

PERSPECTIVAS DE LOS DESAFÍOS DEL SECTOR AEROESPACIAL DE LATINOAMÉRICA



EDITORES ACADÉMICOS:
GUILLERMO ALFONSO GIRALDO MARTINEZ Y
DIEGO FERNANDO MORANTE GRANOBLES.



EMAVI
SELLO EDITORIAL

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

Perspectivas de los desafíos del sector aeroespacial de Latinoamérica

Perspectivas de los desafíos del sector aeroespacial de Latinoamérica

/ Editores académicos: Morante Granobles, Diego Fernando; Giraldo Martínez, Guillermo Alfonso.; -Santiago de Cali: Sello Editorial Escuela Militar de Aviación “Marco Fidel Suárez” EMAVI, 2024.

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

Incluye bibliografía al final del cada capítulo

ISBN: 978-628-96090-7-3

ISBN (Digital): 978-628-96705-0-9

1. Seguridad Nacional – Colombia 2. Gestión tecnológica aeronáutica – Colombia – 3. Industria aeronáutica

I. Giraldo Martínez, Guillermo Alfonso (autor), II. Escobar, Jhon F (autor), III. Anderson Flórez, Jimmy (autor), IV. Angarita Patiño, Lina María (autor), V. Rodríguez Adaime, Cesar Augusto (autor), VI. Rincón Urbina, Sonia Ruth (autor), VII. Bastidas Bonilla, Edwin Jairt (autor), VIII. Penagos Oquendo, Melissa (autor), IX. Delgado Martínez, Julián Andrés (autor), X. Garzón Méndez, Gina Paola (autor), XI. Calderón Cortes, Alan Ricardo (autor), XII. Amador Pinilla, Juan Pablo (autor), XIII. Sáenz Hernández, German Dario (autor), XIV. Méndez Gómez, Javier Enrique (autor), XV. Rivera Castro, Jorge Eduardo (autor), XVI. Cárdenas Espinosa, Lorena Paola (autor), XVII. Pastrana Palma, Alberto de Jesús (autor), XVIII. Alvarado López, Raúl Arturo (autor), XIX. Valencia Pérez, Luis Rodrigo, (autor), XX. Aguilar Rangel, Gibrán, (autor), XXI. Flores Agüero, Francisco, (autor), XXII. Colombia. Fuerza Aérea Colombiana. Escuela Militar de Aviación “Marco Fidel Suárez” (EMAVI).

620 -dc 21.

TL500.G57 2024

Catálogo SIBFuP 991329316007231

FUERZA AEROSPAIAL
COLOMBIANA



Perspectivas de los desafíos del sector aeroespacial de Latinoamérica

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

©EMAVI Sello Editorial

Dirección

CR. Oscar Mauricio Gómez Muñoz

Subdirección

CR. Fabián Andrés Salazar Ospina
Escuela de Formación y Jefe de Estado Mayor

Comando Grupo Académico

TC. Kenny Leonardo Moreno Delgado

Jefe Sección Investigación

MY. Héctor Fabio Calvo Valencia

1ra. Edición: 100 ejemplares

Santiago de Cali, Valle del Cauca, 2024

Sección Investigación EMAVI

Carrera 8 # 58-67 (La Base) Cali-Colombia
Teléfono: +57 (2) 488 1000, Ext. 68841

Apoyo Gestión de Publicaciones Científicas

PS. Diana María Mosquera Taramuel
diana.mosquerat@emavi.edu.co

Corrección de Estilo:

Raúl Eduardo Chacón Hernández

Diseño y Diagramación Editorial:

Chako Hdzn

Publicado en Colombia–Published in Colombia

Contenido relacionado

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

Las instituciones editoras de esta obra no se hacen responsables 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.

Editores académicos:

Guillermo Alfonso Giraldo Martínez

Diego Fernando Morante Granobles

PERSPECTIVAS DE LOS DESAFÍOS DEL SECTOR AEROESPACIAL DE LATINOAMÉRICA



**FUERZA AEROESPACIAL
COLOMBIANA**



EMAVI
SELLO EDITORIAL

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	7
CAPÍTULO 1. LA CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN Y SU IMPORTANCIA EN EL PODER AÉREO Y ESPACIAL	9
Guillermo Alfonso Giraldo Martínez / Fuerza Aeroespacial Colombiana	
CAPÍTULO 2. CARACTERIZACIÓN Y GOBERNANZA DE LOS SISTEMAS DE INNOVACIÓN EN EL MARCO DE LAS POLÍTICAS PÚBLICAS. CASO SECTOR AERONÁUTICO ANTIOQUIA	43
Jhon Freddy Escobar / Universidad Pontificia Bolivariana Jimmy Anderson Florez / Instituto Metropolitano de Medellín - ITM Lina María Angarita Patiño / Universidad Pontificia Bolivariana	
CAPÍTULO 3. PROPUESTA SISTÉMICA DE UN PROGRAMA ESPACIAL	67
Cesar Augusto Rodríguez Adaime / Structural Synergy SAS Clúster Aeroespacial del Pacífico / Clúster Aeroespacial del Pacífico - AEROSPACIFIC Sonia Ruth Rincón Urbina / Fuerza Aeroespacial Colombiana (FAC) Edwin Jairt Bastidas Bonilla / Institución Universitaria Escuela Nacional del Deporte	
CAPÍTULO 4. EMPRENDIMIENTO DE BASE TECNOLÓGICA EN EL ÁMBITO UNIVERSITARIO: IMPULSANDO LA INNOVACIÓN EMPRESARIAL	115
Alberto De Jesús Pastrana Palma y Raúl Arturo Alvarado López / Universidad Autónoma de Querétaro, México	
CAPÍTULO 5. MEDICIÓN DE CAPACIDADES DE PROSPECCIÓN DE LA INDUSTRIA AEROESPACIAL EN COLOMBIA	131
Melissa Penagos Oquendo /Universidad Pontificia Bolivariana Jimmy Anderson Florez / Instituto Metropolitano de Medellín - ITM Jhon Freddy Escobar / Universidad Pontificia Bolivariana	

CAPÍTULO 6.
VUELO HACIA EL FUTURO: ESTRATEGIAS Y DESAFÍOS
DE IMPLEMENTACIÓN DE TECNOLOGÍAS 4.0 EN LA
GESTIÓN AÉREA MILITAR DE MÉXICO Y COLOMBIA **165**

Luis Rodrigo Valencia Pérez, Gibrán Aguilar Rangel y Francisco Flores Agüero
/ Universidad Autónoma de Querétaro

CAPÍTULO 7.
INFLUENCIA DE LOS SATÉLITES PEQUEÑOS PARA LA
SEGURIDAD Y DEFENSA NACIONAL **201**

Julián Andrés Delgado Martínez y Gina Paola Garzón Méndez
/ Escuela Militar de Aviación “Marco Fidel Suárez” - Fuerza Aeroespacial Colombiana

CAPÍTULO 8.
TRANSPORTE AÉREO ESTRATÉGICO MILITAR Y SUS
IMPACTOS A LA SEGURIDAD Y DEFENSA NACIONAL **223**

Alan Ricardo Calderón Cortés / Fuerza Aeroespacial Colombiana (FAC)

CAPÍTULO 9.
EL DESARROLLO ESPACIAL EN LA LUCHA CONTRA LA
EXPLOTACIÓN ILEGAL DE ORO EN COLOMBIA EN EL
MARCO DE LA SEGURIDAD Y DEFENSA NACIONAL **257**

Juan Pablo Amador Pinilla / Fuerza Aeroespacial Colombiana (FAC)

CAPÍTULO 10.
DESPLIEGUE Y OPERACIÓN DE UNA ESTACIÓN
TERRENA EN ANTÁRTICA: CONSIDERACIONES PARA
SISTEMAS SATELITALES EN CONDICIONES EXTREMAS

Germán Dario Sáenz Hernández, Javier Enrique Méndez Gómez, Jorge Eduardo
Rivera Castro, Lorena Paola Cardenas Espinosa **291**
/ Centro de Investigación en Tecnologías Aeroespaciales
Fuerza Aeroespacial Colombiana (FAC)

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la industria aeroespacial se ha consolidado como un pilar estratégico para el desarrollo económico y tecnológico a nivel global. América Latina, aunque con un rol emergente, está reconociendo la relevancia de este sector como catalizador de innovación y competitividad global. Este libro surge como un esfuerzo interdisciplinario para explorar los desafíos, avances y oportunidades que enfrenta la región en su integración al panorama aeroespacial internacional, destacando la sinergia entre ciencia, tecnología e innovación (CTeI) y la seguridad y defensa de las naciones.

