En esta ocasión, la FAC operó de manera autónoma, recorriendo más de 1.200 km sobre el océano antártico y aterrizando en una pista no preparada de tierra volcánica de 1.200 metros. Se efectuaron dos cruces entre Punta Arenas y la Isla Rey Jorge, transportando 378 personas y 40,5 toneladas de carga, además de realizar 41,85 horas de vuelo. La misión brindó apoyo logístico a Chile, Perú y Ecuador para sus expediciones científicas, y transportó investigadores y muestras desde la Antártida. El retorno se efectuó el 26 de enero a Bogotá, consolidando la capacidad de la FAC para ejecutar misiones autónomas en condiciones polares extremas.

V Campaña Aérea a la Antártica 2022-2023 (Comando General de las Fuerzas Militares de Colombia, 2023; Comisión Colombiana del Océano, 2023)

Durante el verano austral de 2022-2023, se llevó a cabo la V Campaña Aérea a la Antártica, dirigida por el Brigadier General Edgar Mauricio Falla Vargas y con una tripulación de 16 oficiales y suboficiales de las FFMM, con el objetivo de llevar a cabo proyectos que buscaban conectar la Antártida con el resto del mundo. La expedición comenzó el 22 de enero con salida de Bogotá y llegada a la isla Rey Jorge. La FAC reafirmó su compromiso con la investigación científica en el continente blanco, apoyando múltiples iniciativas internacionales.

VI Campaña Aérea a la Antártica 2023-2024 (Fuerza Aérea Colombiana, 2024)

El grupo de militares investigadores de la FAC comenzó a participar en la VI Campaña Aérea a la Antártica, viajando por primera vez en una aeronave C-40 desde Bogotá hacia Santiago de Chile y luego hacia Punta Arenas. Además, en la aeronave se encuentran un grupo de investigadores de la Universidad Industrial de Santander, delegados del PPA, la Oficina de Asuntos Internacionales de la FAC y un grupo de comunicadores encargados de informar al país sobre los esfuerzos científicos de la nación. Gracias a las

buenas relaciones y cooperación entre ambas naciones, esta comisión llegó a la isla Rey Jorge, en la Antártica, en un avión C-130 de la Fuerza Aérea de Chile. Gracias a la estrecha colaboración con la Fuerza Aérea de Chile, esta expedición reforzó la cooperación internacional y permitió la continuidad de las investigaciones científicas en la Antártida.

Investigación científica en la Antártida

Contribuciones de la Fuerza Aeroespacial Colombiana a la Investigación Científica en la Antártida

De forma paralela, la FAC ha evolucionado gradualmente en su ámbito de funcionamiento para poder llevar a cabo y desarrollar operaciones independientes en los desafiantes entornos del continente antártico. Con cada expedición, la FAC aumenta su alcance y mejora sus habilidades operacionales, logísticas y científicas, contribuyendo al objetivo del Programa Antártico Colombiano de consolidar el interés nacional en convertirse en un miembro consultivo del Sistema del Tratado Antártico. Las contribuciones de la FAC se pueden dividir en una serie de categorías principales que se muestran en la siguiente Tabla 1.

Tabla 1. *Áreas de aporte de la Fuerza Aérea Colombiana en investigación y operaciones antárticas*

Categoría	Aporte
Proyectos de investigación y desarrollo tecnológico	La FAC ha desarrollado tecnologías críticas para la supervivencia y operación en condiciones extremas de Antártica. El diseño e implementación de turbinas eólicas, sistemas de comunicación satelital y equipos especializados son parte de estos proyectos para mejorar la capacidad operativa y logística en el continente blanco
Cooperación internacional	La FAC ha mantenido una estrecha relación con las fuerzas aéreas de naciones de Latinoamérica como Argentina y Chile. Las colaboraciones en la región antártica han mejorado las capacidades científicas y logísticas, fortaleciendo las relaciones binacionales y facilitando el intercambio de conocimientos y prácticas operacionales

Categoría	Aporte
Impacto y resultados operacionales	El desarrollo de nuevas doctrinas y prácticas en medicina aeroespacial y seguridad operacional ha sido significativamente influenciado por las investigaciones realizadas por la FAC. Además, estos estudios han proporcionado datos importantes que ayudan a comprender mejor el medio ambiente antártico y cómo afecta la salud y el rendimiento humano
Recomendaciones y futuras expansiones	Se han propuesto medidas para fortalecer y mejorar la participación de la FAC en futuras misiones antárticas basándose en los resultados de estas expediciones y estudios. El mejoramiento de la preparación de los tripulantes, el desarrollo de nuevas tecnologías y la ampliación de la cooperación internacional son algunas de las recomendaciones
Entrenamiento y capacitación	La FAC ha implementado programas de capacitación y entrenamiento para preparar a su personal para operar en condiciones extremas. Estos programas incluyen capacitación en supervivencia, simulaciones en ambientes controlados y entrenamiento en manejo de equipo especializado
Conservación y sostenibilidad ambiental	En sus operaciones, la FAC ha adoptado prácticas sostenibles para reducir el impacto ambiental de sus operaciones en la Antártida. Esto incluye el uso de energías renovables, el manejo adecuado de desechos y la aplicación de protocolos de protección ambiental
Educación y divulgación científica	Mediante la publicación de investigaciones y la participación en conferencias internacionales, la FAC ha ayudado a la educación y divulgación científica. Además, han creado programas educativos para educar a la comunidad sobre el valor de la investigación polar y la Antártida
Participación en redes de investigación internacional	La FAC ha colaborado en proyectos multinacionales, ha integrado redes internacionales de investigación y ha compartido datos y resultados con la comunidad científica global. El intercambio de conocimientos y recursos ha mejorado como resultado de esta participación

Proyectos destacados en la Antártida

Desde 2015, la FAC ha participado activamente en expediciones científicas al continente blanco, impulsando investigaciones en áreas como la fisiología humana en condiciones polares, la radiación cósmica, la seguridad operacional y el uso de energías renovables. Estos proyectos han fortalecido las capacidades operativas de la FAC en ambientes extremos y han contribuido

al conocimiento científico global. Sus resultados han sido divulgados en congresos internacionales y revistas especializadas, demostrando el rigor y la pertinencia de los estudios realizados. El enfoque multidisciplinario de estas investigaciones ha permitido integrar ciencia, tecnología y operación aérea, generando aportes aplicables tanto a futuras misiones antárticas como a escenarios de exploración espacial. A continuación, se presenta una descripción de cada una de estas expediciones, junto con los principales resultados de las investigaciones desarrolladas en el marco de las mismas. Para profundizar en los aspectos metodológicos de cada investigación, se invita al lector a consultar los documentos completos de las publicaciones correspondientes, los cuales se encuentran citados en las referencias bibliográficas de este capítulo.

I Expedición Científica de Colombia a la Antártida “Expedición Caldas” durante el verano Austral 2014-2015

- a. Título del proyecto:** Cambios fisiológicos cardiorrespiratorios, la composición corporal, el síndrome T3 polar y la calidad del sueño, que se presentan en la aclimatación aguda al frío extremo, en un grupo de expedicionarios de la Antártida. (Herrera-Castro, 2017)

Investigador principal: TC. Juan Miguel Castro Herrera, primer investigador científico de la FAC en participar en expediciones científicas de Colombia en la Antártida.

Objetivo general: Determinar los cambios fisiológicos cardiorrespiratorios, la composición corporal, el síndrome T3 Polar y la calidad del sueño, que se presentan en la aclimatación aguda al frío extremo, en un grupo de 36 expedicionarios de la Antártica, que se dividieron aleatoriamente en dos grupos; uno realizó ejercicio aeróbico durante cuatro semanas de entrenamiento y el otro se mantuvo sedentario.

Resultados: El 80% de los 36 sujetos eran hombres y el 20% mujeres, con una edad promedio de 33.5 años. Los ejercicios disminuyeron el IMC en un 4%, la probabilidad de padecer hipotiroidismo en un 30% y la probabilidad de somnolencia diurna en un 51%. También mejoraron la calidad del sueño en un 48% y el consumo máximo de oxígeno en un 7%. El grupo control experimentó un aumento del 10% en su grasa y una disminución del 10% en su condición cardiovascular. Como resultado, el ejercicio reduce la probabilidad de desarrollar enfermedades metabólicas y cardiovasculares al protegerse de la exposición a temperaturas extremas.

Productos derivados:

- Tesis de Maestría en Ciencias y Tecnologías de la Actividad Física y el Deporte.
- Asistencia Congreso Internacional de Medicina del Deporte.
- Publicación artículo en revista científica. (Herrera-Castro, 2017)

II Expedición Científica de Colombia a la Antártida “Almirante Lemaitre” durante el verano Austral 2015-2016

- a. **Título del proyecto:** Determinación de cambios fisiológicos cardiorrespiratorios y de composición corporal y su correlación con factores ambientales en un grupo de tripulantes de vuelo de la FAC durante un vuelo ida y regreso a la Antártida. (Torres Parra, 2015)

Investigador principal: CT María Alejandra Corzo Zamora.

Objetivo general: Determinar los cambios fisiológicos cardiorrespiratorios y de composición corporal y su correlación con factores ambientales en un grupo de tripulantes de vuelo de la FAC durante un vuelo ida y regreso a la Antártida, a través de un monitor cardíaco polar y la medición periódica de composición corporal. Además, se realizaron tomas de temperatura ambiental, humedad relativa y presión atmosférica en cada uno de los sitios de medición.

Resultados: El estudio evidenció que la exposición inmediata al frío reduce la frecuencia cardíaca como mecanismo de conservación del calor, respuesta modulada por el tipo de vestimenta y el nivel de actividad física. Los gastos calóricos registrados en la Antártida fueron significativamente más altos que en actividades equivalentes en otros entornos: caminatas cortas o moderadas implicaron consumos energéticos elevados, llegando a superar las 1.000 Kcal en recorridos de más de dos horas en condiciones de nieve. Se concluyó que la dotación de la tripulación debe mejorarse, recomendando el uso de una chaqueta polar más ligera y con mayor capacidad de protección térmica, dado que la actual resulta pesada e insuficiente para las exigencias del campo.

Productos derivados:

- Recomendaciones de preparación para futuras expediciones.

- Congresos nacionales e internacionales de la comunidad médica.

b. Título del proyecto: Estudio radiométrico de las características atmosféricas de la zona antártica para el desarrollo de la aviación en Colombia - Fase I (Quiñonez et al., 2018; Torres Parra, 2015)

Investigador principal: T3. Edwin Alexander Casallas Moreno.

Objetivo general: Determinar las condiciones de radiación cósmica y sus propiedades de interacción con el campo magnético terrestre, en las caracterizaciones de las condiciones atmosféricas de la zona Antártida y sus implicaciones para la aviación.

Resultados: El estudio caracterizó las condiciones atmosféricas de la región antártica (presión, temperatura y viento) y midió los niveles de radiación en la Base Marambio, registrando un nivel de fondo de 1.2 $\mu\text{Sv/h}$, posiblemente asociado a minerales radiactivos presentes en el suelo y agua. Las muestras revelaron alta concentración de hierro (5 ppm) y la posible presencia de otros minerales vinculados a la descomposición de uranio. Estos hallazgos permiten comprender la interacción de la radiación cósmica con el ambiente polar y sus implicaciones para la aviación, aportando criterios para establecer niveles seguros de exposición en tripulaciones que operan en la Antártida.

Productos derivados:

- Publicación artículo en revista científica. (Quiñonez et al., 2018)
- Asistencia Congreso Nacional Antártico Chile.
- Participación de personal universitario a través de prácticas/pasantías profesionales.

c. Título del proyecto: Implementación de una turbina eólica en la Antártica - Fase I. (Jiménez Lozano, 2020; Torres Parra, 2015)

Investigador principal: MY. César Jiménez Lozano.

Objetivo general: Diseñar una turbina eólica para uso en la Antártica a fin de ser implementada para el suministro de energía en la base temporal de la república de Colombia que hacia el año 2025.

Resultados: Se recopilaron datos meteorológicos, térmicos, geográficos y energéticos en la Base Marambio para diseñar una turbina eólica adaptada a condiciones polares extremas. El estudio reportó temperaturas promedio de -2°C , vientos de 56 km/h provenientes del noreste, pérdidas térmicas de hasta 85°C en puntos críticos y un terreno compuesto por permafrost, hielo y arcilla. En el ámbito energético, se identificó un generador con capacidad de 410 KW como referencia. Con esta información, se construyó en Colombia un prototipo funcional de turbina eólica, como primer paso hacia su futura implementación en una base temporal nacional en la Antártida.

Productos derivados:

- Conferencia de la visita Antártica en la fase de campo en el IMA
- Publicación artículo en la revista científica del IMA. (Jiménez Lozano, 2020)
- Prototipo funcional de generador.

IV Expedición Científica de Colombia a la Antártida “Almirante Tono” durante el verano Austral 2017-2018

- a. Título del proyecto:** Evaluación de los cambios circadianos en aclimatación aguda crónica en el personal que desarrolla misiones en la Antártica. (Comisión Colombiana del Océano, 2017)

Investigador principal: TC. Alexandra Mejía Delgado.

Objetivo general: Determinar los cambios cronobiológicos del personal que participa en misiones de entrenamiento en la Antártica.

Resultados: Este estudio mostró que la alteración del ciclo de luz y oscuridad en la Antártida, con luz continua en verano y oscuridad prolongada en invierno, afecta la regulación hormonal y desajusta el ciclo biológico. Esto provoca un retraso en la producción de melatonina, lo que puede generar problemas de sueño, como dificultad para mantener el sueño y sueño no reparador. Como consecuencia, se han observado dificultades de atención, somnolencia excesiva y problemas de alerta, lo que podría poner en riesgo la seguridad de la misión.

Productos derivados:

- Recomendaciones operacionales.

- b. Título del proyecto:** Estudio radiométrico de las características atmosféricas de la zona antártica para el desarrollo de la aviación en Colombia - Fase II. (Comisión Colombiana del Océano, 2017; Quiñonez et al., 2018)

Investigador principal: T2. Edwin Alexander Casallas Moreno.

Objetivo general: Determinar la dosis de radiación que afecta a las tripulaciones que realizan operaciones aéreas en la Antártida debido a los rayos cósmicos galácticos (GCR), tanto para el personal de vuelo como de tierra, en función de la ubicación geográfica de la zona de estudio. Esto se realizó mediante simulaciones utilizando el software de aviación CAR-7A.

Resultados: Las condiciones de radiación cósmica, así como sus características de interacción con el campo magnético terrestre, se identificaron en las caracterizaciones de las condiciones atmosféricas de la zona antártica y sus implicaciones para la aviación.

Productos derivados:

- Publicación artículo en revista científica. (Quiñonez et al., 2018)
- Asistencia Congreso Nacional Antártico Chile.
- Participación de personal universitario a través de prácticas/pasantías profesionales.

- c. Título del proyecto:** Implementación de una turbina eólica en la Antártica - Fase II. (Jiménez Lozano, 2020)

Investigador principal: MY. César Jiménez Lozano.

Objetivo general: Diseñar una turbina eólica para uso en la Antártica a fin de ser implementada para el suministro de energía en la base temporal de la república de Colombia que hacia el año 2025.

Resultados: En la segunda etapa de la investigación, se estableció una turbina eólica para su uso en la Antártida en la Estación Marambio en 2018. Su objetivo es proporcionar energía a la base temporal de Colombia hasta el año 2025. La turbina eólica fue diseñada para generar suficiente energía eléctrica para iluminar y calentar una base pequeña, y se construyó con materiales fáciles de acceder, sin embargo, se respetó la normativa ambiental establecida

en el Protocolo de Madrid. La ejecución del proyecto tuvo lugar en la Estación Antártica Argentina Marambio, ubicada en la Isla Seymour, que se encuentra frente a la Península Antártica.

Productos derivados:

- Conferencia de la visita Antártica en la fase de campo en el IMA
- Publicación artículo en la revista científica del IMA. (Jiménez Lozano, 2020)
- Prototipo funcional de generador.

VI Expedición Científica de Colombia a la Antártida durante el verano Austral 2019-2020

- a. Título del proyecto:** Comunicaciones satelitales de la Fuerza Aérea Colombiana en la Antártida. (Comisión Colombiana del Océano, 2021)

Investigador principal: TC. Sonia Rincón Urbina.

Objetivo general: Activar las capacidades en comunicaciones satelitales de la FAC en la Antártica.

Resultados: El Jefe del Centro de Asuntos Antárticos del Ejército de Chile, CR Humberto Julio Schweitzer, brindó apoyo logístico para recibir a los investigadores del proyecto en la Base “General Bernardo O’Higgins Riquelme”, donde se llevaron a cabo todas las actividades de campo. Gracias a este respaldo, se logró instalar un prototipo de antena Yagi, con el objetivo de evaluar la viabilidad de establecer una estación temporal en la Antártida que se comunique con el nanosatélite FACSAT-1 por más tiempo. Además, se exploró la posibilidad de crear una plataforma de investigación con materiales y configuraciones técnicas que puedan funcionar eficientemente bajo las condiciones meteorológicas extremas del continente.

Productos derivados:

- Asistencia a evento científico: FACSAT-1 Ground Station performance, en 70th International Astronautical Congress (IAC), Washington D.C., United States, 21-25 October 2019
- Divulgación del proyecto en evento mensual “Hablando de ciencia en la EMAVI” organizado por el departamento de Ciencias Básicas

- Manual de implementación que incluye el protocolo de comunicaciones.

b. Título del proyecto: Identificación y caracterización de los fenómenos meteorológicos peligrosos para la navegación aérea asociados con los sistemas ciclónicos meso escalares antárticos - Fase I. (Comisión Colombiana del Océano, 2021)

Investigador principal: MY. Mauricio Jiménez Lozano

Objetivo general: Identificar y caracterizar los fenómenos meteorológicos peligrosos para la navegación aérea asociados con los sistemas ciclónicos meso escalares Antárticos.

Resultados: En el cerro La Cruz, cercano a la Base Profesor Julio Escudero (INACH), se instalaron sensores meteorológicos y se realizaron mediciones continuas entre el 20 y 24 de enero de 2020. Se registraron variables como presión, temperatura, humedad, viento, precipitación y visibilidad, complementadas con sondeos atmosféricos periódicos. Esta información permitió crear una base de datos climática para la región, la cual constituye insumo clave para validar modelos de predicción meteorológica y contribuir a la seguridad de la navegación aérea en la Antártida.

Productos derivados:

- Capítulo en libro resultado de investigación.
- Software web para publicación de los productos meteorológicos generados con los resultados de la investigación.

c. Título del proyecto: Identificación de los peligros operacionales en la Antártida para la operación de la Fuerza Aérea Colombiana - Fase I. (Comisión Colombiana del Océano, 2021; Gómez-Tabares, 2021)

Investigador principal: TC. William Andrés Tabares Gómez.

Objetivo general: Determinar los peligros en que opera la FAC en sus misiones antárticas usando la metodología panorama de riesgos.

Resultados: Mediante una matriz de evaluación de riesgos basada en probabilidad y severidad, se identificaron los principales peligros para las operaciones de la FAC en la Antártida, clasificados en niveles medio, alto y extremo. Los riesgos más relevantes fueron la salida de pista, el congelamiento y los factores humanos, asociados a la limitada capacitación

en operaciones polares y en las características geográficas y meteorológicas de la región. Como producto, se diseñó una herramienta para reducir el riesgo operativo y se concluyó que la capacitación continua del personal es esencial para la seguridad aérea. Se recomienda actualizar el panorama de riesgos semestralmente, dada la influencia del cambio climático sobre las condiciones meteorológicas del continente blanco.

Productos derivados:

- Panorama de riesgos de dos aeropuertos de la Antártida.
- Publicación artículo en revista científica. (Gómez-Tabares, 2021)

d. Título del proyecto: Implementación de una turbina eólica en la Antártica - Fase III. (Comisión Colombiana del Océano, 2021; Jiménez Lozano, 2020)

Investigador principal: MY. César Jiménez Lozano.

Objetivo general: Realizar una evaluación de funcionamiento del prototipo de turbina eólica implementada en la Antártida FAC-001 “ÁNEMUS” en el año 2018, a fin de evaluar su desempeño.

Resultados: Tras casi dos años de operación continua, la turbina eólica FAC-001 “ÁNEMUS” fue sometida en 2020 a una inspección integral de sus componentes estructurales y electrónicos. Se identificó la necesidad de mejorar materiales y rodamientos para optimizar la lubricación y reforzar el sistema de protección contra vientos excesivos. Aunque el prototipo cumplió sus objetivos de diseño, se concluyó que una versión mejorada podría ofrecer mayor capacidad energética y fiabilidad. Se proyecta que futuras versiones proporcionen energía suficiente para sustentar a cuatro investigadores en refugios temporales, contribuyendo a la sostenibilidad de expediciones y al avance hacia un eventual asentamiento antártico, en concordancia con normativas ambientales internacionales.

Productos derivados:

- Conferencia de la visita Antártica en la fase de campo en el IMA
- Publicación artículo en la revista científica del IMA. (Jiménez Lozano, 2020)
- Prototipo funcional de generador.

- e. **Título del proyecto:** Necesidades y riesgos para el desarrollo de operaciones análogas espaciales colombianas en la Antártida y en Colombia (estudio para su implementación). (Campos Chaparro et al., 2022; Comisión Colombiana del Océano, 2021; Sequeda Ramón et al., 2023)

Investigador principal: ST. Cristhian Antonio Campos Chaparro.

Objetivo general: Determinar los tipos de escenarios y de misiones análogas espaciales con potencial para ser implementados por la FAC.

Resultados: Se llevaron a cabo visitas en la Base Antártica Frei de Chile, ubicada cerca de la estación Great Wall de China y en la Base Antártica Escudero (INACH). Además, se realizaron entrevistas con el personal de planta de ambas bases para obtener información sobre sus experiencias y para poder realizar una matriz de riesgos en la hipótesis de la creación de misiones análogas espaciales en la Antártida. Se identificaron tres escenarios potenciales para misiones espaciales similares en la Isla Rey Jorge en el proyecto de investigación posterior.