La intersección entre tecnología avanzada, desarrollo económico y políticas públicas es fundamental en la configuración del poder aéreo y espacial, en una región, caracterizada por su diversidad cultural, recursos naturales y contextos geopolíticos únicos, que enfrenta retos significativos para posicionarse en un sector históricamente dominado por grandes potencias como Estados Unidos, China y la Unión Europea. Sin embargo, el creciente interés por la innovación tecnológica, la sostenibilidad y la seguridad nacional presenta oportunidades para que Latinoamérica aproveche su potencial mediante la cooperación internacional, la gobernanza estratégica y la participación y sinergia activa entre, industria, los estados y la academia.

Este volumen reúne un análisis profundo sobre temas cruciales que impactan directamente el desarrollo aeroespacial en la región. Desde la influencia de tecnologías satélites en la seguridad nacional, hasta la implementación de tecnologías emergentes en la gestión del transporte aéreo militar, cada capítulo proporciona una perspectiva crítica y fundamentada en evidencia científica. En particular, se aborda cómo la integración de la CTeI (Ciencia, Tecnología e Innovación) no solo fortalece las capacidades estratégicas de los estados, sino que también fomenta un ecosistema de innovación sostenible y adaptado a las necesidades locales.

El libro está estructurado en diez capítulos que examinan una amplia gama de temas, incluyendo el emprendimiento tecnológico en el ámbito universitario, el impacto de las tecnologías 4.0 en las operaciones militares y el rol de las políticas públicas en la gobernanza de los sistemas de innovación. Este enfoque multidimensional permite comprender la complejidad inherente al desarrollo aeroespacial en América Latina, ofreciendo a los lectores herramientas analíticas y prácticas para abordar los desafíos actuales.

La creciente relevancia del espacio como la “cuarta dimensión” estratégica subraya la necesidad de que los países latinoamericanos avancen en sus capacidades espaciales. Tecnologías como los satélites pequeños y las estaciones terrestres en condiciones extremas no solo tienen aplicaciones civiles, sino también implicaciones significativas para la defensa nacional y la gestión de recursos naturales. Estos avances requieren un enfoque interdisciplinario que combine conocimientos técnicos con consideraciones políticas, económicas y sociales.

En este contexto, el libro “Perspectivas Interdisciplinarias en la Industria Aeroespacial Latinoamericana” busca proporcionar una plataforma de reflexión y acción para académicos, profesionales y tomadores de decisiones interesados en el futuro del sector aeroespacial en la región. Donde, la colaboración entre los actores estatales, privados y

académicos se presenta como eje transversal para impulsar el desarrollo de capacidades críticas, fomentar la transferencia de tecnología y promover la sostenibilidad.

Este libro no solo refleja el estado actual de la industria aeroespacial en Latinoamérica, sino que también propone un marco prospectivo para su evolución. Al integrar análisis teóricos y estudios de caso prácticos, los autores ofrecen una visión integral que resalta las oportunidades y desafíos del sector, posicionándolo como una herramienta clave para el desarrollo regional en un mundo cada vez más interconectado y tecnológicamente avanzado.

CAPÍTULO 1.

LA CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN Y SU IMPORTANCIA EN EL PODER AÉREO Y ESPACIAL

Teniente Coronel Guillermo Alfonso Giraldo Martínez

Fuerza Aeroespacial Colombiana

PhD en Gestión Tecnológica e Innovación

<https://orcid.org/0000-0002-0788-9151>

guillermo.giraldo@fac.mil.co

“Los imperios del futuro, son los imperios de la mente”.
Winston Churchill

La ciencia, tecnología e innovación (CTeI) constituyen un eje esencial para el progreso y desarrollo de una nación en diversos ámbitos económicos, sociales, políticos y culturales. Estas áreas impulsan el avance tecnológico mediante el desarrollo de nuevas tecnologías y procesos; fortalecen la competitividad de los países y organizaciones en el mercado global a través de la generación de soluciones únicas; mejoran la calidad de vida y el bienestar de la población en sectores como la medicina y la agricultura; promueven la sostenibilidad frente a la escasez de recursos; incrementan la productividad y la eficiencia, beneficiando a la economía en general; y facilitan el abordaje de desafíos complejos, así como la resolución de problemas en la sociedad (Arechavala Vargas, 2011).

En consecuencia, el presente capítulo tiene como objetivo principal describir cómo las actividades en ciencia, tecnología e innovación fortalecen el poder aéreo y espacial, además de contribuir a la mejora de la seguridad y defensa nacional. La investigación realizada sigue un enfoque cualitativo y un diseño metodológico basado en el análisis documental, empleando técnicas de revisión bibliométrica y cienciométrica. Las ecuaciones de búsqueda se estructuraron integrando tres términos referenciados, aplicando filtros de información por espacio temporal desde 1982 hasta 2024. Para ello, se utilizaron las plataformas SCOPUS y Science Direct, seleccionando artículos de revisión e investigación de los autores encontrados. Posteriormente, se eligieron los artículos más relevantes, basándose en el número de citas y su relación con la temática, para describir los argumentos planteados por los autores respecto a la importancia de la CTeI en los asuntos de seguridad y defensa nacional vinculados al poder aéreo y espacial.

Asimismo, se tomaron como referencia el *Manual de Doctrina Básica Aérea, Espacial y Ciberespacial* de la Fuerza Aérea Colombiana (DBAEC) y la *Estrategia para el Desarrollo del Poder Aéreo y Espacial de la FAC 2042* (ESDAES 2042) para fundamentar el marco teórico que sustenta esta revisión documental.

Palabras Clave:

Ciencia; Defensa Nacional; Innovación; Poder Espacial; Seguridad Nacional; Tecnología.

2. REVISIÓN DE LA LITERATURA

Los ejes que sustentan el presente marco teórico, sobre el cual se desarrollará este capítulo, se enmarcan en los aspectos descritos a continuación relacionados con la ciencia, la tecnología, la innovación, el poder aéreo y el poder espacial:

2.1. Ciencia, Tecnología e Innovación (CTeI)

La Organización de las Naciones Unidas, en el Informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo de 1987, establece: “La brecha que separa a las naciones ricas de las pobres se agranda en vez de achicarse, por las tendencias y los arreglos institucionales presentes, son escasas las perspectivas de que el proceso cambie diametralmente de dirección” (Organización de las Naciones Unidas, 1987).

Es relevante destacar que esta brecha se origina, en gran medida, por el aislamiento productivo derivado de la ausencia de productos competitivos de base tecnológica. Esta carencia impide la introducción de innovaciones al mercado que mejoren la calidad de vida y el bienestar de los ciudadanos. En el ámbito militar, esta situación se refleja en la renuncia a ventajas estratégicas, una menor autonomía en la toma de decisiones en materia de seguridad y defensa, y la dependencia de equipos de defensa suministrados por terceros. Este fenómeno genera salidas de flujos de energía y capital hacia los países productores de dichas tecnologías, lo que a su vez perpetúa el estancamiento económico y social de las naciones en vías de desarrollo (Giraldo Martínez y Valencia Pérez, 2022).

Para estructurar el marco teórico sobre ciencia, tecnología e innovación (CTeI), el autor propone definir estos conceptos de manera individual, con el objetivo de visualizar claramente su interrelación e interdependencia. Esto permitirá comprender su importancia como elementos fundamentales para el desarrollo y el avance científico en el fortalecimiento del poder aéreo y espacial.

2.1.1. Ciencia

Según Bunge (2013), la ciencia es un conocimiento racional, sistemático, exacto, verificable y, por ende, falible, del cual se deducen principios y leyes generales con capacidad predictiva y comprobables experimentalmente. Asimismo, señala que, a través de la investigación científica, la humanidad ha logrado construir una comprensión conceptual amplia, profunda y precisa del mundo.

La ciencia busca, de manera constante, obtener un conocimiento objetivo, lo cual se evidencia en las ciencias fácticas, como las áreas STEM, fundamentales en el desarrollo aeroespacial. Por esta razón, una investigación científica refleja características de objetividad y racionalidad (Bunge, 2013).

En el ámbito militar, el desarrollo científico, especialmente en lo referente al poder aéreo y espacial, ejerce una influencia significativa como eje transformador en las capacidades de las fuerzas militares de un país. Este avance genera habilidades para enfrentar diversas amenazas, mediante la integración de múltiples técnicas y sectores de la ciencia (Giraldo, Flórez y Escobar, 2023).

2.1.2. Tecnología

Sáenz, citado por Raynaud (2018), define la tecnología como “el conjunto de conocimientos científicos y empíricos, habilidades, experiencias y organización requeridos para producir, distribuir, comercializar y utilizar bienes y servicios” (Raynaud, 2018, p. 13).

Por su parte, Lavados y Ochoa (1990) amplían este concepto, señalando que la tecnología abarca conocimientos teóricos y prácticos, medios físicos, *know-how*, métodos y procedimientos productivos, gerenciales y organizativos, así como la capacidad de identificar y asimilar éxitos y fracasos previos. Además, incluye las habilidades y destrezas de los recursos humanos involucrados.

Según Raynaud (2018), los conocimientos tecnológicos se incorporan en diversos objetos:

- **El hombre (*humanware*):** conocimientos y habilidades.
- **Los registros (*software*):** procedimientos, manuales y bancos de datos.
- **Las instituciones (*orgware*):** estructuras organizativas, interacciones y experiencia empresarial.
- **Los objetos (*hardware*):** materiales, maquinarias y equipos.

La tecnología surge como una respuesta a los deseos del ser humano de transformar su entorno y mejorar su calidad de vida. Este concepto integra conocimientos y técnicas desarrollados de forma organizada a lo largo de la historia para satisfacer necesidades humanas específicas (Roldán Paula, 2024).

Según Bijker (2005) y Gallego (2005), la tecnología puede clasificarse de la siguiente manera:

- **Blanda:** bienes intangibles, como nuevas teorías o formas de gestión de recursos.
- **Dura:** bienes tangibles, como vehículos inteligentes modernos, edificios antisísmicos o teléfonos móviles.
- **Flexible:** tecnologías aplicables en diferentes actividades y áreas de estudio, como la inteligencia artificial, que puede utilizarse en salud, defensa o comunicaciones, entre otros campos.

2.1.3. Innovación

El concepto de innovación es amplio y diverso, con múltiples definiciones propuestas por diversos autores. Sin embargo, en el marco del desarrollo de este capítulo, se tomará como referencia lo descrito en el *Manual de Oslo* (2018), que define la innovación de la siguiente manera:

Es un nuevo o mejorado producto o proceso que difiere significativamente de los productos o procesos anteriores de la unidad y que ha sido puesto a disposición de los usuarios potenciales (producto) o puesto en uso por la unidad (proceso).

Las actividades de innovación, incluyen todos los desarrollos, financieros y comerciales, son todas las actividades emprendidas por una empresa que tienen como objetivo dar como resultado una innovación para la firma.

Una innovación empresarial es un producto o proceso empresarial nuevo o mejorado (o combinación de los mismos) que difiere significativamente de los productos anteriores de la empresa o procesos de negocio y que se ha introducido en el mercado o puesto en uso por la firma.

Una innovación de producto es un bien o servicio nuevo o mejorado que difiere significativamente productos o servicios anteriores de la empresa y que se ha introducido en el mercado.

Una innovación de procesos de negocios, es un proceso de negocios nuevo o mejorado para uno o más funciones de negocios que difieren significativamente de los negocios anteriores de la empresa. Procesos y que ha sido puesto en uso por la firma. (OECD and Eurostat 2018)

2.1.4. Poder Aéreo

Desde que Giulio Douhet, oficial italiano, postuló que las guerras futuras podrían ganarse rápidamente mediante el poder aéreo, evitando los prolongados enfrentamientos en trincheras característicos de la Primera Guerra Mundial, la aviación militar comenzó a ser vista como un eje central para proteger los intereses de una nación y como un nuevo campo de acción del poder militar en el aire (Douhet, 2009). Esta visión fue compartida por generales como el mariscal del aire de la RAF (Real Fuerza Aérea Británica), Hugh Trenchard, quien afirmó que el poder aéreo es “un brazo militar independiente y ganador de guerras” (Fuerza Aérea Colombiana, 2018, 2020).

El poder aéreo se ha consolidado como un componente crítico en la guerra moderna, donde su evolución e impacto han transformado la naturaleza de los conflictos a través de actividades como la vigilancia, el reconocimiento y el bombardeo aéreo. Sin embargo, los avances tecnológicos y las estrategias militares han llevado a que el dominio del aire amplíe su participación en los conflictos modernos.

Para definir el concepto de poder aéreo, se tomará como referencia el *Manual de Doctrina Básica de la Fuerza Aérea Colombiana* (DBAEC), que establece: “Capacidad de una nación para proyectar su fuerza militar en, desde y a través del espacio aéreo. Este poder incluye la habilidad de influir en el comportamiento de actores y el curso de eventos” (Fuerza Aérea Colombiana, 2018).

Asimismo, se utilizará el DBAEC para definir el concepto de superioridad aérea, descrito a continuación:

Superioridad aérea es la capacidad de una fuerza aérea para establecer el control efectivo del espacio aéreo mediante la neutralización o destrucción de la aviación enemiga. Esto se puede lograr a través de diversas tácticas, incluyendo operaciones especiales ofensivas o disuasivas. El objetivo principal de la superioridad aérea es el control del espacio aéreo, lo que permite a la fuerza que lo domina operar con mayor libertad y eficacia, mientras restringe

o niega la capacidad del enemigo para hacer lo mismo. (Fuerza Aérea Colombiana, 2018)

Recogiendo los aportes de diversos pensadores, el *Manual de Doctrina Básica de la Fuerza Aérea Colombiana* (DBAEC) define las principales características del poder aéreo, las cuales se resumen a continuación (Fuerza Aérea Colombiana, 2018):

- Precisión: Capacidad de golpear objetivos específicos con alta exactitud.
- Perspectiva: Vista amplia y estratégica que ofrece el dominio aéreo.
- Velocidad: Rapidez en el movimiento y acción.
- Alcance: Capacidad para operar a grandes distancias.
- Maniobrabilidad: Agilidad para cambiar de posición o táctica.
- Movilidad: Facilidad de desplazamiento de fuerzas y equipos.
- Respuesta: Capacidad de reaccionar rápidamente a los cambios.
- Autonomía Limitada: Grado de independencia operacional.
- Capacidad de Carga: Habilidad para transportar cargas y personal.
- Sensibilidad a Condiciones Ambientales: Influencia del clima y el entorno.
- Aplicación Tecnológica: Uso de tecnología avanzada.
- Dependencia Logística: Necesidad de soporte y suministros.

2.1.5. Poder Espacial

El poder espacial se desarrolla en la denominada cuarta dimensión, “la espacial,” como resultado del avance aeronáutico y el deseo humano de explorar y aprovechar el espacio. Este desarrollo es un logro de la evolución humana, impulsado inicialmente por la carrera espacial durante la Guerra Fría y, posteriormente, por la reducción exponencial de los costos asociados al acceso al espacio, gracias a la participación de la industria privada con empresas como SpaceX o Blue Origin (Calderón et al., 2019).

Según Collins, citado por Baquero (2019), esta nueva dimensión será clave para la dominación futura. A partir de los conceptos de Mackinder, Collins propone la siguiente analogía:

- Quien controla el espacio circunterrestre, domina el planeta Tierra.
- Quien controla la Luna, domina el espacio circunterrestre.
- Quien domina L-4 y L-5, domina el sistema Tierra-Luna.

El poder espacial es una combinación de avances tecnológicos que pueden llegar a consecuencias geopolíticas insospechadas, dejando atrás definiciones y reglas de empleo del poder militar antiguas, o recientes sobre la doctrina de la guerra, y que por el rápido desarrollo tecnológico no se alcanza a dimensionar sus posibles resultados para la seguridad y defensa de los intereses nacionales de un país (Baquero 2019).