Productos derivados:

- Publicación de artículos revista científica. (Campos Chaparro et al., 2022; Sequeda Ramón et al., 2023)

VIII Expedición Científica de Colombia a la Antártida durante el verano Austral 2020-2021

- a. **Título del proyecto:** Identificación de los peligros operacionales en la Antártida para la operación de la Fuerza Aérea Colombiana - Fase II. (Gómez-Tabares, 2021)

Investigador principal: CT. Jenny Caro Martínez.

Objetivo general: Determinar los riesgos operacionales antárticos mediante el diseño de procedimientos de vuelo, específicamente aproximaciones RNAV, generación de ortofotografías y modelos 3D del aeródromo Marambio.

Resultados: Para el proyecto de investigación se diseñaron procedimientos de vuelo, como aproximaciones RNAV, además de crear ortofotografías y modelos 3D del aeródromo Marambio.

Productos derivados:

- Publicación artículo en revista científica. (Gómez-Tabares, 2021)
- Carta de aproximación RNAV-RNP aeródromo Marambio.
- Ortofoto y modelo 3D aeródromo.

b. Título del proyecto: Identificación y caracterización de fenómenos meteorológicos peligrosos para la navegación aérea en el continente antártico - Fase II. (Comisión Colombiana del Océano, 2021)

Investigador principal: MY Mauricio Jiménez García.

Objetivo general: Identificar y caracterizar los fenómenos meteorológicos peligrosos para la navegación aérea en el continente antártico.

Resultados: Se realizó un sondeo en altura para este proyecto que proporcionó información sobre cómo se forma la niebla marina durante el paso de un ciclón y su efecto negativo como factor principal. Estas observaciones ayudan a mejorar los modelos climáticos regionales y a evaluar la precisión de las simulaciones. Para apoyar las misiones en la Antártida, un sistema de predicción meteorológica numérica ofrece resultados prácticos.

Productos derivados:

- Capítulo en libro resultado de investigación.
- Software web para publicación de los productos meteorológicos generados con los resultados de la investigación.

IX Expedición Científica de Colombia a la Antártida durante el verano Austral 2022-2023

a. Título del proyecto: Rendimiento cognitivo, aspectos psicológicos, fisiológicos cardiovasculares, sueño y carga de trabajo, estudios celulares y moleculares en personal participante de la IX Expedición antártica de la Fuerza Aérea Colombiana.

Investigador principal: CR. Alexander Diaz Ariza.

Objetivo general: Determinar cambios de rendimiento cognitivo, fisiológicos cardiovasculares, sueño, vigilia, psicológicos, molecular y celular con la exposición al ambiente antártico en una expedición al continente austral de personal de la FAC en el 2022-2023. La Figura 1 muestra al equipo investigador que participó en la IX Expedición Científica de Colombia a la Antártida durante el verano austral 2022-2023.

Figura 1. *Equipo investigador que hizo parte de la IX Expedición Científica de Colombia a la Antártida durante el verano Austral 2022-2023*



Nota. De izquierda a derecha: Dr. Diego Leonel Malpica Hincapié, TE Johana Marcela Maldonado Boshell, TE Cristhian Antonio Campos Chaparro, CR Alexander Diaz Ariza.

Fuente: FAC. Derechos reservados.

Resultados: Las evaluaciones psicológicas evidenciaron variabilidad en rasgos de personalidad y niveles de ansiedad, resaltando la importancia de la resiliencia en misiones en entornos extremos. El rendimiento cognitivo y neuropsicológico se mantuvo estable, sin alteraciones significativas pese al aislamiento. Los indicadores cardiovasculares, de composición corporal y de salud física no mostraron cambios relevantes, lo que sugiere una adecuada adaptación a corto plazo. A nivel celular y molecular tampoco se observaron daños ni alteraciones importantes. En conjunto, los hallazgos indican que el organismo humano puede adaptarse eficazmente a condiciones polares en exposiciones breves, aunque se recomienda ampliar los estudios para evaluar efectos de mayor duración.

Productos derivados:

- Artículo científico revista indexada en proceso de publicación.
- Participación en el 93rd Annual Scientific Meeting of the Aerospace Medical Association, New Orleans, May 21–25, 2023.

b. Título del proyecto: Parametrización de las variables presentes en la capa límite planetaria para simular la generación y disipación de niebla en la península antártica.

Investigador principal: MY Mauricio Jiménez García.

Objetivo general: Parametrizar las variables de la capa límite atmosférica en el modelo meteorológico WRF para ayudar a predecir la formación y disipación de la niebla en la península antártica.

Resultados: Se creó una base de datos con información sobre la superficie, como presión, temperatura, humedad, dirección e intensidad del viento, base de las nubes, precipitación y visibilidad. También se recopiló información sobre estas mismas variables en altura. En cada lanzamiento de los sondeos atmosféricos, se tomaron fotos para registrar las condiciones meteorológicas. Se obtuvieron datos de las estaciones meteorológicas de Marambio y las cercanas a la Isla para medir las variables meteorológicas en superficie y altura. Además, se estableció contacto con el Servicio Meteorológico de la base, participando en reuniones diarias y mejorando la comprensión de los sistemas meteorológicos de Marambio. Con estos datos, se espera caracterizar los fenómenos meteorológicos que afectan la aviación en la península antártica, ajustar el modelo WRF para identificar con mayor precisión los eventos peligrosos para la aviación, y verificar en tiempo real los resultados del modelo comparándolos con los datos obtenidos por los sensores en Marambio.

Productos derivados:

- Capítulo en libro resultado de investigación.
- Software web para publicación de los productos meteorológicos generados con los resultados de la investigación.

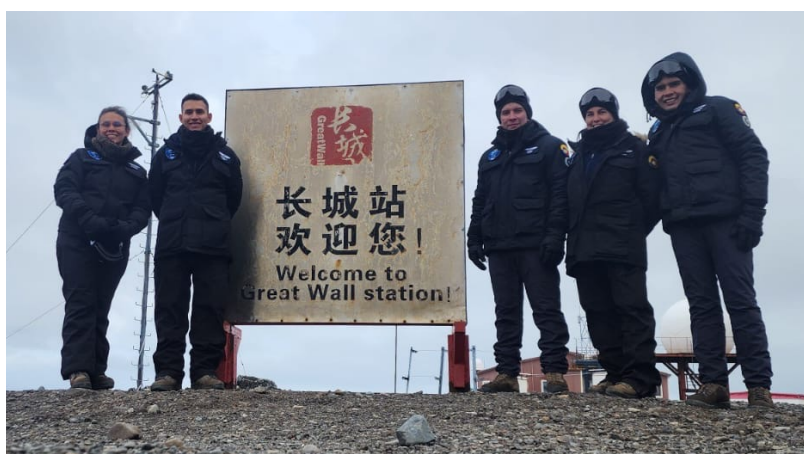
X Expedición Científica de Colombia a la Antártida durante el verano Austral 2023-2024

- a. Título del proyecto:** Estudio de investigación para el diseño de una misión análoga espacial en seguridad operacional y adaptabilidad de ambientes extremos en la Antártida para tripulantes análogos.

Investigador principal: TE. Gómez Durán César Alexis.

Objetivo general: Diseñar protocolos de seguridad en medicina fisiológica, comunicaciones y robótica de exploración bajo condiciones de ambientes extremos, para la protección de la tripulación.

Figura 2. *Equipo investigador que hizo parte de la X Expedición Científica de Colombia a la Antártida durante el verano Austral 2023-2024*



Nota. De izquierda a derecha: ST Ingrid Xiomara Bejarano Cifuentes, ST Andrés Felipe Urrea Matallana, TE César Alexis Gómez Durán, MY Angélica Rocío Ayala de la Rosa, ST Joseph Néstor David Sequeda. Fuente: FAC. Derechos reservados.

Resultados: En la X Expedición, la FAC desarrolló cuatro proyectos en la Base Bernardo O'Higgins con un equipo de cinco oficiales. La prueba del Rover de exploración evidenció limitaciones en consumo de batería y movilidad en nieve. El sistema de monitoreo ambiental con tarjetas Arduino funcionó, aunque presentó fallas en condiciones extremas. Se implementó un modelo de aprendizaje automático para identificar emociones a partir de expresiones faciales, aportando al monitoreo de la salud mental. En el ámbito fisiológico,

los registros de variabilidad cardíaca y función pulmonar mostraron cambios entre reposo y ejercicio en distintos ambientes. Los resultados resaltan la necesidad de usar componentes adaptados a condiciones polares, optimizar la recolección de datos y fortalecer la seguridad operacional y la adaptabilidad de tripulaciones análogas en entornos extremos. La Figura 2 muestra al equipo investigador que formó parte de la X Expedición Científica de Colombia a la Antártida durante el verano austral de 2023-2024.

Productos derivados:

- Artículo científico revista indexada en proceso de publicación.
- Participación en congreso internacional.

Enfoque espacial en las investigaciones en la Antártida

Las investigaciones realizadas a lo largo de las diferentes Expediciones Científicas de la FAC, enfocadas en la adaptabilidad a condiciones extremas y en el desarrollo de tecnologías como la robótica y el monitoreo fisiológico, proporcionan una base fundamental para comprender los desafíos que plantea un entorno tan hostil. Estos estudios son clave para establecer paralelismos con los retos de la exploración espacial, lo que nos lleva a profundizar en el Enfoque Espacial en las Investigaciones en la Antártida.

Un Entorno Extremo Similar al Espacio

La Antártida es el lugar más inhóspito y aislado del mundo, con temperaturas que pueden bajar hasta -89°C , vientos extremos y la oscuridad total durante largos períodos del año. Este entorno es lo más cercano a las condiciones espaciales que se pueden encontrar en la Tierra, lo que lo convierte en un lugar ideal para llevar a cabo investigaciones que busquen comprender y preparar a las personas para la vida en el espacio exterior. (Cassaro et al., 2021) Por ejemplo, en la Figura 3 se muestra un investigador de la IX Expedición Científica de Colombia a la Antártida durante el verano Austral 2022-2023, capturado con un fondo típico del paisaje antártico.

Figura 3. *Investigador de la IX Expedición Científica de Colombia a la Antártida durante el verano Austral 2022-2023, capturado con un fondo típico del paisaje antártico*



Fuente: Archivo personal de Diego Leonel Malpica Hincapié. Derechos reservados.

La Antártida se ha utilizado como un análogo terrestre para la investigación espacial debido a las similitudes entre sus condiciones ambientales y las del espacio. En particular, las condiciones en algunas partes de la Antártida son similares a las de Marte debido a las bajas temperaturas, la falta de humedad y la alta exposición a la radiación ultravioleta. Esto permite a los científicos realizar experimentos que replican situaciones que podrían encontrarse en misiones espaciales, como la supervivencia de microorganismos en condiciones extremas o la eficacia de trajes espaciales y otros equipos de protección. (S. Pyne, 2007)

Comprender mejor cómo los humanos y otros seres vivos pueden adaptarse y sobrevivir en entornos extraterrestres es uno de los principales objetivos de estas investigaciones. Por ejemplo, la investigación en la biología de extremófilos en la Antártida ha revelado importantes datos sobre la posibilidad de vida en otros planetas. Estos organismos, capaces de sobrevivir en condiciones extremadamente difíciles, proporcionan evidencia sobre cómo la vida podría existir en otros lugares del sistema solar, como en las lunas de Júpiter o Marte. (Mastascusa et al., 2014)

Además, la Antártida ha sido utilizada como un escenario para realizar pruebas de tecnologías y estrategias que podrían ser implementadas en próximas expediciones espaciales. La logística de este continente es extremadamente complicada y costosa, lo que permite a los investigadores simular y

perfeccionar las operaciones que serían necesarias en una misión a Marte, donde el suministro de recursos sería limitado y los tiempos de respuesta para la resolución de problemas serían largos. (Do et al., 2019; NASA, 2020)

Además, la Antártida ofrece un entorno único para estudiar los efectos del aislamiento extremo y la vida en condiciones de confinamiento, aspectos importantes para futuras misiones tripuladas a Marte y más allá. Según estudios recientes, la experiencia en la Antártida puede ayudar a comprender mejor cómo los humanos se adaptan psicológicamente a las condiciones de aislamiento prolongado. Como se mencionó anteriormente, esta adaptación es fundamental para la preparación de misiones espaciales de larga duración. (L. Palinkas, 2003; L. Palinkas & Suedfeld, 2008a; G. Sandal et al., 2018a)

Investigación de la Telemedicina en la Antártida

La Antártida también ha sido un lugar importante para probar tecnologías de telemedicina, que podrían ser cruciales en misiones espaciales de larga duración. Los desafíos médicos que enfrentan las estaciones de investigación antárticas son similares a los que enfrentarían los astronautas en misiones a Marte o en estaciones espaciales permanentes, debido a su distancia y aislamiento. A pesar de las grandes distancias y las condiciones extremas, las tecnologías de telemedicina desarrolladas y perfeccionadas en la Antártida permiten a los médicos en tierra diagnosticar y tratar en tiempo real a los investigadores y al personal en el continente blanco. (A. Woldaregay et al., 2017)

La experiencia en la Antártida ha demostrado que estos sistemas son efectivos en entornos donde la atención médica directa es escasa o inexistente. Por ejemplo, la atención médica continua y efectiva en condiciones de aislamiento extremo ha sido posible gracias a la implementación de sistemas avanzados de monitoreo remoto de la salud y protocolos de tratamiento a distancia. Estos desarrollos están directamente relacionados con futuras misiones espaciales, donde la capacidad de brindar atención médica remota será crucial para garantizar la salud y la seguridad de los astronautas. (Lowe & Warner, 2023; Ting & Wilkes, 2021)

Por otra parte, la Antártida ha sido un laboratorio para la tecnología médica y la resistencia psicológica del personal durante misiones prolongadas, lo cual es crucial para las misiones espaciales. La salud mental y el estrés de los investigadores en la Antártida están siendo monitoreados de cerca, y se están aprendiendo lecciones de estas experiencias para crear mejores estrategias de apoyo psicológico para astronautas. (A. Dalloul et al., 2023; Dietrich et al., 2018; Scarpa et al., 2023)

Simulaciones para Preparar Misiones Espaciales

Las simulaciones llevadas a cabo en la Antártida ofrecen una oportunidad única para preparar a astronautas, científicos y técnicos para misiones espaciales futuras. Las condiciones extremas y el aislamiento del continente permiten la evaluación de las respuestas psicológicas al entorno, el entrenamiento de habilidades de supervivencia y la prueba de tecnologías rigurosas. Por ejemplo, las misiones de entrenamiento en la Antártida incluyen la prueba de procedimientos de emergencia que podrían ser necesarios durante una misión a Marte, así como la prueba de nuevos trajes espaciales diseñados para resistir condiciones extremas. (G. Sandal et al., 2006)

Estas simulaciones también son esenciales para desarrollar y mejorar las estrategias de liderazgo y trabajo en equipo en situaciones de aislamiento y alto estrés. Los equipos en la Antártida deben aprender a operar de manera efectiva en condiciones difíciles, enfrentando desafíos logísticos y personales similares a los que se encontrarían en misiones espaciales. Para preparar a los equipos para los desafíos de la vida en el espacio, este tipo de entrenamiento es esencial. (Nicolas et al., 2022; Smith et al., 2017, 2019)

Selección y Entrenamiento de Astronautas en la Antártida

Debido a sus condiciones extremas, la Antártida se ha convertido en un lugar importante para la selección y entrenamiento de astronautas. La participación en proyectos antárticos permite a los candidatos a astronautas experimentar de primera mano los desafíos del aislamiento, las bajas temperaturas y la vida en un entorno de recursos limitados, lo que es esencial para evaluar su capacidad de adaptación y supervivencia en el espacio. (European Space Agency, 2005)

Además, el entorno antártico brinda una plataforma para el desarrollo de habilidades de trabajo en equipo y liderazgo bajo condiciones de estrés extremo. Los astronautas deben ser capaces de mantener un alto nivel de rendimiento y cohesión del equipo, incluso en situaciones de adversidad, y la Antártida ofrece el entorno ideal para evaluar y desarrollar estas habilidades. Las misiones de entrenamiento en la Antártida también simulan escenarios de emergencia, lo que permite a los astronautas practicar la toma de decisiones importantes en situaciones de alta presión. (I. Schlacht et al., 2015)

En pocas palabras, la Antártida no solo ofrece una alternativa terrestre para la investigación y el entrenamiento espacial, sino que también es un lugar crucial para desarrollar estrategias, habilidades y tecnologías que serán esenciales para futuras misiones espaciales. La investigación y el entrenamiento en la

Antártida han demostrado ser cruciales para la preparación de la exploración espacial, y su relevancia continuará creciendo a medida que nos acercamos a la era de la exploración humana en Marte y más allá.

Desafíos y consideraciones éticas en la investigación Antártica

La investigación en la Antártida, aunque esencial para expandir el conocimiento científico y avanzar en la exploración espacial, presenta desafíos únicos que requieren una atención cuidadosa. El continente antártico es uno de los últimos espacios naturales prístinos en el planeta, y su conservación depende en gran medida de la implementación de prácticas éticas rigurosas. Los científicos que operan en esta región no solo enfrentan las dificultades técnicas y logísticas inherentes a un entorno tan inhóspito, sino que también deben adherirse a estrictos marcos regulatorios, como el Tratado Antártico y el Protocolo de Madrid, que protegen tanto su ecosistema como su estatus de paz y cooperación internacional. Esta sección aborda los principales desafíos y consideraciones éticas que surgen en la investigación antártica, tales como el impacto ambiental, el bienestar de los participantes, el acceso equitativo a las oportunidades científicas y la preservación del marco legal internacional que salvaguarda este invaluable territorio.

Impacto Ambiental

La actividad humana en la Antártida, aunque crucial para avanzar en el conocimiento científico y la exploración espacial, presenta un riesgo significativo para el frágil ecosistema del continente. El impacto ambiental de las expediciones y las instalaciones de investigación puede ser considerable si no se gestiona con cuidado. El Tratado Antártico y el Protocolo de Madrid establecen directrices estrictas para la protección del medio ambiente, subrayando la necesidad de minimizar la generación de residuos, prevenir la contaminación y salvaguardar la biodiversidad única de la región (S. Chown et al., 2012; K. Hughes et al., 2018). A pesar de estas regulaciones, la implementación práctica de estas medidas puede ser un desafío debido a las difíciles condiciones operativas y la creciente presión para ampliar la investigación científica en la región. En la Figura 4 se muestra una imagen típica de la fauna Antártica.

Figura 4. *Fauna antártica. Derechos reservados.*



Fuente: Archivo personal del TE. César Alexis Gómez Durán. Derechos reservados.

El manejo de los residuos es uno de los principales retos. En un entorno tan remoto, la eliminación adecuada de desechos es crítica para evitar la contaminación del suelo y del agua. Las estaciones de investigación deben implementar sistemas eficientes de gestión de residuos, incluyendo la reducción, reutilización y reciclaje de materiales, así como la repatriación de residuos no tratados al país de origen (P. Bharti et al., 2016). Además, la introducción de especies no autóctonas, a través de materiales importados o incluso en las suelas de los zapatos de los investigadores, podría desestabilizar los delicados equilibrios ecológicos del continente, lo que subraya la necesidad de estrictas medidas de bioseguridad (K. Hughes et al., 2020).

Bienestar de los Participantes

El bienestar físico y psicológico de los investigadores y trabajadores en la Antártida es otro aspecto crítico que requiere una atención cuidadosa. Las condiciones extremas, el aislamiento prolongado y la lejanía de los recursos médicos pueden tener un impacto significativo en la salud de los participantes (L. Palinkas & Suedfeld, 2008b). La exposición a temperaturas extremadamente bajas, la oscuridad continua durante los meses de invierno, y la presión psicológica de vivir en un entorno confinado pueden contribuir a una serie de problemas de salud mental, incluyendo la depresión y el estrés (C. Alfano et al., 2021; Pattyn et al., 2024; G. Sandal et al., 2018b).

Para mitigar estos riesgos, es esencial implementar medidas de seguridad rigurosas y programas de apoyo psicológico. Esto incluye la capacitación

previa al despliegue en técnicas de manejo del estrés, la disponibilidad de telemedicina para la atención médica remota, y la provisión de actividades recreativas y de bienestar para los participantes. Además, las evaluaciones psicológicas periódicas y el apoyo social son fundamentales para mantener la moral y el bienestar de los equipos, particularmente durante las largas misiones invernales. (Smith et al., 2017, 2019; Tortello et al., 2021)

Acceso Equitativo

La Antártida es un continente dedicado a la ciencia y la paz, donde la investigación debe ser accesible a científicos de todo el mundo, sin importar su nacionalidad o afiliación institucional, tal como lo estipula el Tratado Antártico. Sin embargo, en la práctica, el acceso a los recursos y oportunidades de investigación en la Antártida puede estar limitado por factores económicos y políticos. Los países con mayor poder económico e infraestructura más desarrollada tienden a dominar la investigación en la región, lo que puede conducir a una distribución desigual de los beneficios científicos. (A. Gulisano et al., 2024)

Fomentar un acceso equitativo a la investigación antártica es crucial para asegurar que los avances científicos sean compartidos globalmente y para mantener el principio de cooperación internacional que es fundamental en la gobernanza de la Antártida. Iniciativas como los programas de colaboración internacional y los consorcios científicos pueden ayudar a mitigar estas disparidades, proporcionando a investigadores de países en desarrollo la oportunidad de participar en proyectos de investigación y acceder a instalaciones en la Antártida. (A. Gulisano et al., 2024)

Protección del Tratado Antártico

El Tratado Antártico, firmado en 1959, es el marco legal que regula todas las actividades en la Antártida, garantizando que el continente se utilice exclusivamente para fines pacíficos y científicos. Una de las consideraciones éticas más importantes en la investigación antártica es el respeto y la protección de este tratado. El tratado prohíbe cualquier actividad militar en la región y establece que los resultados de la investigación científica deben ser compartidos libremente entre los países firmantes, promoviendo la cooperación internacional. (UN. Department of Public Information, 1992)

A medida que la investigación antártica se expande y la tecnología avanza, es crucial que todos los actores involucrados continúen respetando las

disposiciones del Tratado Antártico. Esto incluye no solo evitar actividades militares, sino también garantizar que todas las investigaciones se realicen de manera que minimicen el impacto ambiental y promuevan la paz y la cooperación internacional. La comunidad internacional debe permanecer vigilante ante cualquier intento de explotar los recursos naturales del continente o de utilizar la investigación como un pretexto para fines geopolíticos. (McGee & Liu, 2019)

En resumen, mientras que la Antártida ofrece un entorno único para avanzar en la exploración espacial, es vital que las investigaciones se realicen de manera responsable, con una fuerte consideración de los impactos ambientales, el bienestar de los participantes, el acceso equitativo a la ciencia, y el respeto por el marco legal internacional que protege este continente extraordinario.