Según Klein (2004) citando en (Calderón et al., 2019, p.42-54), el poder espacial no es diferente del poder aéreo, sin embargo, esta relación empezó a separarse con las operaciones espaciales de los Estados Unidos que tienen implicaciones que abarcan todos los elementos del poder nacional: diplomático, militar, económico, tecnológico e

informativo. Sugiriendo que las teorías del poder naval y del poder aéreo deberían ser los referentes para construir las teorías del poder espacial.

Por consiguiente, para definir el concepto de poder espacial, se debe definir primero el concepto de “espacio” como: “El área sobre la atmósfera de la Tierra que se extiende infinitamente en todas las direcciones, comenzando aproximadamente a 100 kilómetros sobre la superficie terrestre, en la denominada Línea de Kármán” (Calderón et al., 2019, p.48).

Calderón y otros definen el poder espacial como: “La facultad y voluntad del uso de las capacidades espaciales de carácter civil, militar y sus infraestructuras asociadas, en apoyo de las estrategias de seguridad y desarrollo nacionales, así como del logro de los intereses nacionales objetivos y subjetivos” (Calderón et al., 2019, p.50).

Sin embargo, para efectos del presente proyecto se tomará el concepto del DBAEC como se relaciona a continuación: “El poder espacial es la capacidad de emplear defensiva u ofensivamente la totalidad de las capacidades espaciales en favor de los fines del Estado” (Fuerza Aérea Colombiana, 2018).

3. METODOLOGÍA

La metodología propuesta se basa en el enfoque cualitativo, orientado hacia la comprensión de situaciones únicas y particulares, centrado en la búsqueda de significado y sentido que los propios agentes asignan a los hechos, y en cómo los individuos o grupos sociales viven y experimentan ciertos fenómenos o experiencias, siendo objeto de investigación (Hernández Sampieri, Fernández Collado, y Baptista Lucio, 2014). El conjunto de técnicas empleadas por el método cualitativo para la recolección de datos produce información descriptiva sobre una conducta observable (Sánchez Silva, 2005).

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

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

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 bibliométrico, con documentos de fuentes científicas confiables y validadas de plataformas como SCOPUS y Science Direct estableciendo la siguiente información:

- Países que más publican sobre el tema de estudio
- Documentos publicados en los últimos 5 años sobre el tema de estudio
- Instituciones que más publican sobre el tema de estudio
- Autores más relevantes por número de publicaciones por año
- Listado de documentos seleccionados para el desarrollo del documento

4. DESARROLLO

4.1. Problema de investigación

La integración de la economía espacial con la economía aeronáutica conforma el sector aeroespacial, en el cual la innovación en defensa desempeña un papel importante. Impulsado principalmente por el gasto militar de Estados Unidos, China y Rusia, con un alto enfoque en tecnologías digitales, impresión 3D, aviación no tripulada tipo VTOL y los nuevos modelos de negocio para el acceso al espacio presentados por compañías como SpaceX, que se presentan como agentes generadores de cambios significativos (Coykendall, Wellener y Hardin, 2022). Esto muestra la conexión que han generado las grandes potencias militares con el desarrollo de su economía aeroespacial, como eje transformador de sus capacidades de seguridad y defensa, lo que les permite evolucionar y crecer sostenidamente en el desarrollo de su poder aéreo y espacial.

La confluencia entre la CTeI y el poder aéreo y espacial de una nación permite a un estado posicionarse estratégicamente para su seguridad y defensa nacional en el escenario geopolítico actual, proyectando su fuerza disponible para asegurar sus intereses nacionales ante otros estados. Así, la ciencia, tecnología e innovación se convierten en la piedra angular para mantener y mejorar dichas capacidades.

La CTeI impulsa avances significativos en la aviación y la exploración espacial, con investigaciones en campos como la aerodinámica, propulsión y ciencias de materiales, entre otros, lo que lleva a la creación de aeronaves cada vez más eficientes, rápidas y sigilosas. Del mismo modo, como lo declara Álvarez et al. (2019), el interés por acceder al espacio ha permitido el desarrollo de mejoras en los procesos de comunicación, observación de la Tierra y la navegación terrestre, marítima y aérea, potenciando las capacidades operativas multidominio y proporcionando ventajas militares estratégicas a los países que lideran la innovación en estos campos.

La superioridad aérea y espacial no solo garantiza la seguridad de las fronteras, sino que también proporciona capacidades estratégicas para VRI (vigilancia, reconocimiento e inteligencia) y una respuesta versátil a posibles amenazas internas o externas. Mantener esta superioridad exige sistemas avanzados, lo que requiere una continua inversión en investigación y desarrollo para mantener y mejorar estas capacidades, con la participación articulada de los actores del estado, la industria y la academia, generando un impacto significativo en la economía con empleos altamente especializados, fomentando el crecimiento empresarial y promoviendo la exportación de productos y servicios de alta tecnología, como lo mencionan Giraldo Martínez y Valencia Pérez (2022). Además, la investigación y el desarrollo en estos campos a menudo resultan en resultados tecnológicos con aplicación dual (civil-militar), impulsando la relevancia y competitividad a largo plazo en el escenario global.

Lo anterior permite plantear la siguiente pregunta de investigación central, a la cual se pretende dar respuesta en el desarrollo del presente capítulo del libro: ¿Cómo influyen las actividades de ciencia, tecnología e innovación en el fortalecimiento del poder aéreo y espacial y en la mejora de la seguridad y defensa de una nación? El objetivo principal será describir cómo las actividades en ciencia, tecnología e innovación fortalecen el poder aéreo y espacial y mejoran la seguridad y defensa nacional.

4.2. Pregunta de investigación

¿Cómo influyen las actividades de ciencia, tecnología e innovación en el fortalecimiento del poder aéreo y espacial y mejora la seguridad y defensa de una nación?

5. OBJETIVOS

5.1 Objetivo general

Describir cómo las actividades en ciencia, tecnología e innovación fortalecen el poder aéreo y espacial y mejoran la seguridad y defensa nacional.

5.2 Objetivos específicos

- Identificar los autores y documentos relacionados con la importancia de la CTel en el poder aéreo, la seguridad y defensa nacional identificados como los más relevantes entre 2018 y 2023.
- Relacionar los aportes de las actividades CTel para el fortalecimiento de la seguridad y defensa nacionales
- Definir los elementos que se relacionan con actividades de ciencia, tecnología e innovación que influyen en el fortalecimiento del poder aéreo y espacial.

6. DEFINICIÓN PARÁMETROS DE BÚSQUEDA Y ELECCIÓN DOCUMENTOS

Para el desarrollo del análisis bibliométrico, se utilizó el siguiente esquema de búsqueda en la plataforma Elsevier (Science Direct, SCOPUS), evaluando y estableciendo como parámetros de búsqueda los descritos en la Tabla 1. Estos parámetros se aplicaron para identificar artículos relevantes sobre CTel en el fortalecimiento del poder aéreo y espacial, como se detalla a continuación:

Tabla 1. *Parámetros de búsqueda artículos relevantes sobre CTel en el fortalecimiento del poder aéreo y espacial*

TIPO DE FILTRO	PARÁMETRO SELECCIONADO
Filtrado por:	Citación más alta.
Primer Filtrado:	Limitado por: Área Temática. Limitado por tiempo: últimos cinco años

TIPO DE FILTRO	PARÁMETRO SELECCIONADO
Área Temática:	• Space Policy • Research Policy • Decision Sciences • Social Sciences • Business, Management and Accounting • Computer Science • Engineering • Economics, Econometrics and Finance
Periodo de Tiempo	1982-2024 para primera formula de búsqueda 2020-2024 para la segunda, tercera y cuarta formula de búsqueda.
Tipos de documentos	Artículos de Revisión. Artículos de Investigación.
Palabras Claves	• Air Power • Space Power • Defence • Science • Technology • Innovation
Tipo de Recursos.	• Journals
Formula de Búsqueda	Formula 01 Science AND tecnologiaAND innovationAND air power AND space power AND defence = resultados 09 / Utiles 05. Formula 02 science AND technology AND innovation AND air power AND defence AND = resultados 348 / Se toman los 15 articulos más relevantes. Formula 03 science AND technology AND innovation AND space power AND defence = resultados 1189 / se toman los 15 articulos más relevantes. Formula 04 (SCOPUS) science AND technology AND innovation AND defence = resultados 166
Resultados	Como algunos artículos aparecían en las cuatro formulas fórmulas de búsqueda relacionadas se consolido un total de 28 artículos que se utilizaran para el presente análisis.

Fuente: Elaboración propia.

Con los resultados obtenidos, se construyó un análisis bibliométrico y cienciométrico utilizando herramientas como VOSviewer y el sistema de análisis bibliométrico de SCOPUS, obteniendo los siguientes resultados.

6.1 Análisis de Concurrencias

Se determinó que, en los resultados obtenidos bajo los parámetros de búsqueda anteriormente relacionados, los conceptos descritos en los *keywords* y el *abstract*

de los artículos encontrados y relevantes para el presente trabajo presentaron concurrencias superiores a 5 en el software de análisis VOSviewer, estableciendo 4 clústeres de información que se detallan en la Tabla 2, que se presenta a continuación:

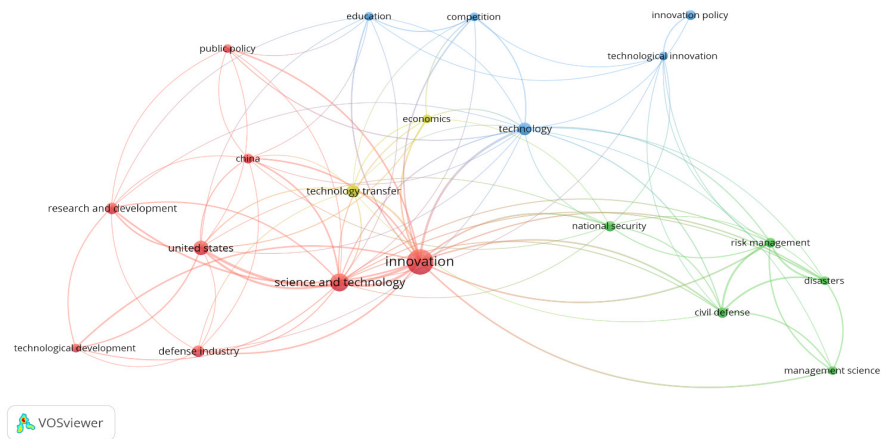
Tabla 2. *Clúster de conceptos relacionados más relevantes de la búsqueda por concurrencias*

CLÚSTER 01	CLÚSTER 02	CLÚSTER 03	CLÚSTER 04
China Concurrencias: 6 Links: 17	Defensa civil Concurrencias: 7 Links: 26	Competitividad Concurrencias: 5 Links: 12	Economía Concurrencias: 5 Links: 15
Innovación Concurrencias: 47 Links: 85	Desastres Concurrencias: 5 Links: 21	Educación Concurrencias: 5 Links: 12	Transferencia de Tecnología Concurrencias: 11 Links: 16
Política Publica Concurrencias: 5 Links: 11	Seguridad Nacional Concurrencias: 7 Links: 15	Política de innovación Concurrencias: 6 Links: 3	
Investigación y Desarrollo. Concurrencias: 9 Links: 19	Gestión del Riesgo Concurrencias: 6 Links: 25	Innovación tecnológica Concurrencias: 5 Links: 9	
Ciencia y Tecnología Concurrencias: 22 Links: 46		Tecnología Concurrencias: Links:	
Desarrollo Tecnológico Concurrencias: 5 Links: 12			
Estados Unidos Concurrencias: 14 Links: 36			

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 2 permite inferir lo siguiente: existen dos países referentes en este tipo de literatura, como lo son Estados Unidos y China. La innovación es un concepto conector entre los cuatro clústeres conceptuales descritos anteriormente, destacando conceptos relacionados con el objetivo del presente capítulo del libro, como son seguridad nacional, industria de defensa, gestión del riesgo y desarrollo tecnológico, como se describe en la Figura 1.

Figura 1. Esquema de concurrencias relevantes de VOSviewer

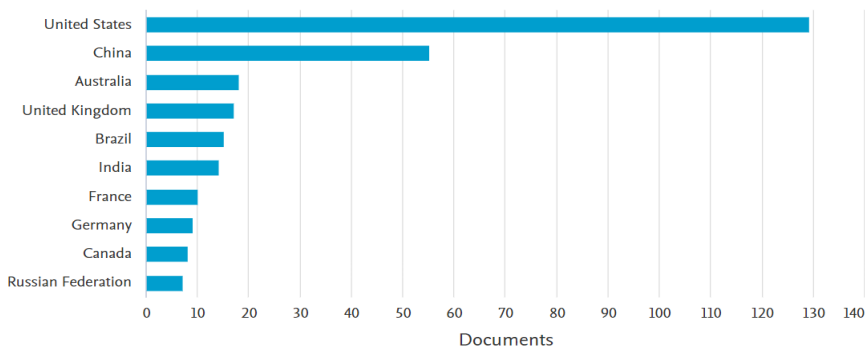


Fuente: Elaboración propia con software VOSviewer.

6.2 Análisis bibliométrico

Los países que más publican sobre el tema objeto del presente capítulo son Estados Unidos, China y Australia, por su parte, en Latinoamérica el referente es Brasil ubicado en el quinto lugar, pudiendo ser un socio importante para fortalecer estas áreas en Colombia, siendo estos los referentes en publicaciones sobre las relaciones entre ciencia, tecnología e innovación y la seguridad y defensa nacional, de acuerdo a lo establecido por la plataforma Scopus y los parámetros de búsqueda incorporados.

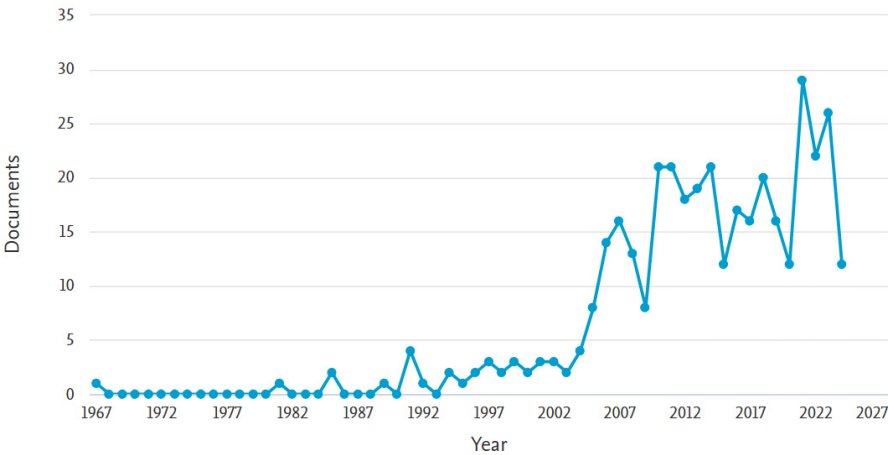
Figura 2. Países referentes en publicaciones sobre las relaciones entre ciencia, tecnología e innovación y la seguridad y defensa nacional



Fuente: Resultados búsqueda SCOPUS.

En los últimos 5 años las publicaciones sobre el tema de estudio han venido presentando una fluctuación creciente mostrando el interés de esta relación científica entre la CTel y la seguridad y defensa nacional como lo refleja la Figura 3.

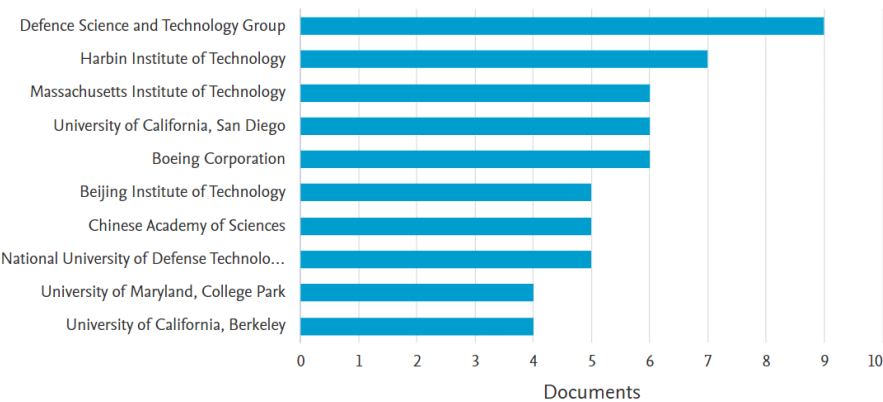
Figura 3. *Publicaciones sobre la Ciencia, tecnología e innovación y seguridad y defensa nacional*



Fuente: Resultados búsqueda SCOPUS.