Impacto de las investigaciones en la Antártida en el desarrollo espacial del país

La Antártida ha demostrado ser un entorno excepcional para realizar investigaciones que apoyan el desarrollo espacial, especialmente para países emergentes como Colombia. Las condiciones extremas del continente ofrecen un análogo terrestre único para probar tecnologías espaciales y estudiar la adaptabilidad humana a entornos hostiles, características clave para la futura exploración de otros planetas. A través de su participación en expediciones científicas en la Antártida, Colombia ha logrado avances significativos en diferentes áreas como se ha mencionado previamente. Además, estas investigaciones han fortalecido la cooperación internacional y permitido que el país adquiera experiencia crítica en la gestión de operaciones en condiciones similares a las del espacio. La experiencia antártica ha potenciado las capacidades tecnológicas y humanas de la FAC y la industria espacial nacional, consolidando su rol en el ámbito de la investigación polar y preparando el camino para futuros desafíos espaciales.

Contribuciones al Conocimiento Espacial a través de las Investigaciones en la Antártida

La Antártida, debido a sus condiciones extremas, ha sido un entorno invaluable para la investigación espacial, sirviendo como un análogo terrestre para estudios que no solo informan sobre la habitabilidad de otros planetas, sino que también contribuyen al desarrollo de tecnologías críticas para la exploración

espacial. A continuación, se destacan varias áreas en las que la investigación antártica ha realizado contribuciones significativas al conocimiento espacial.

Investigación sobre Vida Microbiana en Condiciones Extremas

La vida microbiana en la Antártida es un área de investigación de gran interés, particularmente en el contexto de la astrobiología. Las condiciones extremas del continente, que incluyen temperaturas extremadamente bajas, alta radiación ultravioleta, y una disponibilidad limitada de agua y nutrientes, simulan las condiciones que se podrían encontrar en otros cuerpos planetarios, como Marte y las lunas heladas de Júpiter y Saturno. Los estudios en los lagos subglaciales de la Antártida, como el Lago Vostok, han revelado la existencia de comunidades microbianas que pueden sobrevivir en entornos anóxicos y con una disponibilidad mínima de energía, lo que proporciona pistas sobre la posible existencia de vida en ambientes extraterrestres extremos. Estos descubrimientos no solo amplían nuestra comprensión de la biología terrestre, sino que también guían las estrategias de búsqueda de vida en otros planetas, sugiriendo que la vida podría existir en formas y lugares que antes se consideraban inhóspitos. (Kochhar et al., 2022)

Estudios sobre Radiación Cósmica

La Antártida es un lugar clave para la investigación de la radiación cósmica, gracias a su atmósfera limpia y la presencia del Campo de Hielo Polar del Sur, que es ideal para la detección de partículas de alta energía. La misión ANITA (Antarctic Impulsive Transient Antenna), por ejemplo, ha sido fundamental en la detección de partículas de alta energía que ingresan a la atmósfera terrestre desde el espacio profundo. Estos estudios permiten una comprensión más profunda de la naturaleza de la radiación cósmica y sus interacciones con la atmósfera terrestre, lo que es crucial para evaluar los riesgos asociados con la exposición a la radiación en el espacio profundo. Los resultados obtenidos ayudan en el diseño de mejores escudos protectores para astronautas y en la planificación de misiones interplanetarias, donde la radiación cósmica es un riesgo significativo. (Hoover et al., 2010)

Observaciones Astronómicas y Estudios de la Atmósfera

La Antártida también ofrece un entorno único para la observación astronómica. La base Concordia, operada conjuntamente por Francia e Italia, es uno de los sitios más importantes para la observación astronómica en la región

debido a su ubicación en el Domo C, donde las condiciones atmosféricas son excepcionalmente estables y secas. Estas características permiten la realización de observaciones precisas de fenómenos astronómicos que serían difíciles de observar en otros lugares del planeta. Por ejemplo, los telescopios ubicados en la Antártida han contribuido a la observación de ondas gravitacionales y al estudio del fondo cósmico de microondas, aportando datos esenciales para comprender la formación y evolución del universo. (M. Burton, 2004; Skinner, 2016)

Desarrollo de Tecnologías de Telemedicina

El proyecto Tempus Pro de la Agencia Espacial Europea (ESA) es un excelente ejemplo de cómo la Antártida se utiliza como un laboratorio para el desarrollo de tecnologías de telemedicina, que son cruciales para las misiones espaciales de larga duración. Este sistema avanzado de atención médica remota ha sido probado en las condiciones extremas de la Antártida, donde los equipos médicos han utilizado Tempus Pro para realizar chequeos médicos inmediatos y mantener comunicaciones de voz en tiempo real. Estas tecnologías no solo benefician a los equipos en la Antártida, sino que también están destinadas a ser utilizadas en futuras misiones a la Luna y Marte, donde la atención médica inmediata y remota será esencial debido a la imposibilidad de evacuar rápidamente a un astronauta enfermo o herido. La validación de estas tecnologías en la Antártida garantiza que estarán listas para enfrentar los desafíos únicos de la exploración espacial. (European Space Agency, 2021)

Estudios de la Adaptación Humana a Entornos Extremos

Las estaciones de investigación en la Antártida también sirven como plataformas para estudiar la adaptación humana a entornos extremos, lo que tiene implicaciones directas para la exploración espacial. Investigaciones sobre la fisiología y psicología de los equipos que pasan largos períodos en la Antártida proporcionan información valiosa sobre cómo los humanos pueden adaptarse a las condiciones de aislamiento, confinamiento y estrés ambiental. Estos estudios son especialmente relevantes para misiones de larga duración en el espacio, como una misión tripulada a Marte, donde los astronautas enfrentarán desafíos similares durante varios meses o incluso años. Comprender cómo el cuerpo y la mente humana responden a estos desafíos es esencial para desarrollar contramedidas efectivas que garanticen la salud y el rendimiento de los astronautas. (Smith et al., 2017, 2019; Tortello et al., 2021)

Investigación sobre Meteoritos y Origen del Sistema Solar

La Antártida es uno de los lugares más ricos en meteoritos del planeta, gracias a la presencia de campos de hielo que actúan como trampas naturales para estas rocas espaciales. La recolección y el estudio de meteoritos en la Antártida han proporcionado valiosos datos sobre la composición del Sistema Solar primitivo y han contribuido a la comprensión de los procesos que dieron origen a los planetas y otros cuerpos celestes. Estos estudios también ofrecen pistas sobre la distribución de materiales orgánicos en el espacio, lo que es fundamental para comprender los orígenes de la vida en la Tierra y la posibilidad de vida en otros planetas. (K. Joy et al., n.d.)

En resumen, las investigaciones realizadas en la Antártida han hecho contribuciones invaluable al conocimiento espacial. Desde el estudio de la vida microbiana en condiciones extremas hasta la investigación de la radiación cósmica y el desarrollo de tecnologías de telemedicina, la Antártida continúa siendo un laboratorio natural que impulsa el avance de la ciencia espacial y prepara a la humanidad para los desafíos de la exploración más allá de nuestro planeta.

Influencia en el Desarrollo de la Fuerza Aeroespacial Colombiana y la Industria Espacial Nacional

La participación de Colombia en investigaciones en la Antártida ha sido un catalizador para el avance tecnológico y el desarrollo de la industria espacial del país. Este entorno extremo ha ofrecido una plataforma única para probar tecnologías y desarrollar habilidades que son críticas para la exploración espacial.

Colaboración Internacional y Fortalecimiento de Capacidades Aeroespaciales

La integración de Colombia en redes de investigación antártica y espacial ha fortalecido sus capacidades tecnológicas y operativas a nivel nacional e internacional. Al colaborar con instituciones y países con una larga trayectoria en exploración polar y espacial, Colombia ha podido acceder a conocimientos avanzados y tecnologías de punta. Estas colaboraciones han resultado en un fortalecimiento significativo del sector aeroespacial colombiano, permitiendo a la Fuerza Aérea Colombiana mejorar sus capacidades en ámbitos relacionados con la operatividad de satélites y la investigación espacial. (Barrero-Barrero,

Tovar-Zambrano, Ocampo-Nahar, et al., 2022; Barrero-Barrero, Tovar-Zambrano, Villegas-Cardona, et al., 2022; C. Calderon & Mesa, 2019)

Desarrollo y Adaptación de Tecnologías para Condiciones Extremas

Los proyectos desarrollados en la Antártida, como los sistemas de soporte vital y los hábitats móviles, han impulsado el desarrollo de tecnologías que son fundamentales para la exploración espacial. Estos desarrollos no solo han mejorado la capacidad de Colombia para operar en entornos extremos, sino que también han fomentado la innovación en áreas como la robótica y la ingeniería de sistemas, crucial para el diseño de vehículos exploratorios y hábitats presurizados que pueden ser utilizados en futuras misiones a la Luna o Marte. (Barrero-Barrero, Tovar-Zambrano, Ocampo-Nahar, et al., 2022; Barrero-Barrero, Tovar-Zambrano, Villegas-Cardona, et al., 2022; C. Calderon & Mesa, 2019)

Establecimiento de Estaciones de Comunicación Estratégicas

La implementación de estaciones de comunicación en la Antártida para mejorar la conectividad con satélites colombianos es un paso estratégico hacia la autonomía en la gestión de infraestructuras espaciales. Esta capacidad no solo mejora la eficiencia de las operaciones satelitales, sino que también refuerza la seguridad y la soberanía nacional sobre los datos e información que estos satélites generan. (Barrero-Barrero, Tovar-Zambrano, Ocampo-Nahar, et al., 2022; Barrero-Barrero, Tovar-Zambrano, Villegas-Cardona, et al., 2022; C. Calderon & Mesa, 2019)

Capacitación y Preparación de Personal para Misiones Espaciales

La experiencia en la Antártida es invaluable para la preparación del personal de la FAC, ofreciendo un entorno real para entrenar en la gestión de recursos, la adaptación a condiciones extremas, y la resolución de problemas en situaciones críticas. Estas habilidades son transferibles a misiones espaciales, donde el manejo eficiente de recursos y la capacidad para trabajar bajo presión son esenciales. Además, la experiencia adquirida contribuye significativamente a la preparación psicológica y física del personal, preparándolos para los desafíos de las misiones de larga duración en el espacio. (Barrero-Barrero, Tovar-Zambrano, Ocampo-Nahar, et al., 2022; Barrero-Barrero, Tovar-Zambrano, Villegas-Cardona, et al., 2022; C. Calderon & Mesa, 2019)

Contribución a la Cooperación Internacional en la Exploración Espacial

La presencia activa de Colombia en la Antártida también facilita la participación del país en diálogos internacionales sobre políticas espaciales y cooperación científica. Esto no solo enriquece el perfil internacional de Colombia, sino que también asegura que el país esté al tanto de los desarrollos en la gobernanza del espacio y participe activamente en la formulación de normativas que afectan la exploración y el uso del espacio exterior. (Barrero-Barrero, Tovar-Zambrano, Ocampo-Nahar, et al., 2022; C. Calderon & Mesa, 2019; Ramos et al., 2012)

En resumen, la investigación antártica ha sido una piedra angular para el desarrollo de la industria espacial colombiana, proporcionando un entorno para probar tecnologías, desarrollar colaboraciones internacionales y preparar al personal para los desafíos de la exploración espacial futura. Este esfuerzo continuado no solo fortalece las capacidades técnicas y humanas dentro del país, sino que también sitúa a Colombia en una posición ventajosa en la arena espacial global.

Conclusión: forjando el futuro a través de la ciencia y la exploración

La participación de Colombia en la investigación antártica ha representado un hito trascendental tanto para la ciencia nacional como para el fortalecimiento de la industria aeroespacial. A través de sus expediciones, la FAC ha consolidado un rol estratégico en la exploración de uno de los entornos más desafiantes del planeta, aportando conocimientos en áreas como la radiación cósmica, la adaptación fisiológica y psicológica, la seguridad operacional y el desarrollo de tecnologías innovadoras como turbinas eólicas, drones y sistemas de comunicación satelital. Uno de los hallazgos más relevantes ha sido la notable capacidad de adaptación del cuerpo humano a condiciones extremas, reafirmando el valor de la Antártida como escenario análogo para la investigación espacial y la preparación de futuras misiones de larga duración.

De cara al futuro, se recomienda profundizar en el desarrollo de tecnologías que optimicen la eficiencia energética y las comunicaciones en ambientes hostiles, así como en la investigación sobre los efectos del aislamiento y la exposición prolongada en el bienestar físico y mental de las tripulaciones. Estos avances no solo fortalecerán los protocolos de preparación para misiones espaciales y terrestres en condiciones extremas, sino que también

consolidarán la presencia de Colombia en la investigación polar, posicionando al país como un actor clave en la exploración de ambientes extremos y en la preparación para los retos de la exploración espacial.

Referencias bibliográficas

- Alfano, C., Bower, J., Connaboy, C., Agha, N., Baker, F., Smith, K., So, C., & Simpson, R. (2021). Mental health, physical symptoms and biomarkers of stress during prolonged exposure to Antarctica's extreme environment. *Acta Astronautica*, 181, 405–413. <https://doi.org/10.1016/J.ACTAASTRO.2021.01.051>
- Barrero-Barrero, D., Tovar-Zambrano, M., Ocampo-Nahar, G., Pinilla-Pinilla, T., Núñez-Rodríguez, D., Salamanca-Guzmán, G., & Conde-Mesa, J. (2022). La importancia de la Antártida para Colombia: Geopolítica, Ciencia y Global Common. In Sello Editorial ESDEG (Ed.), *Sello Editorial ESDEG*. Sello Editorial ESDEG. <https://doi.org/10.25062/9786287602199>
- Barrero-Barrero, D., Tovar-Zambrano, M., Villegas-Cardona, A., Álvarez-Calderón, C., Rivera-Páez, S., Ramírez-Pedraza, Y., Torres-Bohórquez, E., & Baquero-Valdés, F. (2022). La importancia de la Antártida para Colombia: Medio Ambiente, Seguridad Internacional y Contribución Militar. In *Sello Editorial ESDEG*. Sello Editorial ESDEG. <https://doi.org/10.25062/9786287602205>
- Bharti, P., Sharma, B., Singh, R., & Tyagi, A. (2016). Waste Generation and Management in Antarctica. *Procedia Environmental Sciences*, 35, 40–50. <https://doi.org/10.1016/J.PROENV.2016.07.004>
- Burton, M. (2004). *Astronomy in Antarctica*. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2571-6_1
- Calderon, C., & Mesa, E. (2019). Geopolítica del Polo Sur: Intereses y necesidades de Colombia en el Tratado de la Antártida. *Revista Científica General José María Córdova*, 17(28), 721–748. <https://doi.org/10.21830/19006586.521>
- Campos Chaparro, C., Corzo Zamora, M., Alvarado Yepes, A., Sequeda Ramón, J., Bejarano Cifuentes, I., & Malpica Hincapié, D. (2022). Estudio de riesgos en escenarios naturales colombianos con potencial uso para

- misiones espaciales análogas. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada (RCTA)*, 2(40), 110–120. <https://doi.org/10.24054/RCTA.V2I40.2359>
- Cassaro, A., Pacelli, C., Aureli, L., Catanzaro, I., Leo, P., & Onofri, S. (2021). Antarctica as a reservoir of planetary analogue environments. *Extremophiles: Life under Extreme Conditions*, 25(5–6), 437–458. <https://doi.org/10.1007/S00792-021-01245-W>
- Chown, S., Lee, J., Hughes, K., Barnes, J., Barrett, P., Bergstrom, D., Convey, P., Cowan, D., Crosbie, K., Dyer, G., Frenot, Y., Grant, S., Herr, D., Kennicutt, M., Lamers, M., Murray, A., Possingham, H., Reid, K., Riddle, M., ... Wall, D. (2012). Challenges to the future conservation of the antarctic. *Science*, 337(6091), 158–159. https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1222821/SUPPL_FILE/1222821.CHOWN.SM.PDF
- Comando General de las Fuerzas Militares de Colombia. (2018). *Exitosa participación de la Fuerza Aérea Colombiana en II Campaña Antártica*. <https://www.cgfm.mil.co/es/multimedia/noticias/exitosa-participacion-de-la-fuerza-aerea-colombiana-en-ii-campana-antartica>
- Comando General de las Fuerzas Militares de Colombia. (2023). *Por Novena vez las Fuerzas Militares de Colombia llegarán a la Antártica*. <https://www.cgfm.mil.co/es/multimedia/noticias/por-novena-vez-las-fuerzas-militares-de-colombia-llegaran-la-antartica>
- Comisión Colombiana del Océano. (2017). *Listado de proyectos aprobados para la IV Expedición Científica de Colombia a la Antártida*. <https://cco.gov.co/listado-de-proyectos-aprobados-para-la-iv-expedicion-cientifica-de-colombia-a-la-antartida/>
- Comisión Colombiana del Océano. (2021). *Informe de la VI Expedición Científica de Colombia a la Antártica*. <https://cco.gov.co/informe-de-la-vi-expedicion-cientifica-de-colombia-a-la-antartica/>
- Comisión Colombiana del Océano. (2023). *IX Expedición Científica y V Campaña Aérea de Colombia a la Antártica*. <https://cco.gov.co/ix-expedicion-cientifica-y-v-campana-aerea-de-colombia-a-la-antartica/>
- Dalloul, A., Miramirkhani, F., & Kouhalvandi, L. (2023). A Review of Recent Innovations in Remote Health Monitoring. *Micromachines*, 14(12). <https://doi.org/10.3390/MI14122157>

- Dietrich, D., Dekova, R., Davy, S., Fahrni, G., & Geissbühler, A. (2018). Applications of Space Technologies to Global Health: Scoping Review. *Journal of Medical Internet Research*, 20(6). <https://doi.org/10.2196/JMIR.9458>
- Do, S., Shishko, R., Antonelli, D., Cichan, T., Collom, R., Conrad, P., Coerstone, V., Davis, R., Edwards, C., Fuller, M., Goodliff, K., Hoffman, S., Saikia, S., Sheppard, P., Shull, S., Stone, D., & Whetsel, C. (2019). *Logistics is a Key Enabler of Sustainable Human Missions to Mars Executive Summary*. <https://assets.pubpub.org/1al9pba3/51579295653594.pdf>
- European Space Agency. (2005). *Mission to Mars via Antarctica*. https://www.esa.int/Science_Exploration/Human_and_Robotic_Exploration/Research/Mission_to_Mars_via_Antarctica
- European Space Agency. (2021). *ESA's telemedicine device passes extreme Antarctica test*. <https://blogs.esa.int/exploration/esas-telemedicine-device-passes-extreme-antarctica-test/>
- Fuerza Aérea Colombiana. (2015). *Aeronave de Colombia por primera vez llegó a la Antártida*. <https://www.fac.mil.co/es/noticias/aeronave-de-colombia-por-primera-vez-llego-la-antartida>
- Fuerza Aérea Colombiana. (2019). *Fuerza Aérea participa en III Campaña Antártica*. <https://www.fac.mil.co/es/noticias/fuerza-aerea-participa-en-iii-campana-antarctica>
- Fuerza Aérea Colombiana. (2020). *IV Campaña Antártica de la Fuerza Aérea en su recta final*. <https://www.fac.mil.co/es/noticias/iv-campana-antarctica-de-la-fuerza-aerea-en-su-recta-final>
- Fuerza Aérea Colombiana. (2024). *Investigadores de la FAC harán ciencia en el Continente Blanco*. <https://www.fac.mil.co/es/noticias/investigadores-de-la-fac-haran-ciencia-en-el-continente-blanco>
- Gómez-Tabares, W. (2021). Peligros de la operación aérea en la Antártida para gestionar la seguridad operacional de la Fuerza Aérea Colombiana. *Revista de Relaciones Internacionales, Estrategia y Seguridad*, 16(1), 77-109–177–109. <https://doi.org/10.18359/RIES.5274>
- Gulisano, A., Saarikoski, P., Caccavo, J., & Beck, I. (2024). Addressing Equality, Diversity, and Inclusion from within the Scientific Committee on Antarctic Research. *Antarctic Affairs*, 10, 55–62. www.antarcticaaffairs.org