Las Instituciones que más publican sobre el tema de estudio, son el Defence Science and Technology Group de Australia, el Harbin Institute of Technology de China y el Massachusetts Institute of Technology de Estados Unidos, en Latinoamérica la institución que más publicaciones presenta en Elsevier es la Universidad Federal de Fluminense en Brasil como se refleja en la Figura 4.

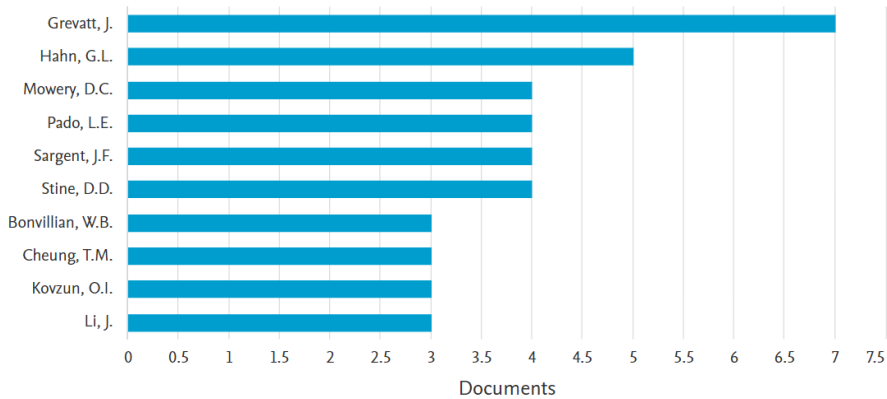
Figura 4. *Instituciones referentes en publicaciones sobre ciencia, tecnología e innovación y su relación con la seguridad y defensa nacional*



Fuente: Resultados búsqueda SCOPUS.

Los autores más relevantes por número de publicaciones, como se refleja en la Figura 5, son el doctor Jon Grevatt de Jane’s Asia-Pacific Industry de Tailandia, Gail Hahn de la compañía Boeing y David Mowery de la Universidad de Berkeley de Estados Unidos.

Figura 5. Autores más relevantes por número de publicaciones



Fuente: Resultados búsqueda SCOPUS.

Después de realizar el análisis anterior, se seleccionaron como documentos articuladores para el análisis y la construcción del capítulo, por su pertinencia y relevancia, los artículos de revisión y de investigación que se relacionan en la Tabla 3.

Tabla 3. Artículos seleccionados para el desarrollo del análisis de la Ciencia, Tecnología e Innovación y su importancia en el poder aéreo y espacial

No.	NOMBRE DEL ARTÍCULO	AÑO	NÚMERO DE IDENTIFICACIÓN DE OBJETO (DOI)
1	Facilitating public procurement of innovation in the UK defence and health sectors: Innovation intermediaries as institutional entrepreneurs	2023	https://doi.org/10.1016/j.respol.2022.104673
2	A Future US Defense Program in a Era of Great Power Competition.	2023	https://doi.org/10.1016/j.orbis.2022.12.009
3	Evaluating US defense posture in light of great power competition	2023	https://doi.org/10.1016/j.orbis.2023.06.004
4	Defense development: The role of co-creation in filling the gap between policy-makers and technology development	2022	https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2022.101913
5	Government environmental governance, structural adjustment and air quality: A quasi-natural experiment based on the Three-year Action Plan to Win the Blue Sky Defense War	2021	https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111470

No.	NOMBRE DEL ARTÍCULO	AÑO	NÚMERO DE IDENTIFICACIÓN DE OBJETO (DOI)
6	Beyond new space: Changing organizational forms, collaborative innovation and public and semi-public domains	2024	https://doi.org/10.1016/j.spacepol.2023.101609
7	Wargaming adjudication in the air-force and other military areas of education	2023	https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.909
8	Attack-defense game for critical infrastructure considering the cascade effect	2021	https://doi.org/10.1016/j.res.2021.107958
9	Affective atmospheres of weapons technologies: The case of battle drones, combat fighters and bodies in contemporary German geopolitics	2022	https://doi.org/10.1016/j.emospa.2022.100909
10	Ethics as an enabler and a constraint – Narratives on technology development and artificial intelligence in military affairs through the case of Project Maven	2023	https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2022.102193
11	Story thinking for technology foresight	2023	https://doi.org/10.1016/j.futures.2023.103098
12	The future of unmanned combat aerial vehicles: An analysis using the Three Horizons framework	2021	https://doi.org/10.1016/j.futures.2021.102848
13	The New Learning Organisation: PART II - Lessons from the Royal Norwegian Air Force Academy	2020	https://doi.org/10.1108/TLO-10-2018-0160
14	Quantum Sensing's Potential Impacts on Strategic Deterrence and Modern Warfare	2021	https://doi.org/10.1016/j.orbis.2021.03.012
15	India's Space Pursuit and the Changing Matrix of South Asian Security	2023	https://doi.org/10.1016/j.spacepol.2023.101564
16	Chinese Commercial Space Launchers: Historical Perspective; Policy Framework	2023	https://doi.org/10.1016/j.spacepol.2023.101572
17	The Prospect of Quantum Technologies in Space for Defence and Security	2023	https://doi.org/10.1016/j.spacepol.2023.101563
18	U.S. Strategic Interest in the Moon: An Assessment of Economic, National Security, and Geopolitical Drivers	2023	https://doi.org/10.1016/j.spacepol.2023.101548
19	Performance assessment on technology transition from small businesses to the U.S. Department of Defense	2022	https://doi.org/10.1016/j.seps.2021.101177
20	The main project complexity factors and their interdependencies in defence projects	2022	https://doi.org/10.1016/j.plas.2022.100050
21	Blockchain for aerospace and defense: Opportunities and open research challenges	2021	https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106982
22	Practicing secrecy in open innovation – The case of a military firm	2023	https://doi.org/10.1016/j.respol.2022.104626

No.	NOMBRE DEL ARTÍCULO	AÑO	NÚMERO DE IDENTIFICACIÓN DE OBJETO (DOI)
23	Russia in Outer Space: A Shrinking Space Power in the Era of Global Change	2022	https://doi.org/10.1016/j.spacepol.2023.101579
24	The World War II crisis innovation model: What was it, and where does it apply?	2023	https://doi.org/10.1016/j.respol.2023.104845
25	Transfer of Space Technologies in Iran: Drivers and Constraints of Success	2023	https://doi.org/10.1016/j.spacepol.2022.101518
26	The policy trajectory of dual-use technology integration governance in China: A sequential analysis of policy evolution	2023	https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2022.102175
27	Indian Space Force: A Strategic Inevitability	2023	https://doi.org/10.1016/j.spacepol.2022.101526
28	Power Dynamics in the Age of Space Commercialisation	2022	https://doi.org/10.1016/j.spacepol.2021.101472

Fuente: Elaboración propia.

7. RESULTADOS

7.1 La ciencia, tecnología e innovación como eje articulador de la defensa nacional

La ciencia y la tecnología son elementos clave para el desarrollo y la modernización de las fuerzas de defensa de una nación, permitiendo mantener y mejorar sus capacidades operativas (Linhares, 2023). Esto lleva a que la investigación y el desarrollo en áreas del conocimiento de la cuarta revolución industrial sean pilares fundamentales. Tecnologías emergentes como la inteligencia artificial, la robótica, las tecnologías cuánticas, el Internet de las Cosas y la biotecnología son esenciales para mejorar las capacidades ofensivas y defensivas, revolucionando las operaciones militares con el desarrollo de sistemas de armas avanzados, nuevas doctrinas y estrategias operativas, elementos clave para mantener la ventaja en los conflictos futuros (Gamberini y Rubin, 2021; Wayne A. Schroeder, 2023).