- Herrera-Castro, J. (2017). Efectos del ejercicio aeróbico en la composición corporal, resistencia cardiovascular, ciclo circadiano, síndrome T3 Polar en la primera misión de Colombia a la Antártida. *Ciencia y Poder Aéreo*, 12(1), 72–90. <https://doi.org/10.18667/CIENCIAPODERAEREO.562>
- Hoover, S., Nam, J., Gorham, P., Grashorn, E., Allison, P., Barwick, S., Beatty, J., Belov, K., Besson, D., Binns, W., Chen, C., Chen, P., Clem, J., Connolly, A., Dowkontt, P., Duvernois, M., Field, R., Goldstein, D., Viereg, A., ... Wu, F. (2010). Observation of ultrahigh-energy cosmic rays with the ANITA balloon-borne radio interferometer. *Physical Review Letters*, 105(15). <https://doi.org/10.1103/PHYSREVLETT.105.151101>
- Hughes, K., Constable, A., Frenot, Y., López-Martínez, J., McIvor, E., Njåstad, B., Terauds, A., Liggett, D., Roldan, G., Wilmotte, A., & Xavier, J. (2018). Antarctic environmental protection: Strengthening the links between science and governance. *Environmental Science & Policy*, 83, 86–95. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSCI.2018.02.006>
- Hughes, K., Pescott, O., Peyton, J., Adriaens, T., Cottier-Cook, E., Key, G., Rabitsch, W., Tricarico, E., Barnes, D., Baxter, N., Belchier, M., Blake, D., Convey, P., Dawson, W., Frohlich, D., Gardiner, L., González-Moreno, P., James, R., Malumphy, C., ... Roy, H. (2020). Invasive non-native species likely to threaten biodiversity and ecosystems in the Antarctic Peninsula region. *Global Change Biology*, 26(4), 2702. <https://doi.org/10.1111/GCB.14938>
- UN. Department of Public Information. (1992). *Protecting the Earth's last great wilderness: Antarctica*. UN, Department of Public Information,. <https://digitallibrary.un.org/record/153710>
- Jiménez Lozano, C. (2020). Installing a prototype wind turbine to produce energy in Antarctica to allow a permanent Colombian scientific base to be established. *Advances in Polar Science*, 31(4), 258–273. <https://doi.org/10.13679/J.ADVPS.2020.0031>
- Joy, K., Smedley, A., Macarthur, J., Van Verre, W., Marsh, L., Rose, M., Harvey, T., Tart Eze, R., Jones, R., Abrahams, I., Wilson, J., Peyton, A., Gerrish, L., Baum, J., Raymond, G., Taylor, R., & Evatt, G. (n.d.). *Overview of the Lost Meteorites of Antarctica field campaigns*. <https://doi.org/10.1111/maps.14114>

- Kochhar, N., Kavya, I., Shrivastava, S., Ghosh, A., Rawat, V., Sodhi, K., & Kumar, M. (2022). Perspectives on the microorganism of extreme environments and their applications. *Current Research in Microbial Sciences*, 3. <https://doi.org/10.1016/J.CRMICR.2022.100134>
- Lowe, J., & Warner, M. (2023). Optimising remote health care delivery in Antarctica: a review of the current capabilities utilised in the British Antarctic Territory. *International Journal of Circumpolar Health*, 82(1). <https://doi.org/10.1080/22423982.2023.2230633>
- Mastascusa, V., Romano, I., Di Donato, P., Poli, A., Della Corte, V., Rotundi, A., Bussoletti, E., Quarto, M., Pugliese, M., & Nicolaus, B. (2014). Extremophiles survival to simulated space conditions: an astrobiology model study. *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 44(3), 231–237. <https://doi.org/10.1007/S11084-014-9397-Y>
- McGee, J., & Liu, N. (2019). The challenges for antarctic governance in the early twenty-first century. *Australian Journal of Maritime & Ocean Affairs*, 11(2), 73–77. <https://doi.org/10.1080/18366503.2019.1634940>
- Nicolas, M., Martinent, G., Palinkas, L., & Suedfeld, P. (2022). Dynamics of stress and recovery and relationships with perceived environmental mastery in extreme environments. *Journal of Environmental Psychology*, 83. <https://doi.org/10.1016/J.JENVP.2022.101853>
- Palinkas, L. (2003). The Psychology of Isolated and Confined Environments: Understanding Human Behavior in Antarctica. *American Psychologist*, 58(5), 353–363. <https://doi.org/10.1037/0003-066X.58.5.353>
- Palinkas, L., & Suedfeld, P. (2008a). Psychological effects of polar expeditions. *Lancet*, 371(9607), 153–163. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(07\)61056-3](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(07)61056-3)
- Palinkas, L., & Suedfeld, P. (2008b). Psychological effects of polar expeditions. *The Lancet*, 371, 153–163. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(07\)61056-3](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(07)61056-3)
- Pattyn, N., Charlesworth, S., & Manzey, D. (2024). Mental Performance in Extreme Environments (Space and Antarctica). *Handbook of Mental Performance*, 296–315. <https://doi.org/10.4324/9781003378969-17>
- NASA. (2020). *Preparing For Mars*. <https://www.nasa.gov/podcasts/houston-we-have-a-podcast/preparing-for-mars/>

- Pyne, S. (2007). The extraterrestrial Earth: Antarctica as analogue for space exploration. *Space Policy*, 23(3), 147–149. <https://doi.org/10.1016/J.SPACEPOL.2007.06.006>
- Quiñonez, F., Núñez, L., Casallas, E., Basto-Gonzalez, V., González-Arango, J., Ospina-Henao, P., Hernández-Gómez, A., & Pérez-Arias, C. (2018). *Radiation Dose Charts for Long Geodetic and Polar Flights with CARI-7A*. <https://arxiv.org/abs/1812.02073v3>
- Ramos, M., de Pablo, M., Sebastian, E., Armien, C., & Gómez-Elvira, J. (2012). Temperature gradient distribution in permafrost active layer, using a prototype of the ground temperature sensor (REMS-MSL) on deception island (Antarctica). *Cold Regions Science and Technology*, 72, 23–32. <https://doi.org/10.1016/J.COLDREGIONS.2011.10.012>
- Sandal, G., Leon, G., & Palinkas, L. (2006). Human challenges in polar and space environments. *Life in Extreme Environments*, 399–414. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6285-8_25
- Sandal, G., van de Vijver, F., & Smith, N. (2018a). Psychological hibernation in antarctica. *Frontiers in Psychology*, 9. <https://doi.org/10.3389/FPSYG.2018.02235/BIBTEX>
- Sandal, G., Van de Vijver, F., & Smith, N. (2018b). Psychological Hibernation in Antarctica. *Frontiers in Psychology*, 9. <https://doi.org/10.3389/FPSYG.2018.02235>
- Scarpa, J., Parazynski, S., & Strangman, G. (2023). Space exploration as a catalyst for medical innovations. *Frontiers in Medicine*, 10. <https://doi.org/10.3389/FMED.2023.1226531/BIBTEX>
- Schlacht, I., Nazir, S., & Manca, D. (2015). Space vs. Chemical Domains: Virtual and Real Simulation to Increase Safety in Extreme Contexts. *Procedia Manufacturing*, 3, 1817–1824. <https://doi.org/10.1016/J.PROMFG.2015.07.221>
- Secretaría del Tratado Antártico. (1961). *El Tratado Antártico*. <https://www.ats.aq/s/antarctic treaty.html>
- Secretaría del Tratado Antártico. (1991). *El Protocolo al Tratado Antártico sobre Protección del Medio Ambiente*. <https://www.ats.aq/s/protocol.html>
- Sequeda Ramón, J., Campos Chaparro, C., Bejarano Cifuentes, I., & Jiménez Sánchez, J. (2023). Misiones análogas espaciales como investigación

- para el desarrollo de ciencia y tecnología en la Fuerza Aérea Colombiana. *Ciencia y Poder Aéreo*, 18(2). <https://doi.org/10.18667/CIENCIAYPODERAEREO.750>
- Skinner, R. (2016). Astronomy in Antarctica, current projects, future goals and challenges. *Postgraduate Certificate in Antarctic Studies*, 18. <http://hdl.handle.net/10092/13840>
- Smith, N., Keatley, D., Sandal, G., Kjaergaard, A., Stoten, O., Facer-Childs, J., & Barrett, E. (2019). Relations Between Daily Events, Coping Strategies and Health During a British Army Ski Expedition Across Antarctica. *Sage Journals*, 53(1), 91–116. <https://doi.org/10.1177/0013916519886367>
- Smith, N., Kinnafick, F., & Saunders, B. (2017). Coping Strategies Used During an Extreme Antarctic Expedition. *Journal of Human Performance in Extreme Environments*, 13(1). <https://doi.org/10.7771/2327-2937.1078>
- Ting, L., & Wilkes, M. (2021). Telemedicine for Patient Management on Expeditions in Remote and Austere Environments: A Systematic Review. *Wilderness and Environmental Medicine*, 32(1), 102–111. <https://doi.org/10.1016/J.WEM.2020.09.009>
- Torres Parra, R. (2015). *Informe de la II Expedición Científica de Colombia a la Antártida*.
- Tortello, C., Folgueira, A., Nicolas, M., Cuiuli, J., Cairolí, G., Crippa, V., Barbarito, M., Abulafia, C., Golombek, D., Vigo, D., & Plano, S. (2021). Coping with Antarctic demands: Psychological implications of isolation and confinement. *Stress and Health*, 37(3), 431–441. <https://doi.org/10.1002/SMI.3006>
- Vargas-Ríos, O., Díaz-Triana, J., Reyes-Bejarano, S., & Gomez-Ruiz, P. (2014). Agenda Científica Antártica de Colombia 2014 - 2035. *Grupo de Restauración Ecológica GREUNAL*, 134. <http://www.cco.gov.co>
- Woldaregay, A., Walderhaug, S., & Hartvigsen, G. (2017). Telemedicine Services for the Arctic: A Systematic Review. *JMIR Medical Informatics*, 5(2). <https://doi.org/10.2196/MEDINFORM.6323>

CAPÍTULO 9.

Colombia: Puerto de Lanzamiento Espacial, una proyección geoestratégica^{46*}

CR. (R) Ervin Gaitán Serrano⁴⁷

Escuela Superior de Guerra General “Rafael Reyes Prieto”

Resumen: El desarrollo espacial mundial crece a pasos acelerados, nuevos actores aparecen con objetivos cada vez más variados y Colombia se ha visto rezagada en esta carrera. No obstante, el país cuenta con un potencial importante para ser explotado, no solo para disminuir las brechas existentes, sino también para posicionarse geopolíticamente en la región como un actor espacial de relevancia. A través de la caracterización de las ventajas geográficas, la delimitación de las variables geoestratégicas de análisis y la propuesta de una hoja de ruta, esta investigación aporta una estrategia para potencializar el desarrollo espacial colombiano y proyectar poder a partir de la consolidación de un Puerto de Lanzamiento Espacial. Un resultado que, invita a la acción del Estado para la consolidación de sus intereses nacionales en el espacio ultraterrestre.

Palabras Claves: Astropolítica, Puerto de Lanzamiento Espacial, Poder.

Introducción

En 1957 la Unión Soviética utilizó una variación del cohete R7 conocido como el primer misil balístico intercontinental (ICBM) del mundo, para poner un satélite artificial en órbita. Este sería, el primer lanzamiento desde

^{46*} Capítulo de libro producto de investigación realizada como requisito de grado de la Maestría de Geopolítica y Estrategia de la Escuela Superior de Guerra. “General Rafael Reyes Prieto”, Colombia.

⁴⁷ Coronel de la Reserva Activa de la Fuerza Aeroespacial Colombiana. Piloto militar. Administrador Aeronáutico de la Escuela Militar de Aviación “Marco Fidel Suárez”, Colombia. Especialista en Gerencia de la Seguridad Aérea del Instituto Militar Aeronáutico. Especialista en Seguridad y Defensa Nacional y Especialista en Estado Mayor de la Escuela Superior de Guerra “General Rafael Reyes Prieto”. Contacto: arcangel1375@gmail.com.

un puerto espacial, hoy conocido como el cosmodromo de Baikonur (CSIS, 2019). Desde entonces, se ha vivenciado un vertiginoso desarrollo en la exploración y explotación del espacio ultraterrestre que ha evolucionado desde la investigación científica hasta los recientes propósitos turísticos. Esta actividad que da cuenta hoy de 16 agencias con capacidad de completar lanzamientos espaciales (WPR, 2023), ha impulsado un exponencial avance tecnológico con aplicación principalmente en el campo de las comunicaciones, la navegación, meteorología, la observación de la tierra, así como también en el desarrollo del poder militar cada vez más asociado a los recursos espaciales (USSF, 2020).

Es así como, el interés del hombre se ha fijado con intensidad en el espacio y en las ventajas estratégicas que este les proporciona a los Estados en la búsqueda de sus intereses, especialmente de aquellos que han consolidado importantes activos espaciales en soporte de su poder nacional. (Dolman, 2012). Hoy, el espacio y su influencia en todos los ámbitos de la realidad mundial cobra una gran relevancia hasta el punto de transformarse en un ambiente de alta competencia, en el que los Estados protegen activamente sus recursos estratégicos.

En este sentido, la proyección de poder espacial se convierte en una prioridad desde la visión realista en la interacción del sistema internacional. Concepto estudiado ampliamente desde los postulados de la teoría Astropolítica, en la que se propone que la influencia y dominación de segmentos geográficos, terrestres y espaciales se constituyen en la vía para el posicionamiento geopolítico y la dominación de los destinos de la humanidad (Dolman, 2002).

En el caso colombiano, una capacidad creciente que la Fuerza Aérea Colombiana (FAC) ha impulsado desde el lanzamiento del nano satélite FACSAT-1 el 28 de noviembre de 2018, ha despertado un especial interés por el espacio. Conscientes de la necesidad de cerrar las brechas de conocimiento y tecnología existentes con los países de vanguardia, el gobierno nacional promovió la “Política de Desarrollo Espacial: Condiciones Habilitantes para el Impulso de la Competitividad Nacional” (CONPES, 2020), en un esfuerzo por ampliar la visión estratégica y la articulación del Estado hacia la consecución de los objetivos nacionales en esta nueva frontera.

Una política que reconoce las condiciones excepcionales de una posición privilegiada que proyecta naturalmente al país con una vocación geoestratégica y espacial. Es entonces, cuando surge la pregunta de esta investigación: ¿Cómo podría Colombia desarrollar su capacidad espacial y proyectar su poder regional a partir de la consolidación de un Puerto de Lanzamiento

Espacial?, en función de la cual, se propone una discusión argumentativa que se despliega en tres objetivos.

En el primero de ellos, se hace la caracterización del potencial geográfico del país para su proyección como Puerto de Lanzamiento Espacial. Partiendo de su posición sobre la línea del Ecuador compartida únicamente por 13 países en el globo y que, sumada a sus características geomorfológicas, hacen de Colombia un caso de estudio único. En el segundo, se hace una delimitación de las variables geoestratégicas que servirán de base para la consolidación de los objetivos nacionales en materia espacial y la proyección geopolítica regional.

Por último, se propone una hoja de ruta para la constitución del país como un Puerto de Lanzamiento Espacial. En ella, tiene cabida la acción de todos los instrumentos del poder nacional con la integración de la institucionalidad y el potencial privado, en un esfuerzo por impulsar el desarrollo integral y ganar poder influenciador en la región.

Metodología

La presente es una investigación de tipo no experimental, correlacional, de carácter cualitativo. En razón a la naturaleza documental de la misma, requirió de la revisión exhaustiva de fuentes bibliográficas provenientes de bases de datos especializadas y publicaciones en los temas de referencia espacial y geopolítica.

Para el desarrollo del primer objetivo, se llevó a cabo una comparación de la información obtenida de encuestas semiestructuradas practicadas a profesionales de diversas áreas del conocimiento vinculados al sector espacial, con el fin de consolidar una óptica interdisciplinaria que fuera puesta en contraste con la teoría existente y extractada del análisis bibliográfico. En el segundo objetivo, se llevó a cabo una sintaxis desde el análisis cualitativo de siete teorías de autores clásicos y contemporáneos para la delimitación de las variables estratégicas.

En el tercer y último objetivo, se hizo la correlación de la información obtenida previamente a la luz del modelo para la formulación estratégica diseñado por Deibel (2007), a fin de estructurar una propuesta para la consolidación de Colombia como un Puerto Espacial.

El procesamiento de la información obtenida de fuentes primarias y secundarias, como entrevistas, libros, artículos de revisión, artículos científicos, informes y documentos gubernamentales, entre otros, se llevó a cabo por medio de una plataforma análisis cualitativo, que permitió la relación de las categorías a priori con las teorías, conceptos y modelo relacionados de una forma dinámica.

Marco teórico y conceptual

El presente trabajo de investigación se enmarca en la formulación de una estrategia para la articulación del potencial colombiano con el propósito de establecerse como un Puerto de Lanzamiento Espacial y aumentar su influencia geopolítica regional. El estudio se basó en los postulados de la teoría de la Astropolítica de Everett Dolman en el que la influencia y dominación de segmentos geográficos, terrestres y espaciales se constituyen en la vía para el posicionamiento geopolítico de las naciones en el sistema internacional.

En esta teoría confluyen conceptos de la geopolítica clásica planteados por Alfred Mahan en su visión del desarrollo de la influencia mundial a través del dominio por medio del poder marítimo (Mahan, 1890). Y por Halford Jhon Mackinder, quien identificó el área de Asia Central como el pivote geográfico histórico, mediante el cual se obtiene el dominio de la isla central o Euro-Asia, para así dominar el mundo en una concepción netamente terrestre (Mackinder, 1904).

Dolman identifica segmentos geográficos y su importancia desde la concepción Astropolítica para los efectos de dominación, entendiéndose como una teoría realista en la interacción frente al sistema internacional. El primero de ellos es la tierra y su atmosfera, que es el punto de origen de las capacidades espaciales con el lanzamiento de naves y el soporte de dicha operación. Y es sobre este segmento y los potenciales en el desarrollo de lo espacial y su influencia Astropolítica, que se sustentará el principal argumento de esta investigación, en la que Colombia por su ubicación geográfica y otros factores favorables se proyecta como puerto espacial por excelencia.

El segundo segmento es la Tierra-Espacio, en donde se dan la mayoría de las actividades espaciales, sobre todo las militares que están directamente relacionadas con la dominación; allí es donde se ubican la mayoría recursos que soportan las comunicaciones, la navegación, el reconocimiento y el estudio de la meteorología. El tercero ha sido identificado como Espacio Lunar, que va desde la órbita geoestacionaria hasta la órbita lunar, y el último

de ellos, el Espacio Solar, que se extiende desde la anterior órbita hasta el todo lo que existe en el sistema solar. (Dolman, 2002).

Tal como lo propone la teoría “quien domina la órbita próxima terrestre domina su espacio, quien domina su espacio domina la Tierra y quien domine esta domina el destino de la humanidad” (Dolman, 2002). Si bien, el estudio no tomó como referencia todos los segmentos antes descritos, si se valió de los postulados del segmento Tierra, para construir un concepto estratégico para mejorar el posicionamiento geopolítico colombiano en la región, sobre la base del desarrollo de capacidades espaciales ligado al establecimiento de un Puerto de Lanzamiento Espacial.

En adición a la teoría descrita anteriormente, se tomó como referencia el Modelo de Terry L. Deibel, plasmado en su libro *Foreing Affairs Strategy, Logic for American Statecraft*, mediante el cual los Estados Unidos ha construido la estrategia de asuntos internacionales para el logro de sus intereses nacionales. Este modelo, incorpora el análisis del contexto internacional y nacional que conduce a la formulación de unos supuestos que permiten la identificación de oportunidades y amenazas. A esto se suma, la revisión de los intereses nacionales y el poder e influencia, para finalmente consolidar el diseño de la estrategia a partir de la formulación de cursos de acción y políticas, integrando las variables previamente analizadas.

Caracterización del potencial geográfico de Colombia como Puerto de Lanzamiento Espacial

Para el desarrollo de capacidades espaciales, es de vital importancia entender cómo la geografía y su interacción con otras variables, juega un papel determinante para facilitar o dificultar estos propósitos estratégicos, especialmente en la búsqueda de la eficiencia e integración de los esfuerzos para fomentar el desarrollo, adquirir y mantener capacidades e incorporarse al mercado de la economía espacial. En este sentido, la identificación de las principales características que, por condición de la posición y geografía colombiana, inciden en el desarrollo espacial y particularmente en el objetivo de la proyección de los puertos de lanzamiento, cobra gran relevancia para al objeto de la presente investigación.

Frente al contraste con la teoría que se ha tomado como referencia; en primer término, es preciso poner en perspectiva los postulados de Dolman en el que la geografía es un factor determinante para la proyección estratégica de

las naciones en su desarrollo espacial. En este caso, frente a las realidades propuestas en la teoría enunciada, se traen las ventajas que han sido aprovechadas por los actores estatales y no estatales en sus proyectos espaciales y que enmarcan a Colombia en una posición de privilegio, digna de ser explotada para sus intereses nacionales.

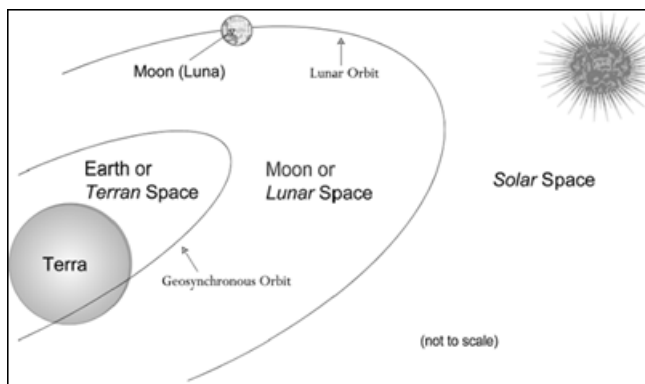
Contextualizando la Astropolítica y la Geografía

En el estudio de la Astropolítica, Everett Dolman propone una “teoría política determinista que manipula la relación entre el poder del Estado y el control del espacio exterior con el propósito de extender el dominio de un solo Estado sobre toda la Tierra” (Dolman, 2002). Para Dolman, “el espacio exterior ahora ocuparía el papel que antaño tenían los océanos, clasificando las regiones espaciales en referencia a su posición respecto a la Tierra” (Castro, 2020). Es así, como desde esta categorización se identifican los sectores espaciales que se constituyen en el interés de la Astropolítica para consumir su enunciado: “quien domina la órbita próxima terrestre domina su espacio, quien domina su espacio, domina la Tierra y quien domine esta domina el destino de la humanidad” (Dolman, 2002).

Surge entonces, la necesidad de entender desde esta teoría, cuáles son las regiones en las que se divide la vasta área de influencia, para centrar la atención en la de mayor interés para esta investigación:

- **Terra o Tierra** incluyendo la atmósfera que se extiende desde la superficie hasta justo por debajo de la altitud más baja capaz de soportar una órbita sin motor.... Es en la superficie de la Tierra (Terra) donde se realizan todos los lanzamientos espaciales actuales....
- **El espacio terrestre** desde la órbita más baja viable hasta un poco más allá de la altitud geoestacionaria (36.000 km). El espacio terrestre es el medio operativo de los satélites de reconocimiento y navegación más avanzados del Ejército....
- **El espacio lunar** es la región que va desde la órbita geoestacionaria hasta la órbita lunar. La luna de la Tierra es el único rasgo físico visible evidente en la región....
- **El espacio solar** consiste en todo lo que se encuentra en el sistema solar más allá de la órbita de la Luna..... (Dolman, 2008, p. 60).

Figura 1. *Regiones del espacio*

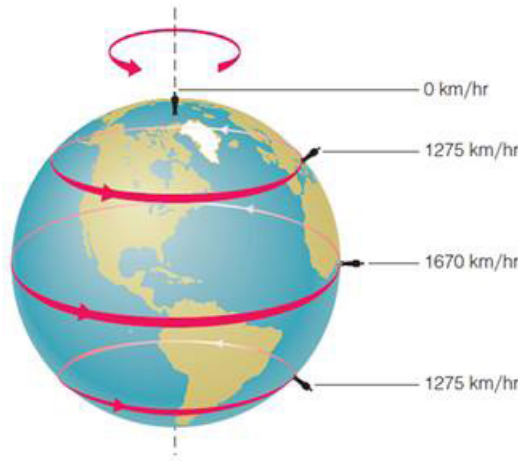


Fuente: Geostrategy in the space age: An astropolitical analysis. *Journal of Strategic Studies*, 22 (2-3), 83–106. doi:10.1080/01402399908437755

En concordancia con la clasificación descrita anteriormente, se focalizará el énfasis de estudio en la región *terra*, donde se considera la geografía tradicional como un determinante para el inicio y finalización de las actividades espaciales; particularmente del funcionamiento de los puertos de lanzamiento espacial y las variables que intervienen en esta sensible operación. En este sentido, la premisa más importante a considerarse dentro de esta primera aproximación es, que el segmento *terra* se constituye en la génesis de este diseño estratégico y desde donde se despliegan todas las capacidades tecnológicas, operacionales, logísticas, de lanzamiento, mando y control, entre otras, que se proyectan hacia el espacio.

Entonces, son las actividades de lanzamiento y su vinculación con la geografía, las que serán abordadas según las consideraciones plasmadas por Dolman. Así como lo describe ampliamente la teoría, existen lugares en la tierra que presentan mayores ventajas en términos de eficiencia a la hora de efectuar lanzamientos de vehículos espaciales. Estas características están determinadas por la posición misma sobre la tierra, desde la que se erigen las plataformas de lanzamiento.

Figura 2. *Velocidad de rotación de la tierra*

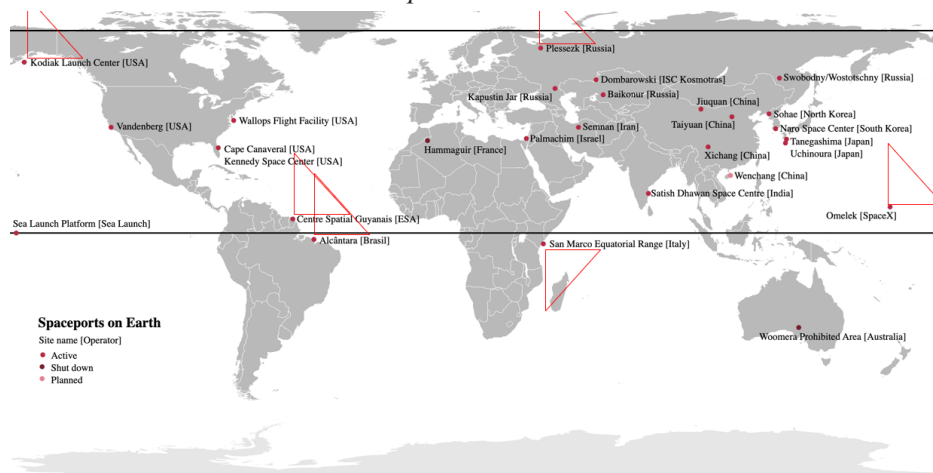


Fuente: <https://twitter.com/planetariomad/status/1169174336734998528?lang=ga>

Así como se evidencia en la figura 2, los objetos sobre las ubicaciones cercanas o en la línea del ecuador por el efecto rotacional de la tierra, giran a razón de 1,670 km/h; más rápido que en cualquier punto de la tierra, donde dicha velocidad disminuye en la medida que las posiciones se alejan del ecuador. Entonces, los vehículos espaciales lanzados en las posiciones ecuatoriales tendrán una mayor velocidad inicial, lo que representa un ahorro de combustible que se puede traducir en el aumento de las cargas útiles o en mayores cantidades de propelente, que para el caso de los satélites significaría mayor tiempo de permanencia en órbita. (Álvarez & Corredor, 2020)

También, las posiciones cercanas a los polos. Aún, con velocidades de rotación mínimas o tendientes a 0, representan una ventaja cuando de ubicar activos espaciales en órbitas polares se trata. Estas, que describen su trayectoria entre los polos sur y norte a 90 grados con respecto a la línea del Ecuador, son especialmente utilizadas para la observación de la tierra. En la figura 3 se pueden apreciar cuáles de los puertos espaciales actualmente activos representan las más grandes ventajas para los lanzamientos, a la luz de la teoría de la Astropolítica.

Figura 3. Centros espaciales mundiales y puntos de lanzamiento óptimos para la Tierra



Fuente: adaptado de Astropolitik Classical Geopolitics in the Space Age.

Caracterización Colombiana

Colombia, un país cuya ubicación sobre la línea ecuatorial se extiende desde la latitud 4° 13' 30» sur hasta la 12° 27' 46» norte, una posición geográfica que ofrece grandes oportunidades de proyección hacia el sistema geopolítico regional y mundial. Que, sumado a la riqueza de recursos naturales, ecosistemas, biodiversidad, abundancia hídrica, variedad climática, entre otras tantas, otorgan una ventaja diferencial para la concepción de sus propósitos geoestratégicos. Ofrece una conexión natural y directa con el continente americano a través de varios sistemas geográficos de interés regional que le brinda un sinnúmero de posibilidades en el desarrollo de estrategias para fortalecer su posición política, económica, así como, para el desarrollo tecnológico. En este sentido, Giraldo & Cabrera et al (2020) describen a Colombia como epicentro global del siglo XXI así:

Su posición geoestratégica privilegiada la ubica casi a igual distancia de los extremos de América; si se continúa observando con esta perspectiva, lo mismo se aprecia en relación con el polo norte, el polo sur, y los continentes de Asia, Europa y África. Lo anterior para destacar que la posición de Colombia facilita su inserción en múltiples y diversas direcciones y escenarios geográficos.

Considerando lo anterior y con el objetivo de caracterizar los potenciales de la geografía colombiana, se traen a discusión los hallazgos de la teoría, la

bibliografía y los conceptos obtenidos de los expertos que, sentaron postura frente al tema de análisis. Entonces, es preciso revisar los criterios comúnmente aceptados para la ubicación de puertos espaciales a fin de contrastarlos con las características identificadas en Colombia.

En principio, se toman de referencia cuatro de los documentos identificados en el estado del arte: *Public-Private Spaceport Development*, *Spaceports of the World*, *Spaceports Around the World, A Global Growth Industry*, *Spaceport Site Selection with Analytical Hierarchy Process Decision Making*, en los que se encuentran referencias de la historia, desarrollo, crecimiento, evolución, capacidades, características y toma de decisiones para la ubicación de Puertos de Lanzamiento Espacial. Tras el análisis de estos, específicamente en lo que respecta a los criterios propuestos para la ubicación de los puertos especiales, se identifican los hallazgos relacionados en la Tabla 1.

Tabla 1. *Requerimientos para la ubicación de Puertos Espaciales*

Public-Private Spaceport Development	Spaceport Master Planning: Principles and Precedents	Spaceports Around the World, A Global Growth Industry	Spaceport Site Selection with Analytical Hierarchy Process Decision Making
La proximidad al ecuador mejora la capacidad de carga útil hasta la órbita si se lanza en un acimut hacia el este.	Consideraciones Geográficas. Para aprovechar al máximo la rotación de la Tierra para el lanzamiento espacial, un objeto debe ser lanzado hacia el este desde un puerto espacial situado en el ecuador. Un lanzamiento espacial orbital desde cualquier puerto espacial requiere condiciones meteorológicas favorables.	La proximidad al ecuador, ya que esto aumenta el peso de la carga útil hasta la órbita.	Acercarse al ecuador para optimizar el rendimiento del vehículo de lanzamiento para alcanzar la órbita con menos combustible, así como la cantidad de carga mayor.

Public-Private Spaceport Development	Spaceport Master Planning: Principles and Precedents	Spaceports Around the World, A Global Growth Industry	Spaceport Site Selection with Analytical Hierarchy Process Decision Making
a proximidad a la costa permite descartar etapas en cualquier punto y no preocuparse por poner en peligro la vida la propiedad, o las relaciones con otro país.		Proximidad a la costa, ya que esto reduce el peligro para la vida y la propiedad	La zona de la costa para no poner en peligro la vida, las instalaciones públicas y las relaciones con otros países.
Los lanzamientos suelen tener una finalidad militar vital. Por lo tanto, el emplazamiento debe ser defendible. El emplazamiento debe preferentemente estar cerca de una base militar		Proximidad a una base militar, ya que esto aumenta la seguridad.	Adyacente a la base militar como objeto vital para el país en lo que respecta a las necesidades militares de un país.
Tener suficiente propiedad de acceso controlado alrededor del sitio de preparación de vuelo y lanzamiento es importante para evitar poner en peligro la vida o la propiedad y proporcionar seguridad en el lugar.			
Es deseable poder lanzar a cualquier ángulo de azimut.	Azimut limitaciones		Se puede utilizar para varios tipos de ángulo de azimut de lanzamiento

Fuente: elaboración propia.

Como resultado de esta revisión bibliográfica, se pueden extraer condiciones comunes relacionadas principalmente con características geográficas, pero al mismo tiempo con implicaciones técnicas y consideraciones políticas. Estas son:

- Posición ecuatorial.
- Proximidad a la costa.
- Seguridad
- Acceso.
- Azimut para el lanzamiento.

Por otra parte, y con base en las respuestas dadas por los expertos a la pregunta: ¿Cuáles considera son los potenciales geográficos colombianos para establecer un puerto de lanzamiento espacial?, se obtiene la siguiente información:

Tabla 2. Descripción de potenciales geográficos

Característica	Entrevistado 1	Entrevistado 2	Entrevistado 3	Entrevistado 4	Entrevistado 5
Posición Ecuatorial	Colombia debe aprovechar su condición como país localizado en la franja ecuatorial.	Colombia es un país del trópico, y se ubica sobre la línea del ecuador.	Colombia tiene una posición privilegiada en el ecuador para los propósitos espaciales.	La velocidad de rotación en el ecuador es mayor que en cualquier otra parte del globo, esto lo hace único para Colombia y 12 países más.	La principal ventaja es la posición sobre la línea del ecuador.
Acceso a la Órbita Geoestacionaria		Acceso directo a la Órbita Geoestacionaria.	Tiene proyección directa a un segmento de la Órbita Geoestacionaria.		Colombia reclama soberanía sobre el segmento de la Órbita Geoestacionaria, eso es por su posición.
Clima y Meteorología		Un clima favorable, no es cálido y no es frío, no tiene invierno ni verano. Tiene una época de lluvias y una época en que no llueve, eso permite cierta estabilidad.		Colombia no tiene estaciones ni la golpean con frecuencia huracanes. En nuestra latitud no se presentan tornados, esto favorece la operación espacial.	
Posición y acceso bioceánico	Colombia tiene fácil acceso a los cuatro hemisferios.	La posición bioceánica le permite a Colombia disponer de buenas líneas de suministro hacia el mundo.	Colombia está en el centro del continente y si lo vemos desde otra óptica, en el centro del mundo.		

Fuente: elaboración propia.

En la anterior tabulación, se evidencian características comunes que refieren los aspectos geográficos de gran relevancia para el objeto de análisis, las cuales también son reconocidas en la bibliografía analizada anteriormente. Entonces, para el efecto de la presente caracterización se determinan los siguientes elementos como los de mayor trascendencia en virtud de la posición geográfica colombiana.

- Proximidad al Ecuador
- Proyección hacia la órbita geoestacionaria
- Clima y Meteorología
- Posición y acceso bioceánico

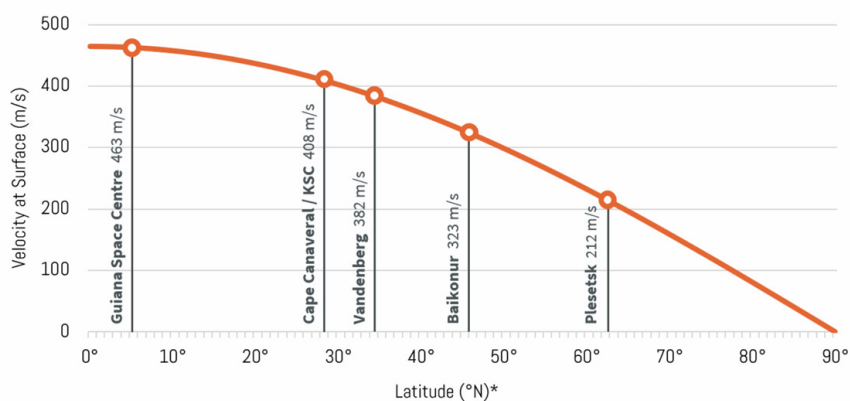
Proximidad al Ecuador

Colombia se ubica sobre la franja ecuatorial, posición que solo la comparten 12 países más en el globo y que para los fines espaciales ofrece un sinnúmero de ventajas. Como se evidenció en la contextualización de Geografía y Astropolítica, las posiciones cercanas al ecuador son las más adecuadas para el lanzamiento de vehículos espaciales. En ellas se aprovecha la velocidad de la rotación de la tierra para reducir la energía en el escape, lo que se traduce en menores cantidades de combustible para abandonar la atmósfera terrestre o mayores cantidades de carga útil. Esta condición natural hace muy eficiente la operación (Seedhouse, 2017).

En la Figura 4 se puede observar la velocidad de rotación de la tierra en la posición de los cinco puertos espaciales más utilizados en el mundo. Entre ellos se desataca el Guiana Space Center, que se posiciona sobre una velocidad de rotación de 463 m/s. De esta clasificación, es el puerto más cercano a la línea ecuatorial, a 5,3° de Latitud Norte.

En segundo lugar, esta Cabo Cañaveral en los Estados Unidos, ubicado a una latitud de 28° de Latitud Norte.

Figura 4. *Velocidad de la rotación de la tierra de los cinco puertos espaciales más utilizados*

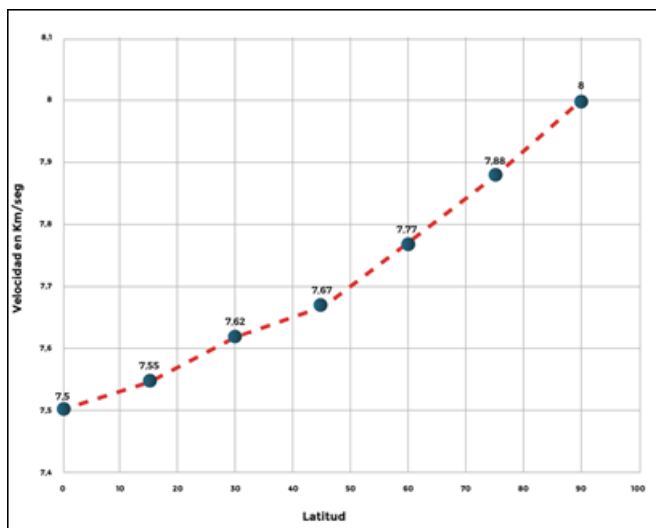


Fuente: SPACEPORTS of the world, 2019.

Ahora bien, si se contrasta la velocidad de escape, entendida como la necesaria para que cualquier cuerpo este fuera de la atracción gravitatoria de la Tierra, con la latitud desde la que se lanza; se puede identificar que en la medida que

la latitud aumenta, la velocidad de escape disminuye. Así como se aprecia en la figura 5, para un vehículo espacial de iguales características lanzado desde diferentes latitudes, en 0° es necesaria una velocidad de 8 km/seg mientras que en 90° una velocidad reducida a 7,5 km/seg. Desde esa misma perspectiva, se puede afirmar que es requerida una mayor cantidad de energía, en mayores latitudes.

Figura 5. *Relación de Velocidad de Escape Vs Latitud*



Fuente: Mirando hacia las estrellas, una contante necesidad humana.

Al traducir estas diferencias de velocidad y energía en factores operacionales y de presupuesto, se concluye que mientras más cercano esté un puerto de lanzamiento espacial a la línea del ecuador, más eficiencia habrá en consumo de combustible, lo que significa ahorros significativos en los costos de operación. Por otra parte, el peso de ese combustible ahorrado se podrá emplear en la puesta en órbita de mayores cantidades de carga útil, lo que puede representar al país una mayor capacidad espacial o al operador particular, una mayor oferta de servicios. Así mismo, puede ser considerada también una reducción al impacto del medio ambiente y la atmosfera en general. (Poveda, 2022). En suma, así como se afirma en el reporte Spaceports of the World: “para aprovechar al máximo la rotación de la Tierra para el lanzamiento espacial, un objeto debe ser lanzado hacia el Este desde un puerto espacial situado precisamente en el ecuador” (Harrison et al, 2019). Por consiguiente, la

posición colombiana en cercanía del ecuador representa una gran ventaja desde la geografía. Al contrastar los cálculos de una posición colombiana con la del Centro Espacial John F Kennedy en Cabo Cañaveral USA, se estima que los ahorros en la operación de lanzamiento de vehículos espaciales estarían por el orden del 8 al 10% (Poveda, 2022). Además, esta ubicación representa una ventaja única para el lanzamiento de satélites directamente hacia la órbita geoestacionaria, que también tiene un valor estratégico para el desarrollo de capacidades espaciales.

Proyección hacia la órbita geoestacionaria

En estrecha relación con la posición geográfica del país, el acceso directo a la órbita geoestacionaria se constituye en uno de los valores geoestratégicos de mayor importancia, considerando que la posición de un puerto espacial debe guardar una relación inalienable con la eficiencia en el acceso a la órbita que se desea alcanzar.

Es conocido que, “la órbita geoestacionaria es una curva circular situada sobre el plano del Ecuador, a una altura aproximada de 36.000 km de altura de la tierra, compuesta por un anillo magnético de un ancho aproximado de 150 km y un espesor de 30 km” (Moreno et al, 2021). Es geosincrónica, lo que significa que su periodo de rotación es de casi 24 horas, igual al de la tierra. De esta manera, un objeto posicionado en ella parece inmóvil desde la perspectiva terrestre porque gira en la misma orientación y periodo de tiempo, por esta razón se le denomina geoestacionaria. Esta característica particular que, no la tiene ningún otro tipo de órbita y la gran cobertura sobre la superficie terrestre, la hacen de gran valor para posicionar satélites que garanticen de forma permanente: telecomunicaciones e información meteorológica. Desde el punto de vista técnico, la franja geoestacionaria es estratégica para las naciones en función de la explotación del espectro electromagnético, en frecuencias inferiores a 3000 GHz (Rodríguez, 2015).

En lo que concierne al segmento colombiano se pueden encontrar las siguientes características:

Está entre los 70° y 75° al oeste de Greenwich, aproximadamente. Sus coordenadas son 70°04'38" oeste (aprox) - 75°45'15" oeste (aprox). Tiene una longitud de arco de 631 kilómetros. El arco sobre la Órbita Geoestacionaria en grados es de 54°0'37". La longitud de Arco Geoestacionario en Kilómetros es de 4.171,36 y el porcentaje del segmento sobre el total de la Órbita Geoestacionaria es de 1.57%. (Rodríguez, 2015)

Fue así como en 1976, entendiendo la importancia de la posición sobre la franja ecuatorial y la funcionalidad de la órbita geoestacionaria, se reunieron en Bogotá representantes de: Brasil, Colombia, Congo, Ecuador, Gabón, Indonesia, Kenia, Somalia, Uganda y Zaire, diez de los trece únicos sobre el planeta con este privilegio, para reclamar soberanía sobre este recurso natural.

Sin embargo, esta posición ha sido ampliamente debatida desde lo jurídico, así como lo esgrime Velázquez (2013) en cuatro argumentos:

1. La Declaración de Bogotá contraviene el Tratado del Espacio de 1967, cuyo artículo II proscribe expresamente toda reivindicación de soberanía.
2. La frontera del espacio aéreo y el espacio ultraterrestre estaría ubicada a la altura aproximada de 100 kilómetros sobre la superficie de la Tierra. Por lo tanto, la órbita geoestacionaria, situada a 36 000 km, está comprendida en el concepto de espacio ultraterrestre, no sujeto a apropiación de ninguna clase.
3. Según el principio de “primer llegado, primer servido”, la órbita geoestacionaria ha de ser utilizada por los que primero accedan a esta.
4. Los Estados ecuatoriales no pueden reivindicar derechos de soberanía sobre una zona donde no pueden ejercer la menor señal de dominio efectivo.