Esta conexión entre la CTel y la seguridad y defensa nacional cobra mayor importancia con la aparición de conceptos como el ciberespacio, un dominio crucial y transversal en la era digital, vital para proteger infraestructuras críticas de ataques y garantizar la seguridad de la información clasificada. De igual manera, el uso de tecnologías satelitales para vigilancia, detección de amenazas y coordinación ha mejorado la precisión y la eficacia en estas áreas (Linhares, 2023).

Asimismo, el desarrollo de tecnologías como el *blockchain* está revolucionando la seguridad y la transparencia en las operaciones militares, la protección de las fronteras, la gestión de la cadena de suministros, desde la fabricación hasta el uso final de los

componentes de sistemas de defensa, e incluso la gestión de drones autónomos. La tecnología *blockchain* tiene la capacidad de ofrecer registros inalterables, transparentes y seguros, lo cual es fundamental para mejorar la trazabilidad, la gestión de recursos y la coordinación en el campo de batalla. Sin embargo, para que su implementación sea efectiva, es necesario enfrentar desafíos como la latencia, la privacidad y la interoperabilidad (Ahmad et al., 2021).

Esto resalta la importancia de continuar investigando y desarrollando soluciones específicas para el sector de defensa, así como de explotar exponencialmente estas nuevas oportunidades tecnológicas. Esto lleva a que la innovación tecnológica, dirigida desde el sector defensa, permita optimizar también la logística y el equipamiento militar, desde nuevos materiales y sistemas de protección hasta sistemas logísticos automatizados, permitiendo a las fuerzas armadas operar en diversas condiciones y enfrentar diferentes amenazas.

7.1.1 La ciencia, tecnología e innovación en el fortalecimiento de la Infraestructura crítica, la interoperabilidad y la cooperación internacional

Según Linhares (2023), la interoperabilidad y la cooperación internacional se establecen como elementos esenciales para el desarrollo de operaciones conjuntas y coaliciones internacionales, facilitadas por la estandarización de las tecnologías y procedimientos militares. Esto comprende el efecto en cascada, donde un fallo en una red de activos críticos puede desencadenar una serie de fallos en otros nodos interdependientes, nacionales o internacionales, obligando a optimizar constantemente los recursos (Chaoqi et al., 2021).

De acuerdo con Chaoqi y otros (2021), las redes de infraestructura crítica, como las de transporte, comunicación y energía, son esenciales para la sociedad moderna y, por tanto, son objetivos prioritarios para ataques terroristas y militares. La protección de estas infraestructuras es crucial para mantener la seguridad nacional, requiriendo estrategias robustas y adaptativas, de acuerdo con las necesidades propias de cada nación y sus amenazas a la seguridad y defensa.

La resiliencia y la sostenibilidad de las infraestructuras críticas se presentan como aspectos clave del aporte que puede realizar la CTel, donde la protección de las cadenas de suministro, la mejora de la ciberseguridad y la capacidad de recuperación ante interrupciones son esenciales para mantener la operatividad de los sistemas de defensa y comunicación. Esto requiere el desarrollo del talento humano en el sector defensa, con programas de formación y educación continua, apoyados por la cooperación internacional, para operar y mantener sistemas complejos que sean interoperables, así como para innovar en nuevas tecnologías que permitan adaptarse a las necesidades operacionales de los posibles teatros de guerra y operaciones que puedan desarrollarse (Chaoqi et al., 2021; Linhares, 2023)

7.1.2. Necesidad de innovación abierta en el sector de seguridad y defensa

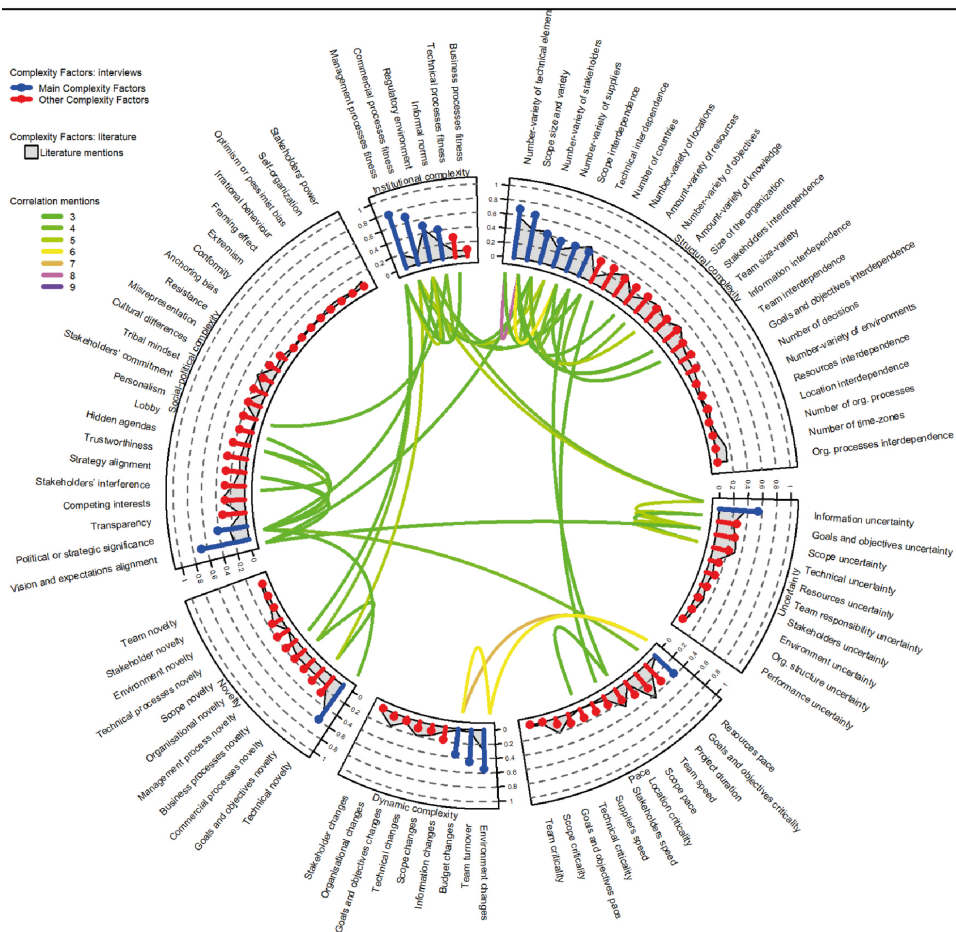
Un reto importante que debe asumirse es mejorar la interacción entre los actores del sector de seguridad y defensa para integrar conocimiento externo en los procesos internos de I+D+i, recurriendo a procesos de innovación abierta, tratando de liberar tensiones entre la necesidad de apertura para innovar y la necesidad de mantener el secreto para proteger información sensible (Langlois, BenMahmoud-Jouini, y Servajean-Hilst, 2023; Selviaridis, Hughes, and Spring, 2023a).

Se deben establecer herramientas como las planteadas por Langlois y otros (2023), que utilizan prácticas cognitivas, como el *reframing* del conocimiento, para modular la profundidad contextual de la información revelada, o el uso de actividades como el *Crowdsourcing*. Por ejemplo, se pueden ilustrar casos como el concurso de diseño de algoritmos para rastrear el movimiento de bisontes, utilizado en realidad para rastrear tropas rusas, o la colaboración con *Start Ups* para obtener conocimiento fragmentado bajo conceptos de confidencialidad, con prácticas rigurosas de protección del conocimiento, que permiten integrar nuevas tecnologías de manera segura, mantener una ventaja competitiva y asegurar la superioridad tecnológica de las fuerzas armadas.

7.1.3. Controversias éticas y complejidades de los proyectos de Defensa

Otro desafío que presentan estas nuevas tecnologías de defensa, producto de la investigación y desarrollo, son las controversias éticas que pueden generar dilemas morales asociados con el uso de tecnologías desarrolladas en el sector civil para fines militares y el potencial para aumentar la letalidad en los conflictos. Esto lleva a que la adopción de nuevas tecnologías deba considerar no solo su eficacia técnica, sino también su impacto ético y social, bajo la narrativa del “bien colectivo” (Gamberini y Rubin, 2021; Malmio, 2023).