De acuerdo con la afirmación de Velázquez (2013), la soberanía de un país debe ser susceptible de dominio y defensa, cuando esta se vea amenazada. La realidad es que Colombia no tiene siquiera la capacidad de posicionarse en la órbita geoestratégica, por lo tanto, carece de medios mínimos para mantener soberanía en este segmento.

En adición a lo anterior, como “recurso natural limitado, que debe utilizarse en forma eficaz y económica” (Naciones Unidas, 1959), se ha dispuesto que la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT), organización intergubernamental de la ONU, gestione el espectro de frecuencias radioeléctricas y de la órbita de los satélites geoestacionarios. Sobre este entendido, solo aquellos Estados que tenga el suficiente desarrollo tecnológico, podrán aprovecharse de él. Ahora, la preocupación es la saturación de la banda geoestacionaria en razón al gran número de activos espaciales que anualmente son puestos en esta órbita, aquí es donde Colombia pone en riesgo este potencial que su misma ubicación le ha dado.

Posición y acceso bioceánico

Colombia se sitúa en la esquina norte de Suramérica, es el enlace geográfico de dos subcontinentes, que la consolida como el paso obligado del tránsito entre las Américas. Esta posición además lo acopla con el mundo a través de regiones geográficas de gran interés global que le proporcionan una inmejorable perspectiva geopolítica. El país se integra a la región en sus once fronteras con una geografía diversa y rica como el océano Pacífico, los Andes, la Amazonía, el Istmo centroamericano, el mar Caribe y la Orinoquía. Su condición bioceánica única en Suramérica, con acceso al Atlántico a través del Mar Caribe y al Pacífico, favorece la explotación de recursos naturales, el comercio y la integración política con los países de la región y el mundo.

Es así como, “el Mar Caribe concentra los principales flujos de comercio entre América y Europa” (Giraldo et al., 2020). Son los puertos de Cartagena, Barranquilla y Santa Marta los puntos de conexión con toda la red comercial del atlántico y por donde se dan los mayores flujos de turismo del país.

Al mismo tiempo, mediante los puertos de Buenaventura y Tumaco, se proyecta el pacífico con intereses en el nuevo centro geoeconómico mundial; la mirada hacia Oceanía, Sudeste y Noreste Asiático se abre como una oportunidad geopolítica. (Giraldo et al., 2020). Si bien, el país hace parte de la Alianza Pacífico (Chile, Colombia, México y Perú), “debido a su pobre gestión en mirar hacia el Pacífico y buscar alianzas con estas economías claves para el desarrollo y crecimiento económico” (Calderón, 2016), no hace parte del Foro de Cooperación Económica de Asia Pacífico (APEC). Bloque económico que representa aproximadamente el 56% del PIB y 48% del comercio mundial (Cancillería, 2022).

No obstante, la miopía colombiana hacia los potenciales que ofrece el mar y su valor estratégico, con 3.189 km de litorales en 12 departamentos y 49 municipios; 4 archipiélagos y una extensión de mar territorial equivalente a 928.660 km², con costas marítimas e insulares en el Caribe y el Pacífico (CCO, 2018), es una realidad geográfica a la cual el país no puede renunciar. Esta incapacidad se ha traducido en una infraestructura portuaria limitada y unas líneas de comunicación interna insuficientes que no dan respuestas eficientes en la integración del país con una conciencia marítima.

La realidad geográfica indica que la proyección bioceánica y las múltiples posibilidades de conectarse con los cuatro hemisferios, representa un valor único como interlocutor válido y epicentro de un mundo. Esto significa tener un acceso privilegiado tanto por vía marítima como por vía aérea desde cualquier parte del mundo. Condición que favorece la interacción logística y operacional

que, con los socios estratégicos, se pueda dar en torno a la operación espacial. Grandes flujos de carga son necesarios movilizar para posicionar un vehículo espacial en el complejo de lanzamiento, lo que, en términos de eficiencia, representa un gran potencial estar en una posición geográfica central como la colombiana.

De cualquier modo, la verdadera capacidad se alcanza cuando se traducen esos dotes naturales en fortalezas que provean desarrollo y bienestar a la nación o que apunte a la consecución de los intereses nacionales (Barrero & 2022). La realidad indica que Colombia tiene un largo camino por delante en la optimización de las condiciones de conectividad interna para garantizar que, desde una capacidad portuaria suficiente, hasta la conexión por una red vial eficiente, se pueda dar continuidad logística a la operación de soporte espacial.

Clima y Meteorología

El clima y la meteorología son factores imprescindibles para las operaciones espaciales. Así como, bien lo determinan Dachyar & Purnomo (2018), en su propuesta de proceso toma de decisiones con jerarquía analítica para la ubicación de un puerto espacial en Indonesia, la variable *Weather* se incluye, como uno de los criterios válidos en el estudio de la locación más apropiada para este propósito. El efecto de la temperatura, nubosidad, tormentas eléctricas, vientos, entre otros factores, pueden afectar la operación espacial.

Así, “factores ambientales, como el riesgo de catástrofes naturales o la protección frente a condiciones meteorológicas adversas, pueden hacer que algunas ubicaciones de puertos espaciales sean más atractivas que otras para los operadores de lanzamientos”. (Harrison et al, 2019). En relación con lo anterior, en la Tabla 3 se muestra con algunos ejemplos a nivel mundial, como diferentes locaciones se han visto desfavorecidas por desastres naturales y condiciones meteorológicas adversas que han generado impactos en la operación de los puertos espaciales.

Tabla 3. *Impacto de fenómenos naturales en la operación espacial*

Fenómeno	Lugar	Año	Impacto
Tsunami	Indonesia	2004	Ralentizó la operación del Centro Espacial Satish Dhawan en India.
Terremoto de 8,9 grados	Japón	2010	Daños en Centro Espacial Tsukuba. No sufrieron daños los Centros Espaciales de Tanegashima y Uchinoura por su ubicación al sur de la isla, donde hay menos actividad sísmica.
Incendio Forestal	USA, California	2016	Retraso de un lanzamiento espacial desde el Puerto Espacial de Vandenberg.
Huracán Irma	USA, Florida	2017	Centro Espacial Kennedy sufrió diversos daños a causa de la tormenta. Evacuación personal no esencial.
Vientos de gran altitud	Guyana Francesa Nueva Zelanda	2018	Retrasos en la operación de estos puertos.
Bajas temperaturas	USA	Permanente	Transbordador espacial de la NASA por restricciones de seguridad, no puede cargar el tanque externo con propelente con temperaturas promedio de 5 grados en las últimas 24 horas.

Nota. Elaboración propia de datos obtenidos de Spaceports of the World, 2019.

En la identificación de las características colombianas, la primera ventaja que se puede referenciar tiene que ver con la posición intertropical y cercana a la línea del Ecuador. Esta particularidad hace que los rayos del sol lleguen perpendicularmente durante todo el año, sin que se presenten cambios drásticos de temperatura. Por consiguiente, los extremos meteorológicos del verano, invierno, primavera y otoño que se presentan en otras latitudes, no son un factor que afecte las operaciones espaciales. Adicionalmente, en razón a la topografía y las regiones geográficas que se despliega, desde las nieves perpetuas y glaciares, hasta desiertos, pasando por selvas, valles, sabanas; el país cuenta con todos los climas y pisos térmicos.

El clima en Colombia se define por la ubicación geográfica y atmosférica, lo que significa que cada condición particular de humedad, temperatura, vientos, radiación solar y altitud, entre otros, determinan las características de numerosos microclimas. De manera general, el país cuenta con dos periodos claramente diferenciados por regiones. En la Tabla 4 se puede ver el comportamiento por región y por época del año.

Tabla 4. *Periodos climáticos por región en Colombia*

Periodo	Meses	Región Climática
Invierno (Época de Lluvias)	Abril-Octubre	Costa Atlántica
		Llanos Orientales
	Marzo-Mayo / Septiembre-Noviembre	Tierras Altas de las Cordilleras
		Valle del Cauca
		Valle del Río Magdalena
	Todo el año	Amazonia
		Región Pacífica
Verano (Época de sequía)	Noviembre-Marzo	Costa Atlántica
		Tierras Altas de las Cordilleras
	Junio-Septiembre / Diciembre-Marzo	Valle del Cauca
		Valles altos del Río Magdalena
		Amazonia
	No existe	Región Pacífica

Fuente:elaboración propia de datos obtenidos del IDEAM.

En este punto de la caracterización y en relación con los sistemas meteorológicos, es preciso hacer énfasis en algunos de ellos que son diferenciales en el país y que se constituyen en ventajas para el propósito de la investigación. En primer lugar, se puede afirmar que los ciclones tropicales, no son un factor de afectación directa sobre el territorio colombiano. Si bien, las zonas de mayor influencia de este tipo de fenómenos son la costa norte y la zona insular de San Andrés y Providencia, como lo afirma Ortiz (2007) en su estudio, “no existe en realidad una tendencia clara en el aumento del número de eventos que han pasado por el Caribe en los últimos 100 años”. Así que, de manera comparativa con países del Caribe, Centroamérica y Norteamérica, la Colombia continental no se encuentra en los corredores de paso de las tormentas tropicales y huracanes que normalmente se desarrollan en los meses de junio y noviembre.

Por otra parte, en latitudes cercanas al Ecuador no se forman fenómenos tan peligrosos como los tornados, que tienen un efecto devastador sobre la superficie y representan un riesgo para las operaciones aéreas. Otro de los aspectos diferenciales son los vientos. Por ubicarse sobre la línea ecuatorial, Colombia recibe los vientos Alisios que soplan desde el noreste en el hemisferio norte y del sureste en el hemisferio sur, aunque en gran medida el movimiento de los vientos en el país se debe a la Zona de Confluencia Intertropical -ZCIT (IDEAM, 2017). En este sentido, pese a que existe una corriente de chorro

ecuatorial que presenta su mayor intensidad en África y la India, el país no se somete a las corrientes, que como las polares y subtropicales viajando de oeste a este pueden tener intensidades de hasta 150 nudos generando grandes cizalladuras.

En conclusión, en razón a la topografía, la variedad climática, la posición geográfica, la ausencia de condiciones extremas climatológicas a nivel general, especialmente en variables de temperatura, vientos, precipitaciones y fenómenos peligrosos, Colombia presenta una variada posibilidad de potenciales lugares que favorecen el desarrollo de un puerto espacial.

Delimitación de variables geoestratégicas

Una vez identificados los potenciales geográficos colombianos para los fines espaciales y puestos bajo la lente de la teoría de la Astropolítica, en el presente capítulo se identificarán las variables geoestratégicas que el país deberá considerar para la concepción de su estrategia tendiente a posicionarse geopolíticamente en la región a partir del desarrollo de capacidades distintivas. Por esta razón, es preciso traer algunos conceptos de la geopolítica que teóricos clásicos como Federico Ratzel, Karl Haushofer y Rudolf Kjellen.

Inicialmente, Ratzel en su teoría, compara a los Estados con los seres vivos que tienden a crecer y buscar su “espacio vital”, el territorio necesario para desarrollarse y garantizar su supervivencia. Esta ha sido la causa para que los Estados entren en conflicto (González, 2017). Por su parte, el imperativo para Haushofer más que la supervivencia de los Estados era la “lucha por el espacio” que para las naciones fuertes se constituía en un llamado a la expansión mediante la colonización o conquista, generando constante incertidumbre e inestabilidad (Portijas, 2020).

Kjellen, quien por primera vez acuñó el término de geopolítica como ciencia de estudio, argumentó que:

El Estado es “una entidad del mismo tipo fundamental que el hombre individualmente considerado; en una palabra, es una revelación biológica o un ser viviente”. En consecuencia, los Estados “están sujetos a la ley del crecimiento”. Acorde con su raciocinio, el Estado, como organismo vivo: nace, se desarrolla y muere, o en algunos casos se transforma. Ese ser “supraindividual”, agrega, se halla dominado por dos influencias principales que son el medio geográfico y la raza.

En otras, de tipo secundario, incluye a la economía, la sociedad y el gobierno (Rosales, 2005).

Otros autores clásicos incorporaron visiones alternativas en la perspectiva de la geopolítica. Este es el Caso de Alfred Mahan quien propuso la teoría del poder marítimo, por su parte Giulio Douhet y Alexandre Seversky, después de la primera guerra mundial, incluyeron la dimensión del aire para discutir del poder aéreo como tema de análisis geopolítico. Es así, como desde la perspectiva clásica se puede afirmar que el Estado, como sujeto dinámico, es la principal unidad de estudio y su desarrollo, así como su supervivencia a través de la proyección de su espacio físico, es el objetivo primordial. Una posición realista que desde los albores en los estudios geopolíticos marcaron una tendencia en las relaciones internacionales de los Estados, en la permanente búsqueda de sus intereses nacionales.

En un concepto más contemporáneo se define a la Geopolítica como “el estudio de las influencias que determinados factores geográficos ejercen sobre la política externa, e interna de los pueblos y Estados” (Sánchez, 2012). Reafirmando la relevancia de variables del espacio físico, población y poder. De este modo, surge la geoestrategia como una rama de la geopolítica, inicialmente con una connotación militar, para vincular escuelas de pensamiento, sobre el espacio y el poder (Baquer, 2010). De esta manera, Sánchez (2012) la define como “el estudio de los factores geográficos que influyen en la concepción y conducción estratégica sobre un teatro de operaciones, contemplando las tres dimensiones del poder militar tierra, mar y aire”. En tanto que Rosales (2005), la puntualiza como una disciplina que “estudia la influencia de la geografía desde el punto de vista estratégico, de tal manera que permita el control y/o posicionamiento físico de los espacios que den, a quien los posea, ventajas geopolíticas”.

Nótese, que en las definiciones anteriores no se incluye el concepto de poder espacial que, en la actualidad se constituye en uno de los dominios más disputados por Estados y particulares (USSF, 2020). Por otra parte, es de resaltar la perspectiva estratégica de la utilización de los espacios físicos para obtener ventajas geopolíticas.

En adición a las anteriores reflexiones, es justo citar a Everest Dolman quien afirma que la geoestrategia es “la aplicación estratégica de tecnologías nuevas y emergentes en un marco de conocimiento geográfico, topográfico y posicional” (Dolman, 1999). En este aparte, es pertinente dedicarle especial atención a conceptos innovadores en el alcance de la geoestrategia. Por una parte, el desarrollo tecnológico como elemento dinamizador de la estrategia y por otra, la distinción de lo “posicional” para darle un contexto más amplio

desde la perspectiva espacial. Si bien, esta definición no describe el propósito, claramente se infiere del postulado general de la teoría, que es la dominación de las regiones espaciales a través de la aplicación de poder, principalmente militar.

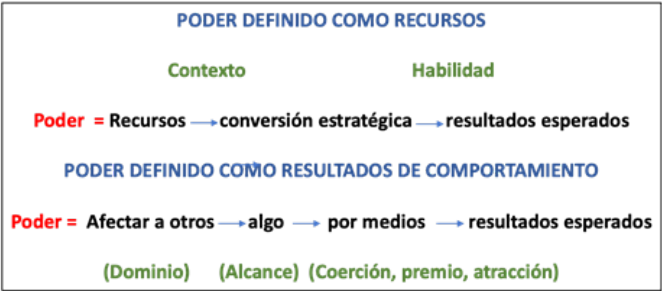
Es así como, para los propósitos de delimitación de las variables geoestratégicas que tienen como principal elemento, el potencial geográfico del país para su proyección espacial, analizado anteriormente. Y se argumentará partiendo de las definiciones de poder y los determinantes de una nación como potencia, para identificar los aspectos primordiales por considerar en el objetivo de constituir a Colombia como un Puerto de Lanzamiento Espacial.

Poder y su perspectiva geoestratégica

Como se evidenció en las definiciones anteriores, el concepto de geoestrategia está estrechamente ligado al poder. Podría afirmarse que la geopolítica, a través del estudio de la proyección de los espacios físicos también propende por la proyección de poder de los Estados, con el fin de garantizar su seguridad y alcanzar los objetivos nacionales. Por consiguiente, la importancia de la geoestrategia radica en el despliegue de capacidades nacionales a través de la estrategia para sacar provecho de su geografía e influir en el sistema internacional.

Al respecto, Nye (2010) hace una distinción entre dos perspectivas del poder. La primera, vista desde los recursos que un actor posee, normalmente asociado a la población, territorio, recursos naturales, fuerza económica, militar y estabilidad social, que pueden calcularse antes de la acción. Este poder se materializa en la habilidad para convertir dichos recursos en resultados esperados. La segunda, se remite al cambio del comportamiento de otro u otros actores a través de recursos y medios como la coerción, el premio y la atracción. Este solo es posible medirlo al final de la acción. En conjunto, los dos conceptos resultan complementarios a la hora de ejercer un poder efectivo. El ejercicio de convertir recursos en resultados esperados debe necesariamente sujetarse a la aplicación de estrategias que integren medios y modos diferenciales de acuerdo con el contexto (Nye, 2010).

Figura 6. *Poder como recursos y como resultados de comportamiento*



Fuente: elaboración propia, adaptación, versión The Future of Power.

Conforme a lo anterior, son las capacidades nacionales y la habilidad de emplearlas los determinantes en la proyección de poder. No obstante, es necesario hacer énfasis, así como lo argumentó Aron (1962:100), “los recursos o la fuerza militar de la colectividad, pueden ser evaluados colectivamente y el poder propiamente dicho, que en cuanto a relación humana no depende solo de capacidades materiales e instrumentos”. Lo que se traduce en, que no solo son los tangibles sino también los intangibles, que representados por las relaciones humanas entre las que podríamos mencionar, la habilidad de los estadistas y estrategas, liderazgo, voluntad de una nación entre otras, son los que aportan en la construcción y proyección de poder de un Estado.

En consecuencia, las variables objeto de estudio estarán ligadas al poder nacional. Con sustento también, en la perspectiva de teóricos que a lo largo del tiempo se han preguntado como un país puede convertirse en una potencia. Entonces, se dice de una potencia con alcance regional y global, es aquella que por sus:

Diferentes capacidades, clásicas o contemporáneas, puede influir en las reglas de las relaciones internacionales, ya sean estas de carácter estrictamente interestatal, o reglas enmarcadas en instituciones supraestatales; y cuando, además, pueden ayudar a cambiar las realidades políticas, geopolíticas, militares, económicas, sociales, institucionales y de infraestructura de otros Estados. (Patiño, 2018)

Al respecto Patiño (2018), hace una síntesis de los determinantes en los estudios de las relaciones internacionales y de aquellos Estados que se han constituido como potencias a través de la historia. En la tabla 5 se identifican

las variables y la correlación de estas de acuerdo con la conceptualización de los autores allí relacionados.

Tabla 5. *Sintaxis variables que identifican una potencia*

Rudolf Steiner (1865-1923) Teórico político alemán	Nicholas Spykman (1893-1943) Geopolítico estadounidense	Hans Morgenthau (1904-1980) Político estadounidense	Raymond Aron (1905-1983) Filósofo y Sociólogo, francés	Charles Hill (1929-2008) Sociólogo estadounidense	John Darwin (1946-) Historiador británico	Carlos Patiño (1966-) Historiador y Filósofo colombiano
Patiño, C (2018). Imperios contra Estados. La destrucción del orden internacional contemporáneo. Bogotá, Penguin Random House, ISBN: 978-95-889-319-44.						
Geográficos	Superficie del territorio	Geografía	Materia disponible	Práctica de la Guerra	Control del Territorio	Capacidades militares
Económicos	Naturaleza de las fronteras	Recursos naturales	Habilidad para transformar materiales en armas	Control territorial	Redes Comerciales	Demografía en crecimiento
Técnicos	Ausencia o presencia de materias primas	Capacidad Industrial	Número de hombres		Capacidades Tecnológicas	Economía fuerte
Humanos	Desarrollo económico y tecnológico	Estado de preparación Militar	Habilidad para transformar hombres en soldados		Capacidades Militares	Estabilidad interna y proyección internacional
	Potencia financiera	Población	Capacidad de acción colectiva			Voluntad
	Volumen de la población	Carácter nacional				
	Espíritu nacional	Moral nacional				
	Homogeneidad étnica	Capacidad de la diplomacia				
	Grado de integración social					
	Estabilidad política					

Fuente: elaboración propia a partir de información obtenida en Imperio contra Estados.

De la anterior síntesis se pueden identificar varios elementos útiles para la caracterización de las variables de estudio.

1. La información relacionada vincula autores clásicos y contemporáneos cuyo objeto de estudio en este particular, fue identificar los determinantes que permitieron el surgimiento y sostenimiento de potencias.
2. La caracterización incorpora elementos tangibles e intangibles.
3. Se pueden identificar ejes comunes y transversales en el postulado de las variables planteadas.
4. Las diferentes propuestas están influenciadas por el contexto histórico en que fueron concebidas.

De conformidad con lo anterior y haciendo énfasis en el punto número tres, en el que mediante la agrupación por marcadores de la Tabla 6, se ha determinado una clasificación sin jerarquía de las variables, así:

Tabla 6. *Categorizaciones variables*

	Potencial Geográfico
	Poder Económico
	Desarrollo Tecnológico
	Población y Voluntad
	Poder Militar
	Recursos Disponibles
	Capacidad Política y Diplomática

Fuente: elaboración propia

Siendo así, el análisis de las fuentes que le otorgan poder a un Estado para ser capaz de influir y dictar las reglas en el sistema internacional, serán las variables objeto de estudio para la propuesta estratégica a desarrollarse en el último de los objetivos de la presente investigación.

1. Hoja de ruta: Colombia Puerto de Lanzamiento Espacial

Frente al reto planteado en el presente documento y con el propósito de potencializar al país como un referente geopolítico regional por medio del desarrollo de su capacidad espacial y en especial, constituyéndose como un puerto de lanzamiento espacial; es determinante hacer énfasis en las líneas argumentativas que darán vida a la estrategia, como producto resultante de la integración de cada una de ellas.

En primer lugar, es necesario retomar la teoría de la Astropolítica en la que Everett Dolman plantea que, a través del dominio del espacio, se obtiene el dominio del destino de la humanidad y que para hacerlo es necesario controlar cada uno de los segmentos identificados como *Tierra, Espacio Terrestre, Espacio lunar, Espacio solar* (Dolman, 2008, p. 60), de los cuales ya se hizo referencia anteriormente. De esta teoría, es preciso acentuar la connotación realista que, desde el ejercicio del poder el autor le otorga al Espacio, una particular preponderancia en la intención geopolítica de los Estados para proyectar su influencia y más exactamente la dominación.

En segundo lugar, el valor diferencial de la posición geográfica que, también sustentado en esta teoría, pone a Colombia especialmente en los segmentos de Tierra y Espacio Terrestre en una posición preferencial frente a la mayoría de los países del globo, para el desarrollo de capacidades de lanzamiento de

vehículos espaciales. Un determinante que, contrastado con los postulados de Kaplan (2012) en su obra *La venganza de la Geografía*, en la que argumenta históricamente como la geografía ha condicionado el destino de las naciones; obliga a identificar como deber, el incentivo de la conciencia colombiana para mirar en este dominio y valerse de su geografía para lograr proyectar su poder espacial.

Por último, como imperativo geopolítico para la consolidación de escenarios de influencia que se asienten en el ámbito internacional regional y global, es preciso una vez identificadas las variables de proyección de poder, conjugarlas para impulsar las capacidades de nación y vincularlas al desarrollo de una estrategia. Es decir, el análisis de las variables geoestratégicas previamente identificadas, se constituirán en el insumo para establecer la hoja de ruta que posicione a Colombia como un preferente espacial.

Como una consideración adicional, la proyección de la acción del poder nacional al dominio ultraterrestre se constituye en el poder espacial, que si bien, es concebido dentro de la doctrina militar actual de la Fuerza Aeroespacial Colombiana como un objetivo para el presente y futuro en el mantenimiento de la paz, como en el desarrollo de la Guerra. También, es definido en un concepto más amplio como la libertad de acción en el espacio como interés nacional, “lo que implica una condición estratégica en la que una nación o un actor soberano tiene el nivel relativo de control o la capacidad requerida para lograr los cuatro componentes, -diplomático, informativo, militar y económico- de su estrategia espacial implícita o explícita” (USSF, 2020). De lo que se infiere que, desde la proyección militar del poder espacial, se integran los instrumentos del poder nacional para la búsqueda y consolidación de los intereses nacionales. Particularidad que se incorporará a la propuesta estratégica planteada en el presente análisis.

En estricta relación con lo anterior, según la clasificación descrita por Leloglu & Kocaoglan (2008) la interacción con el sector espacial es diferenciado en virtud de las capacidades que cada uno de los usuarios tenga. Así como se observa en la Figura 7, el poder y acción de libertad de los actores espaciales estará dada por el nivel de progreso que tengan para pasar de un usuario a la exploración del espacio.

Frente a esta clasificación, se puede afirmar que Colombia como nación está en la transición de la operación de sistemas satelitales a la manufactura de estos con la capacidad que la Fuerza Aeroespacial Colombiana ha venido consolidando. Con la presente propuesta, se plantea incursionar en la categoría de lanzamientos, allí el país a través de las variables ampliamente analizadas

tendrá un valor diferencial para la proyección de su influencia geopolítica en la región.

Figura 7. *Pirámide del sector espacial global*

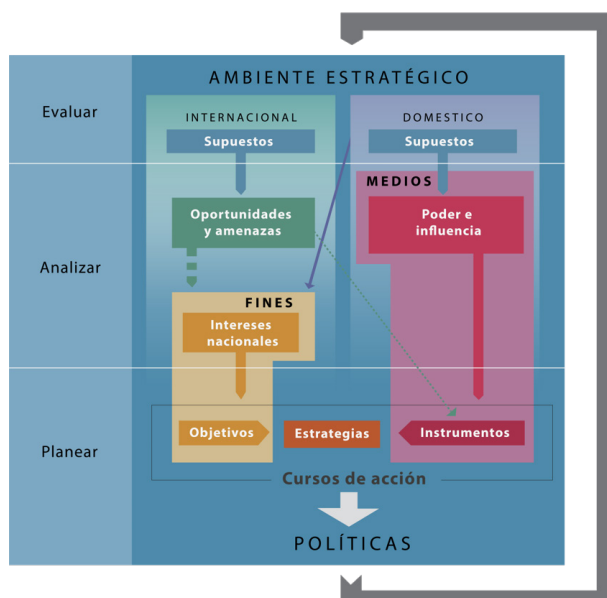


Fuente: DNP, 2007 adaptado de Leloglu & Kocaoglan, 2008

Así pues, para la integración de las líneas argumentativas descritas anteriormente y el aporte de expertos, se empleó el modelo planteado por Terry Deibel en su libro *Foreign Affairs Strategy*. Una propuesta metodológica detallada en la Figura 8, que el autor desarrolla a partir de los conceptos de estrategia en el que los fines, medios y modos conjugados en la complejidad de las múltiples variables influyentes, han determinado la proyección estratégica de los asuntos internacionales de los Estados Unidos de América.

Un modelo que, ofrece las dimensiones de análisis en el entorno interno y externo y la integración de los campos del poder como una estrategia nacional. Sin embargo, en razón al alto impacto que tiene el contexto doméstico en el objeto de estudio, se ha incluido al presente modelo el análisis de las debilidades y fortalezas, las cuales se constituyen en unas variables de relevancia para la formulación de la estrategia.

Figura 8. *Modelo Estratégico para los Asuntos Internacionales*



Fuente: elaboración propia. Adaptado de Deibel, T. (2007).

Resultados y análisis

Como resultado de la integración de los hallazgos de la presente investigación, la revisión bibliográfica y los conceptos obtenidos de los expertos bajo el modelo Deibel, se presenta la información de la Tabla 7 que sinteriza la interacción de las variables geoestratégicas y dicta los cursos de acción en la construcción de la estrategia.

Tabla 7. Análisis Estratégico Consolidado

Ambiente Estratégico			
Internacional		Doméstico	
Colombia sigue reconfigurando su posición en el desarrollo espacial, no adopta una estrategia diferente a la de conocimiento y conciencia espacial, no genera transformaciones en materia espacial. No existe una articulación público - privada sólida que permita el desarrollo espacial. Los intereses políticos y estratégicos de la nación, no tendrán como prioridad el desarrollo espacial. El interés espacial es impulsado desde la base por particulares y algunas organizaciones del Estado. Las condiciones de seguridad afectarán los proyectos de infraestructura espacial.			
Intereses Nacionales	Amenazas y Oportunidades	Debilidades y Fortalezas	Poder e influencia
Seguridad física y supervivencia de la nación Prosperidad sostenible Preservación del sistema democrático Protección de Activos Estratégicos Ocupar Espacios Vacíos Desarrollo espacial del país Consolidación de una identidad nacional Desarrollo con infraestructura de calidad Proyección Geoestratégica	Conflicto armado Dependencia de terceros en servicios espaciales Interferencia a la proyección espacial nacional Invasión de acceso a la órbita geoestacionaria Pérdida de la confianza inversorista Transferencia de conocimiento Seguridad cooperativa Apropiación de tecnologías de avanzada Cooperación y alianzas internacionales Mercado espacial mundial	Limitada conciencia espacial de la nación Falta de liderazgo institucional para asuntos del espacio Poca integración entre Estado-Educación-Industria Escasa legislación para el desarrollo espacial Escaso tecnológico Bajos niveles de seguridad Incertidumbre política Proyección naciente de Poder Espacial FAC Posición geográfica privilegiada Capital Humano innovador Abundancia en recursos Naturales Acceso biooceánico Proyección a la Órbita Geoestacionaria	Referente Regional en temas militares Identidad Política Regional Apoyo internacional Economía de Latinoamérica Top 5 PIB LAC Fuerza Aérea Colombiana Líder en el Caribe
Objetivos	Cursos de Acción		
	Instrumentos		
Establecer un Puerto de Lanzamiento Espacial Potenciar la capacidad espacial nacional Avanzar en la independencia tecnológica espacial Incorporar en la economía espacial Consolidar la articulación institucional para el desarrollo espacial Generar conciencia espacial nacional Fortalecer el poder espacial Desarrollar la diplomacia espacial Exportar potencia geográfica	Crear Conciencia Espacial Nacional Afianzar el Liderazgo Institucional Fortalecer el Poder Espacial Consolidar la Economía Espacial Desplegar la Diplomacia Espacial Promover el Desarrollo Tecnológico e innovación Materializar el Puerto de Lanzamiento Espacial	Diplomacia Bilateral y Multilateral Institucionalidad del Estado (Ministerios, Departamentos, Unidades Especiales...) Grupos sociales y empresariales del Estado Fuerzas Militares Fuerza Aérea Colombiana con proyección espacial Industria aeroespacial estatal y privada Libre Comercio y acuerdos económicos Sociedad competente e innovadora Instituciones educativas y de desarrollo tecnológico	

Fuente: elaboración propia a partir de Deibel (2007), p. 368.

La Estrategia

Esta propuesta no se limita al proyecto concreto de constituir a Colombia en un Puerto de Lanzamiento Espacial. Por el contrario, abarca una óptica más amplia en la que el país proyecte poder e influencia regional con una capacidad diferencial que comprometa todos los campos del poder, conllevando de manera integral a potencializar su resultado. De este modo, en la Tabla 8 se despliega la estrategia como una hoja de ruta que atiende los asuntos domésticos para después insertarse en el mundo globalizado espacial a la luz de las variables geoestratégicas.

Tabla 8. Despliegue Estratégico

Objetivo General	Objetivos Específicos	Líneas de Acción Estratégica
Incentivar el desarrollo espacial y proyectar poder a través de la consolidación de un Puerto de Lanzamiento Espacial	1. Crear Conciencia Espacial Nacional	1.1 Construir la Política Espacial Colombiana
		1.2 Fomentar la Educación Espacial
		1.3 Incentivar la Curiosidad Espacial
	2. Afianzar el Liderazgo Institucional	2.1 Constituir la Agencia Espacial Colombiana
		2.2 Consolidar la Fuerza Aeroespacial Colombiana
	3. Fortalecer el Poder Espacial	3.1 Dominar en el Espacio
		3.2 Buscar Autonomía Tecnológica
		3.3 Desarrollar la Industria Espacial de Defensa
	4. Consolidar la Economía Espacial	4.1 Cerrar las Brechas del Mercado
		4.2 Incentivar el Emprendimiento Espacial
		4.3 Sustituir Demanda de Bienes y Servicios Espaciales
		4.4 Constituir al Puerto Espacial como un Ecosistema Económico
	5. Desplegar la Diplomacia Espacial	5.1 Robustecer la Cooperación Internacional
		5.2 Consolidar Alianzas Comerciales Espaciales
		5.3 Fortalecer Alianzas para la Seguridad y Defensa
	6. Promover el Desarrollo Tecnológico e Innovación	6.1 Integrar Centros de Investigación
		6.2 Desarrollar un Centro I+D+i en el Puerto Espacial
	7. Materializar el Puerto de Lanzamiento Espacial	7.1 Definir el alcance del proyecto
		7.2 Seleccionar la ubicación del Puerto
		7.3 Desarrollar infraestructura Soporte
		7.4 Construir el Puerto de Lanzamiento y Facilidades

Fuente: elaboración propia.

Objetivo 1: Crear Conciencia Espacial Nacional

La unidad nacional se constituye en uno de los grandes pilares para el logro de los objetivos estratégicos del Estado (Giraldo et al., 2020), a través de ella se forja la identidad que impulsa la proyección de los intereses particulares de una nación. Para este propósito, es perentorio promover desde el más alto nivel del gobierno hasta la base de la sociedad una conciencia de la importancia del espacio para el desarrollo del país y su trascendencia hacia entornos internacionales, no como un estadio transitorio sino como una visión de nación, sostenida en el tiempo y con esfuerzos permanentes para fortalecerla. Una conciencia colectiva que identifique además las potencialidades que tenemos como país y que se proponga explotarlas para el desarrollo integral (Corredor, 2017).

Línea de acción 1.1 Construir la Política Espacial Colombiana

El direccionamiento político a partir de la proyección holística del desarrollo espacial de la nación es una necesidad apremiante, no limitada a lo establecido en el CONPES 3983. Una política que apunte al logro de los intereses nacionales y que concentre a los instrumentos del poder nacional en el corto, mediano y largo plazo con objetivos, planes y programa definidos que, incentive no solo la capacidad del Estado sino la participación del sector privado y la educación alrededor de este propósito común. Una política ambiciosa que se plantee sacar provecho de los potenciales nacionales y que, entre otros objetivos visiones un desarrollo diferencial a partir de la conformación de un Puerto de Lanzamiento Espacial.

Línea de acción 1.2 Fomentar la Educación Espacial

El Estado tendrá como objetivo llegar a todos los niveles de la educación para disminuir la brecha del conocimiento existente frente a los países de avanzada. El propósito es generar conciencia espacial en la infancia a través de la educación básica primaria, secundaria y media, así como incentivar el desarrollo de programas de educación pre y posgradual en áreas de conocimiento que promuevan el desarrollo espacial y demás áreas de conocimiento aplicadas. De la misma manera, patrocinar la especialización de talentos colombianos en programas educativos en el exterior de nivel de maestría, doctorado y posdoctorado con el fin de adquirir y transferir conocimiento al interior del país.

Línea de acción 1.3 Incentivar la Curiosidad Espacial

Por medio de programas estatales articulados y liderados por el Ministerio de Educación, el Ministerio de Ciencia y Tecnología en integración con organizaciones de carácter social, así como con el sector de la industria aeroespacial; se busca incentivar la curiosidad espacial en niños y adolescentes de todos los niveles sociales y de escolaridad. Por medio de programas educativos, lúdicos y semilleros de investigación, el objetivo es impactar la innovación de país a partir de la estimulación temprana del ingenio y la curiosidad de jóvenes mediante la exploración del conocimiento del universo y desarrollos tecnológicos aplicados al espacio.

Objetivo 2: Afianzar el Liderazgo Institucional

El Estado deberá contar con un soporte institucional que viabilice la articulación de los esfuerzos tanto públicos como privados, que lidere y posibilite la promoción efectiva de los procesos necesarios para consolidar el desarrollo espacial. Este liderazgo proveniente de la voluntad del Estado deberá tener robustez institucional, autonomía y el poder de convocar e integrar las entidades y capacidades privadas con el fin de apuntalar el aprovechamiento de los beneficios espaciales.

Línea de acción 2.1 Constituir la Agencia Espacial Colombiana

Para lograr avanzar en la concreción de este objetivo, es decisiva la creación de la Agencia Espacial Colombiana como ente rector de la institucionalidad colombiana para el impulso y crecimiento de capacidades integrales en la exploración, explotación, investigación, regulación y soporte para el desarrollo espacial nacional. Más allá, de ser un “organismo de consulta, coordinación, orientación y planificación” (MRE, 2006) como está constituida la Comisión Colombiana del Espacio. Esta agencia de naturaleza especial con personería jurídica, patrimonio propio y autonomía administrativa, financiera y técnica, de carácter científico y con capacidad de integrar otros organismos del Estado, y privados de la educación e industria para consolidar los objetivos y el derrotero de la política espacial colombiana. Tendrá a su cargo la formulación y gestión del proyecto “Puerto Espacial Colombiano” y será interlocutora de las Agencias Espaciales internacionales.

Línea de acción 2.2 Consolidar la Fuerza Aeroespacial Colombiana

La Fuerza Aeroespacial Colombiana será fortalecida y reconocida en la capacidad espacial que a partir de su visión institucional ha desarrollado.

Como principal aliado de la Agencia Espacial Colombiana, la Fuerza Aeroespacial como a futuro se conocerá, dará continuidad a los programas de puesta en órbita de constelaciones de satélites, gestión de productos espaciales, desarrollo de capacidades autónomas para la construcción activos espaciales y los estudios que en materia científica buscan poner al primer hombre colombiano en el espacio. Así como, los proyectos que a posteriori se desarrollen. Ejercerá el liderazgo de las aplicaciones militares de los recursos espaciales y será la interlocutora ante las Fuerzas Espaciales del mundo para el intercambio de capacidades. Participará activamente en las fases de diseño, construcción, operación, gestión y seguridad del Puerto Espacial Colombiano.

Objetivo 3: Fortalecer el Poder Espacial

Como uno de los elementos constitutivos del poder militar, el poder espacial cobra cada día más relevancia para el fin de la seguridad y defensa nacional. Será para el Ministerio de Defensa una prioridad desarrollar capacidades diferenciales que fortalezcan el potencial militar de la nación en el dominio espacial, que a su vez sea puesto al servicio de los objetivos nacionales. En este sentido, este poder representará un instrumento del Estado que se entenderá útil para los fines diplomáticos, informativos, militares y económicos

Línea de acción 3.1 Dominar en el Espacio

Asignar a la *Fuerza Aeroespacial Colombiana* todas las funciones propias que conduzcan a la superioridad en el dominio espacial como un ambiente en el que también se disputan y defienden los intereses vitales de la nación. Para esto, se deberá desarrollar y aplicar una doctrina innovadora para buscar la libertad de acción en el espacio y potenciar los dominios terrestre, aéreo, marítimo y ciberespacial. Los objetivos primordiales serán posicionar activos espaciales, proveerles seguridad, garantizar la transferencia de información, explotar los productos espaciales, mantener conciencia espacial y ejercer el comando y control.

Línea de acción 3.2 Buscar Autonomía Tecnológica

Mediante el desarrollo autónomo y la cooperación internacional, la nación buscará en el largo plazo la independencia tecnológica para proveer capacidades militares de gran importancia como la inteligencia, vigilancia y reconocimiento, el posicionamiento global y las comunicaciones militares, por medio de los recursos espaciales. Un propósito ambicioso que otorgará capacidad de disuasión y una ventaja frente a los potenciales adversarios. Esta ventaja será de gran utilidad para la operación y gestión

del Puerto de Lanzamiento Espacial y los recursos que en órbita se posicionen.

Línea de acción 3.3 Desarrollar la Industria Espacial de Defensa

Una de las prioridades en el desarrollo de capacidades espaciales para la defensa, será la integración de los avances de la Fuerza Aeroespacial Colombiana, la Corporación de la Industria Aeroespacial Colombiana CIAC y la comunidad científica e innovadora del país. Este será el bastión para el desarrollo industrial que vigorice el poder espacial y además obtenga correspondencia internacional como un actor preponderante en la producción de activos y recursos espaciales que, proyecte a la nación en ambientes regionales y globales. Este desarrollo estará directamente ligado al desarrollo del Puerto Espacial Colombiano y los procesos de offset que antes y durante se puedan dar en la transferencia de conocimiento y materializados en el fortalecimiento de este eje.

Objetivo 4: Consolidar la Economía Espacial

La economía espacial es uno de los renglones que más crece a nivel mundial (SIA, 2022). En tal virtud, es de vital importancia que el desarrollo de capacidades sea apalancado por las oportunidades de un mercado cada vez más amplio y diverso que incorpora hoy actores estatales y privados, para el comercio de bienes y servicios relacionados con la operación espacial. Tanto las entidades públicas como privadas aportaran iniciativas que contribuyan desde proyectos sencillos, hasta la materialización de las innumerables oportunidades económicas que le generarían al país como Puerto de Lanzamiento Espacial.

Línea de acción 4.1 Cerrar las Brechas del Mercado

Mediante el estudio de las oportunidades de la economía espacial a nivel mundial versus las capacidades existentes en el país, así como, las proyectadas en el corto y mediano plazo, se propone trazar una estrategia para cerrar las brechas económicas y de inserción en los mercados que hasta ahora por desconocimiento o falta de capacidades no se han explorado. Esto además de ofrecer un diagnóstico del hoy, también marcará un punto de referencia para el desarrollo de una hoja de ruta que viabilice el fortalecimiento de la economía a partir de consolidación de proyectos que sean puestos al servicio de la economía espacial mundial.

Línea de acción 4.2 Incentivar el Emprendimiento Espacial

Como resultado de los procesos de curiosidad, educación e innovación y siendo parte integral de la política espacial, el Estado incentivará el emprendimiento de privados que, mediante procesos de investigación y desarrollo se vinculen al mercado espacial con la producción y comercialización de bienes y servicios para la exploración y explotación del espacio. Esta intención se verá materializada en el fortalecimiento de la proyección del país como Puerto de Lanzamiento Espacial, y las múltiples oportunidades que representa para la economía nacional.

Línea de acción 4.3 Sustituir Demanda de Bienes y Servicios Espaciales

En un propósito de mediano y largo plazo, la articulación de lo público y privado propenderá por la sustitución de importaciones y de adquisición de servicios en el exterior, por medio de la construcción de capacidades autónomas y de la transición de una economía basada en el sector primario para consolidar el sector secundario y terciario en el contexto espacial. Esta proyección contribuirá en el largo plazo a la sostenibilidad y potencializará nuevos desarrollos dentro de la operación del Puerto de Lanzamiento Espacial.

Línea de acción 4.4 Constituir al Puerto Espacial como un Ecosistema Económico

La proyección y puesta en funcionamiento del Puerto de Lanzamiento Espacial traerá implícita la necesidad de constituir una variedad de líneas de negocio que a partir de la operación y sostenimiento con impacto en los diferentes sectores de la economía se deben caracterizar y potencializar desde su misma concepción. Esta identificación deberá estar asociada a un actor estatal o privado que por su naturaleza, capacidad y facultades movilice la economía para que desde esa interdependencia se constituya un ecosistema económico virtuoso y con impacto directo en la generación de riqueza para el país.

Objetivo 5: Desplegar la Diplomacia Espacial

El despliegue de la diplomacia para potencializar el desarrollo espacial de la nación se constituye en uno de los instrumentos más relevantes para afianzar y proyectar el poder del Estado. Con esta estrategia, el país buscará

el reconocimiento como un actor espacial internacional, la interlocución legítima en asuntos de legislación espacial internacional, la validación de sus derechos sobre el segmento de la Órbita Geoestacionaria, la consolidación de mercados, la articulación de capacidades para la defensa cooperativa y el posicionamiento de país con la marca de “Puerto de Lanzamiento Espacial”, entre otras.

Línea de acción 5.1 Robustecer la Cooperación Internacional

La formulación de estrategias desde la acción sistémica del Estado contribuirá al reconocimiento del país como actor de relevancia a partir de las capacidades actuales y potenciales en la comunidad espacial. Corresponderá al Ministerio de Relaciones Exteriores estructurar las líneas de acción para constituir alianzas con actores internacionales que permitan el acceso a tecnologías de avanzada, a nuevo conocimiento, al amplio portafolio de bienes y servicios que permita la consolidación del proyecto del Puerto Espacial. El objetivo, será viabilizar su operación en el tiempo, como uno de los activos más importantes para los intereses espaciales de la región.

Línea de acción 5.2 Consolidar Alianzas Comerciales Espaciales

El desarrollo del Puerto de Lanzamiento Espacial implicará el esfuerzo significativo de la economía del Estado y privada, pero también será vital el socio internacional para tener acceso a toda la estructura económica que garantice el suministro de toda la cadena productiva desde materias primas hasta bienes terminados y servicios. Será una prelación para el Estado el establecimiento de alianzas que garanticen los flujos comerciales de entrada que, al mismo tiempo posicione los productos y servicios ofrecidos por el Puerto de Lanzamiento Espacial en el mercado internacional.

Línea de acción 5.3 Fortalecer Alianzas para la Seguridad y Defensa

El dominio espacial cada vez cobra más importancia dentro de las prioridades y necesidades para la supervivencia de los Estados. De esta manera, en coordinación con la Fuerza Aeroespacial Colombiana, el Ministerio de Defensa establecerá alianzas estratégicas y acuerdos de cooperación militar que considere el uso de activos espaciales para el fortalecimiento de la seguridad cooperativa y defensa de la nación. Los ejercicios operacionales, el intercambio de información, la protección de recursos y la exploración de tecnologías para potencializar los demás

dominios del poder militar, estarán en la primera línea para favorecer el desarrollo de esta acción estratégica.

Objetivo 6: Promover el Desarrollo Tecnológico e Innovación

Al considerarse un sector altamente influenciado por la tecnología, será de crucial importancia y ocupará un lugar preferencial en las prioridades del Estado, el desarrollo integral de los sectores contribuyentes al objetivo espacial. Corresponderá al Ministerio de Ciencia y Tecnología, en asocio con la Agencia Espacial Colombiana, desarrollar una política con financiación sostenida en el tiempo, con el fin de disminuir las brechas existentes en tecnología, que apunte a mejorar los indicadores de competitividad del país basado en la innovación. El sector de la educación será determinante con el incentivo de la curiosidad espacial y el fomento en la formación de investigadores por medio de semilleros orientados a solucionar los problemas de las diferentes áreas de conocimiento contribuyentes al desarrollo del Puerto Espacial.

Línea de acción 6.1 Integrar Centros de Investigación

Los esfuerzos y avances en investigación de productos y servicios espaciales deberán estar direccionados por la Agencia Colombiana del Espacio, dando prelación a la articulación de proyectos macro, abordados desde la educación, los centros de investigación del Estado y de la industria aeroespacial colombiana. Esta estructuración otorgará una mayor probabilidad de éxito e impacto a los grandes proyectos de país e imprimirán celeridad a los resultados en el tiempo. Una de las fuentes primarias será la transferencia de conocimiento y apropiación de tecnologías existentes proveniente de actores referentes a nivel mundial.

Línea de acción 6.2 Desarrollar un Centro I+D+i en el Puerto Espacial

Una gran cantidad de áreas de conocimiento, sectores del Estado y de la economía colombiana, confluirán en torno al Puerto de Lanzamiento Espacial. Este epicentro de actividades diversas concentrará el esfuerzo liderado por el Estado. Sin embargo, con la participación de todos los sectores a través de gran centro de Investigación, Desarrollo e Innovación que tenga por objetivo materializar proyectos específicos para el sostenimiento y proyección del Puerto Espacial, que después trasciendan a los objetivos de exploración y explotación de la nación en el espacio.

Objetivo 7: Materializar el Puerto de Lanzamiento Espacial

En esta línea se ve materializado el resultado secuencial y simultáneo del despliegue descrito anteriormente. En este proyecto, confluye la acción del Estado por medio de los instrumentos del poder nacional para construir una capacidad diferencial que proyecte al país como uno de los actores más influyente de la región. Será la Asociación Pública y Privada el mecanismo para la integración de capitales y capacidades que darán vida a esta iniciativa y que dada su complejidad tendrá varios objetivos en sus fases de constitución.

Línea de acción 7.1 Definir el alcance del proyecto

Si bien los avances y capacidades de Puertos Espaciales a nivel mundial son diversas, el país por medio de una comisión especial de expertos técnicos, científicos, financieros, legales, ambientales, entre otros. Definirá el alcance del proyecto y las capacidades que se desean desarrollar, así como, su viabilidad basada en la intención de país, pero también considerando las limitaciones que desde los diferentes aspectos de evaluación se puedan presentar.

Línea de acción 7.2 Seleccionar la ubicación del Puerto

La ubicación del Puerto Espacial debe reunir varias características que garanticen una operación eficiente y segura. Para este objetivo debe hacerse un análisis minucioso valorando condiciones esenciales como: seguridad de las instalaciones, seguridad para la operación, acceso para el suministro logístico, servicios vitales y suplementarios, condiciones climáticas, vías de comunicación, sistemas de transporte disponible, impacto medioambiental e inclusive aspectos diplomáticos con países vecinos que puedan verse afectados por la operación de los vehículos espaciales.

Línea de acción 7.3 Desarrollar infraestructura Soporte

Una de las garantías para la sostenibilidad de la operación es la robustez en la infraestructura logística, esto obligará a garantizar el acceso directo a un puerto marítimo y el acondicionamiento de este para la recepción y manipulación de material de gran peso y volumen, una red vial y ferroviaria que permita movilizar ágilmente material desde y hasta las instalaciones del puerto, un aeropuerto que de conexión al mundo, un complejo que garantice el suministro permanente de combustible para la operación del Puerto, entre otras. Esta y todas las consideraciones para el adecuado soporte, deberán ser estudiadas en la estructuración del proyecto.

Línea de acción 7.4 Construir el Puerto de Lanzamiento y Facilidades

Dando respuesta al alcance del proyecto, se consolidará la infraestructura y facilidades del Puerto Espacial, que como mínimo incluirá: plataforma de lanzamiento, centro de operaciones, instalaciones para el procesamiento de cargas, complejo para el mantenimiento y ensamble de vehículos espaciales, centro de entrenamiento, red de transporte interna, estación médica y de emergencia, además de todo el sistema de seguridad física y soporte para la operación de este (Adams & Petrov, 2006).

Conclusiones

A lo largo del presente trabajo de investigación, se evidenció como el espacio se constituye en un escenario cada vez más influyente en los múltiples ámbitos en que los Estados se gestionan para alcanzar sus intereses. En tal sentido, los actores de diversa naturaleza que buscan explorar y explotar los recursos espaciales, especialmente aquellos que son capaces de posicionarse en el tope de la pirámide del sector espacial, son los llamados a proyectar un poder distintivo en el sistema internacional.

Siendo esta una realidad, sobre la que se debe construir capacidades como nación para posicionarse en el entorno por medio de la conjugación de los instrumentos del poder nacional, este capítulo, en congruencia con los objetivos planteados, da respuesta y guía en tres ámbitos esenciales. En el primero de ellos, se consolida la caracterización del potencial geográfico colombiano para la consolidación de un potencial espacial diferencial. Así pues, la ubicación del país sobre la franja ecuatorial, la proyección directa hacia la Órbita Geoestacionaria, la posición y acceso bioceánico, así como, las condiciones de clima y meteorología, se constituyen en las características de mayor relevancia para el favorecimiento de la operación de un Puerto de Lanzamiento Espacial.

En el segundo, se delimitaron las variables geoestratégicas producto de la compilación y análisis de las teorías que a través de la historia se han postulado para identificar los determinantes en la configuración de los Estados como potencias. De esta disertación, se propone como variables de estudio: el potencial geográfico, poder económico, desarrollo tecnológico, población y voluntad, poder militar, recursos disponibles y capacidad política y diplomacia, aspectos que se constituyen en el insumo para el último objetivo.

Por último, y dando alcance al propósito de esta investigación, se presenta una hoja de ruta desde el análisis estratégico de las variables anteriormente identificadas para el fortalecimiento de las capacidades espaciales mediante la constitución de un Puerto de Lanzamiento Espacial. Esta articulación, que bajo la metodología Deibel permitió la evaluación del contexto externo e interno, los medios disponibles, los objetivos e intereses nacionales, para finalmente confluir en unos cursos de acción como estrategia nacional para aumentar la influencia del país en el ámbito espacial internacional.

Referencias bibliográficas

- Adams, C. M., & Petrov, G. (2006). Spaceport master planning: Principles and precedents. In Collection of Technical Papers - Space 2006 Conference (Vol. 2, pp. 1488–1511). <https://doi.org/10.2514/6.2006-7325>
- Álvarez, C.; Corredor, G. Editores (2020). El Cielo no es el límite. El Futuro Estelar de Colombia. Vol. 2.
- Aron, R. (1963). Paz y guerra entre las naciones (L. Cuervo, trad.). Madrid: Alianza Universidad.
- Baquer, M. (2010). Estrategia, Geoestrategia, Geopolítica. Instituto Español De Estudios Estratégicos. Madrid
- Barrero-Barrero, D., & Baquero-Valdés, F. (2022). Operaciones espaciales de Colombia: enfoque en seguridad y desarrollo. En J. H. Conde Mesa (ed.), Visión aeroespacial colombiana (pp. 43-70). Sello Editorial ESDEG
- Cabrera Toledo, Lester. (2020). Geopolítica crítica: alcances, límites y aportes para los estudios internacionales en Sudamérica. Foro internacional, 60(1), 61-95. Epub 15 de abril de 2020. <https://doi.org/10.24201/fi.v60i1.2574>
- Calderón, L. (2016). Colombia y la importancia en pertenecer al foro de Cooperación Económica Asia-Pacífico. Recuperado de: Dialnet-ColombiaYLaImportanciaEnPertenecerAlForoDeCooperac-5758204.pdf
- Cancillería (2022). Foro de Cooperación Asia Pacifico (APEC).

- Castro Torres, I. J. (2020). La astropolítica en un mundo pospandémico. Documento Análisis Del IEEE, 1–19. Retrieved from http://www.ieee.es/Galerias/fichero/docs_analisis/2020/DIEEEA17_2020JOSCAS_astropolitica.pdf
- Comisión Colombiana del Océano. (2018). Política Nacional del Océano y de los Espacios Costeros – PNOEC. Bogotá D.C.: Comisión Colombiana del Océano, Vicepresidencia de la República, Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, Comisión Oceanográfica Inter gubernamental.
- Consejo Nacional de Política Económica y Social. (2020). CONPES 3983 Política de Desarrollo Espacial: Condiciones Habilitantes para el Impulso de la Competitividad Nacional.
- Constitución Política de Colombia [Const]. Art. 101. 7 de julio de 1991 (Colombia)
- Corredor, C. (2017). Diseño de un marco y hoja de ruta que permita formular la política espacial de Colombia, para promover el desarrollo tecnológico, económico y social del país. <https://intellectum.unisabana.edu.co/bitstream/handle/10818/34888/Tesis%20final%20Giovanni%20Corredor%20Revisada%20Final%20para%20biblioteca-3-140.pdf;jsessionid=AC71A70B091D539640DBB53A4E2A85B5?sequence=1>
- CSIS Center for Strategic & International Studies (2019). Spaceports of the World 2109. https://csis-website-prod.s3.amazonaws.com/s3fs-public/publication/190314_Spaceports_The_World.pdf
- CSIS Center for Strategic & International Studies (2021). Space Threat Assessment 2021. https://aerospace.csis.org/wpcontent/uploads/2021/03/CSIS_Harrison_SpaceThreatAssessment2021.pdf
- Dachyar, M., & Purnomo, H. (2018). Spaceport Site Selection with Analytical Hierarchy Process Decision Making. Indian Journal of Science and Technology, 11(10), 1–8. <https://doi.org/10.17485/ijst/2018/v11i10/96506>
- Deibel, T. (2007). Foreign Affairs Strategy: Logic for American Statecraft. Cambridge University Press.

- Dolman, E. (1999) Geostrategy in the space age: An astropolitical analysis, *Journal of Strategic Studies*, 22:2-3, 83-106, DOI: 10.1080/01402399908437755
- Dolman, E. (2002). *Astropolitik, Classical Geopolitics in the Space Age*. Frank Cass Publisher.
- Dolman, E. (2012). The Case for Weapons in Space: A Geopolitical Assessment. SSRN Electronic Journal. <https://doi.org/10.2139/ssrn.1676919>
- Finger, G. W., Keller, D. L., & Gulliver, B. S. (2008). Public-private spaceport development. In *SpaceOps 2008 Conference*. American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc. <https://doi.org/10.2514/6.2008-3584>
- Giraldo Bonilla, H. F., Cabrera Ortiz, F., Benavides González, E., Rodríguez Aparicio, E., Tascón Muñoz, Ó. D., Velosa Porras, E., ... Murillo Díaz, Ó. L. (2020). Perspectivas sobre identidad e intereses nacionales de Colombia. In *Identidad e intereses nacionales de Colombia* (pp. 77–275). Escuela Superior de Guerra. <https://doi.org/10.25062/9789585250499.02>
- González, L. (2017). Organización del espacio global en la geopolítica “clásica”: una mirada desde la geopolítica crítica. *Revista de Relaciones Internacionales, Estrategia y Seguridad*, vol. 13, núm. 1, pp. 221-238, 2018. <https://doi.org/10.18359/ries.2864>
- Guzmán D.; Ruíz, J.; Cadena, M. (2014). Regionalización de Colombia según la Estacionalidad de la Precipitación Media Mensual, a través análisis de Componentes Principales. Grupo de Modelamiento de Tiempo, Clima y Escenarios de Cambio Climático Subdirección de Meteorología – IDEAM.
- Harrison, T., Johnson, K., & Roberts, T. G. (2019). *Spaceports of the World*. Report of the Csis Aerospace Security Project (p. 57). Retrieved from www.csis.org
- IDEAM. Atlas de viento de Colombia, 2017. [En línea] Disponible en: <https://goo.gl/6FNmig>
- Kaplan, Robert D. (2012) *The revenge of geography. What the map tells us about coming conflicts and the battle against fate*. New York: Random House.

- Kristof, L. (1960). The Origins and Evolution of Geopolitics. *Journal of Conflict Resolution*, 4, 15-51.
- Leloglou & Kocaoglan (2008). Establishing space industry in developing countries: Opportunities and difficulties. *Advances in Space Research*. Volume 42, Issue 11.
- Ministerio de Relaciones Exteriores (2006) Decreto 2442 “Por el cual se crea la Comisión Colombiana del Espacio, se dictan otras disposiciones y se deroga el Decreto 2442 de 2006”
- Mahan, A. (1890). *Influencia del Poder Naval en la Historia 1660-1783*. El Ferrol Editor.
- Mackinder, H. (1904), “The Geographical Pivot of History” *The Geographical Journal*. <https://doi.org/10.2307/1775498>
- Moreno M, Arandia, J, Cajas, J, & Zapata, P. (2021). La órbita sincrónica geoestacionaria reconocida en la constitución ecuatoriana: análisis desde el derecho espacial. *Dilemas contemporáneos: educación, política y valores*, 9(spe1), 00105. Epub 31 de enero de 2022.<https://doi.org/10.46377/dilemas.v9i.3015>
- Naciones Unidas (1959). *Convenio Internacional de Telecomunicaciones*. Unión Internacional de Telecomunicaciones. Ginebra
- Nye, J. (2010). *The Future of Power*. Public Affairs. New York.
- Ortiz, J. (2007). Huracanes y tormentas tropicales en el mar Caribe colombiano desde 1900. *Boletín Científico CIOH*.
- Patiño, C (2018). *Imperios contra Estados. La destrucción del orden internacional contemporáneo*. Bogotá, Penguin Random House, ISBN: 978-95-889-319-44.
- Pontijas, J (2020). Estrategia y geografía: la geoestrategia. *Araucaria. Revista Iberoamericana de Filosofía, Política y Humanidades*, vol. 22, núm. 44, pp. 399-426, 2020 Instituto Español de Estudios Estratégicos, España.
- Poveda, G (2022). Entrevista realizada el 15 de noviembre de 2022. Bogotá, Colombia.
- Poveda, G. & Álvarez, C. (2020). Colombia y la órbita geoestacionaria: un vínculo geoestratégico inalienable. In *El cielo no es el límite: el futuro*

- estelar de Colombia: El espacio exterior una oportunidad infinita para Colombia. Volumen 2 (pp. 165–265). Escuela Superior de Guerra. <https://doi.org/10.25062/9789585245631.10>
- Recuperado de: <https://www.cancilleria.gov.co/internacional/politica/regiones/asia-pacifico/apec>
- Rodríguez, E. (2015) Nuestro Derecho al Espacio. La órbita geoestacionaria: ¿Una frustrada regulación?. <https://revistas-colaboracion.juridicas.unam.mx/index.php/elementos-de-juicio/article/view/10248/9332>
- Rosales, G. (2005). Geopolítica y Geoestrategia, Liderazgo y Poder. Ensayos. Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá.
- Sánchez, Ricardo. (2012). En la Mente de los Estrategas. ¿Conoce usted su curva de rendimiento Estratégico? –1era Ed-- Centro de Estudios Estratégicos sobre Seguridad y Defensa. Bogotá. Escuela Superior de Guerra.
- Seedhouse, E. (2017). Spaceports Around the World, A Global Growth Industry (pp. 1–131). Springer.
- SIA. (2022). State of Satellite Industry Report. Satellite Industry Association. https://brycetech.com/reports/report-documents/SIA_SSIR_2022.pdf
- Torres V. (2019). Tiempo, clima y los fenómenos atmosféricos: desde torbellinos hasta cambio climático Weather, climate and the atmospheric phenomena: From WhirlWinds to climate change. Revista Digital Universitaria, 20(1), 1–13. Retrieved from <http://doi.org/10.22201/codeic.16076079e.2019.v20n1.a3>
- USSF. (2020). Space Power: doctrine for space forces. USSF, 51(1). Velázquez, J. (2013). El derecho del espacio ultraterrestre en tiempos decisivos: ¿estatalidad, monopolización o universalidad? Anuario mexicano de derecho internacional, 13, 583-638. <http://www.scielo.org.mx/pdf/amdi/v13/v13a14.pdf>
- Word Population Review, (2023) Countries with Space Programs 2023. <https://worldpopulationreview.com/country-rankings/countries-with-space-programs>

Diagramación y diseño:

Paola Forero Tamayo

Correo: jpaolaforet@gmail.com

<https://www.lmpromocionales.com/>

Este libro fue diagramado utilizando fuentes tipográficas
Times New Roman en sus respectivas variaciones a 11 puntos, títulos Minion
Variable Concept a 16 puntos.

Diseño de portada:

Gladys Lancheros

Gerente General - Graphic Motion

Cel: (+57) 318 793 2789

Correo: gladysclancheros@gmail.com

Impreso en el mes de diciembre de 2025.

100 ejemplares

Little Monkey BTL - Agencia de Publicidad

Calle 22L # 123a - 93

Bogotá, Cundinamarca

Colombia

Cel: (+57) 318 769 9552 / (+57) 317 639 0344

En el siglo XXI, el acceso al espacio dejó de ser un privilegio exclusivo de las grandes potencias. El avance tecnológico y la globalización del conocimiento han abierto oportunidades para que países emergentes como Colombia construyan su propio camino en el ámbito espacial. Sin embargo, este desafío exige desarrollar talento humano, consolidar infraestructura, fortalecer la seguridad espacial y promover una cultura científico-tecnológica que permita al país no quedar rezagado en esta nueva era.

De la Tierra al Espacio: Ciencia, Seguridad y el Papel de Colombia en la Nueva Era Espacial ofrece una mirada multidisciplinaria que articula los componentes científicos, tecnológicos, ambientales y estratégicos necesarios para comprender el presente y el futuro del sector espacial nacional. La obra analiza el papel de las ciencias básicas y aplicadas en la exploración espacial, la relevancia de la investigación, el desarrollo y la innovación como motores de una industria propia, así como los desafíos de la transferencia tecnológica. También aborda temas críticos como los desechos espaciales, la sostenibilidad del entorno orbital, la seguridad operacional y la necesidad de una planificación logística que permita al país avanzar hacia capacidades nacionales de lanzamiento y operación.

A través de experiencias comparadas, análisis contextualizados y proyecciones estratégicas, el libro traza un panorama completo del ecosistema espacial colombiano y sus oportunidades. Su mensaje es claro: consolidar una estrategia espacial sólida es una tarea que requiere coordinación entre academia, gobierno e industria. El futuro espacial de Colombia dependerá de su capacidad para transformar conocimiento en acción y visión en política pública, convirtiendo su potencial en verdaderas capacidades para competir y aportar en la nueva era espacial.

FUERZA AEROESPACIAL
COLOMBIANA



ISBN: 978-628-7865-04-4