Adicionalmente, los proyectos de defensa necesitan un enfoque que se base en ver el panorama completo y ser flexibles, en lugar de seguir métodos tradicionales. Es crucial que puedan manejar la complejidad, desarrollando capacidades para entender sistemas complejos, trabajar en equipo y gestionar el conocimiento. Además, es fundamental tener en cuenta el contexto específico de cada proyecto, ya que los factores de complejidad pueden variar mucho entre diferentes industrias y países, teniendo en cuenta factores como los descritos por de Rezende y otros (2022), donde se identificaron los principales factores complejos que afectan los proyectos de defensa (Figura 6).

Figura 6. Factores Complejos que Afectan los Proyectos de Defensa

Fuente: de Rezende et al. 2022.

Para que se presente un aporte sostenible de la CTel a la seguridad y defensa de una nación, según Gross y Sampat (2023), Meng y Wang (2023) y Sueyoshi y Ryu (2022), se debe generar una transición tecnológica en cooperación con la industria, donde se garantice que las nuevas tecnologías que se produzcan como resultados de I+D+i y que aporten a la defensa nacional, sean adquiridas por el estado, generando un flujo de conocimiento desde el sector privado al público y del público al privado, lo cual es esencial para mantener y mejorar la capacidad tecnológica y operativa de las Fuerzas Militares. Se debe comprender cómo las redes, las relaciones sociales y las pequeñas y medianas empresas influyen en el rendimiento y eficiencia de la transición tecnológica (Langlois et al., 2023).

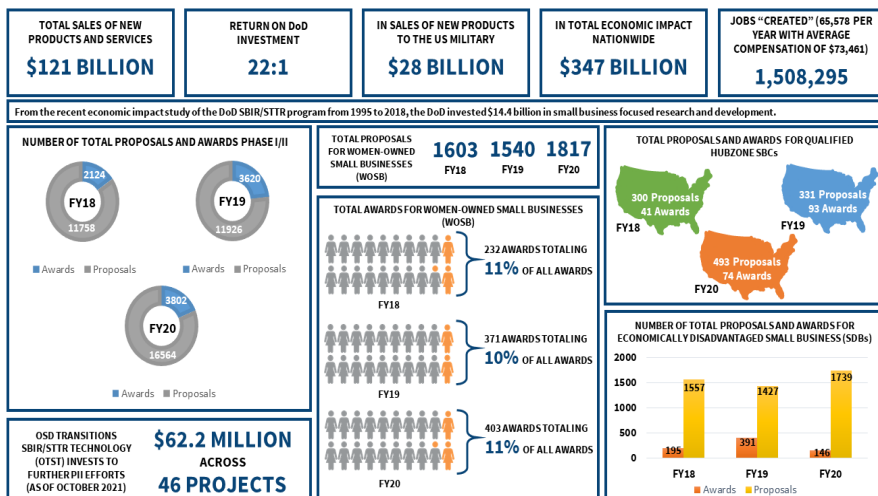
Adicionalmente, se debe fortalecer la formación y capacitación del personal militar, mejorando la preparación y adaptación a nuevas tácticas y tecnologías. Se establece que la CTel de calidad sea fundamental para asegurar el buen funcionamiento de las organizaciones de defensa, desde la protección personal hasta la logística, garantizando la preparación y la capacidad de respuesta en diversos escenarios de forma ética y moralmente responsable ante las sociedades que sirven (Chaoqi et al., 2021; Linhares, 2023).

7.2 Casos de Éxito políticas de integración de CTel y la seguridad y defensa nacional

Estados Unidos

Una demostración de cómo las políticas correctas en CTel pueden impulsar la seguridad y defensa nacional son el Programa SBIR (Small Business Innovation Research) y STTR (Small Business Technology Transfer) de Estados Unidos, que fomentan la innovación tecnológica mediante la financiación de pequeñas empresas que desarrollan tecnologías avanzadas. Estos programas, apoyados por agencias como el Departamento de Defensa (el principal contribuyente a los programas, con una inversión de 2 mil millones de dólares) (Department of Defense, 2020), aseguran que un porcentaje significativo del presupuesto de I+D se destine a la creación de tecnologías cruciales para la seguridad y defensa de EE. UU. A través de un proceso en tres fases, que va desde el desarrollo del concepto hasta la comercialización, las pequeñas empresas pueden explorar, prototipar y llevar al mercado tecnologías que satisfagan las necesidades específicas de las agencias de defensa (Selviaridis, Hughes y Spring, 2023b; Small Business Administration, 2020).

Además, los programas facilitan la colaboración entre pequeñas empresas e instituciones de investigación, acelerando la transferencia de tecnología desde el ámbito académico al comercial y fortaleciendo la capacidad tecnológica de defensa. Igualmente, la Agencia de Administración de Pequeñas Empresas proporciona supervisión y apoyo adicional mediante iniciativas como el Programa de Asociaciones de Tecnología Federal y Estatal y el Concurso de Fondos para Aceleradores de Crecimiento. Estos esfuerzos no solo impulsan la innovación y el desarrollo tecnológico, sino que también promueven un ecosistema de seguridad y defensa más inclusivo y diversificado, contribuyendo así a la estabilidad y protección nacional, y generando un impacto social y económico con la venta de nuevos productos y servicios por alrededor de 121 billones de dólares, como se refleja en la Figura 7.

Figura 7. Resultados generados por el DoD de EEUU en los programas SBIR y STTR

Fuente: (Department of Defense 2020).

China

Por otro lado, China muestra cómo debe evolucionar el marco normativo relacionado con ciencia, tecnología e innovación en el ámbito de la seguridad y defensa nacional. La gobernanza de las tecnologías militares promueve la transferencia entre los sistemas de defensa y civiles, fomentando la colaboración entre el gobierno y el sector privado. Esta estrategia no solo busca reducir los costos y riesgos técnicos en la investigación y desarrollo (I+D) de equipos militares, sino que también es esencial para el desarrollo económico del país y para asegurar que los fondos destinados a la I+D en defensa se utilicen de manera eficiente.

El análisis de la evolución de las políticas de integración de tecnologías de defensa (DTI) en China muestra que han sido influenciadas por factores internos y externos. Al principio, las agencias especializadas en defensa eran las que lideraban la emisión de políticas. Con el tiempo, se trasladaron a otros tipos de agencias, como el Ministerio de Industria e Información Tecnológica o la Comisión Nacional de Desarrollo y Reforma de China. Este cambio ha permitido una mayor estabilidad en las políticas de DTI y ha fortalecido su autoridad y ejecución. La transición de las políticas se ha centrado primero en la transformación del sistema tecnológico de defensa y luego en el sistema tecnológico civil, reflejando un enfoque progresivo en la gobernanza de DTI dual (J.-H. Meng y Wang, 2023).

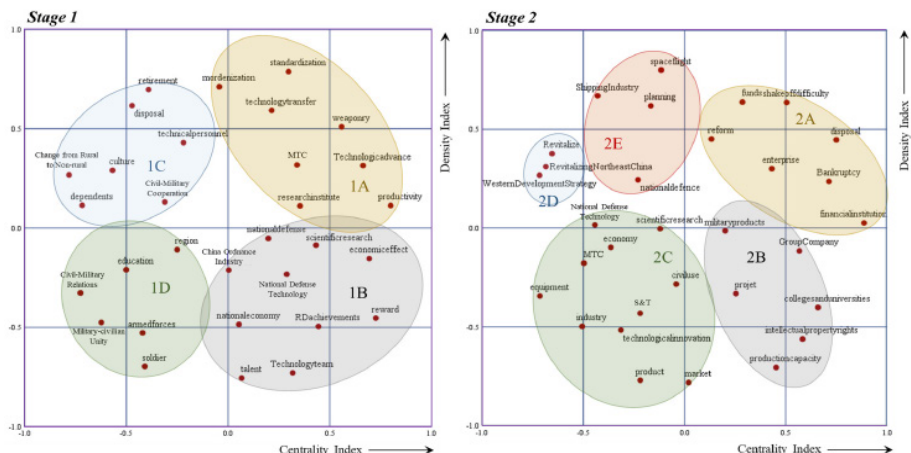
China ha implementado una variedad de instrumentos políticos, desde reglas de gestión hasta planes de desarrollo y políticas de incentivo, para facilitar esta integración. Con el tiempo, ha disminuido la proporción de políticas dirigidas a la integración de tecnología militar para usos civiles, mientras que han aumentado las políticas de transferencia de tecnología civil para usos militares. Mantener un enfoque integral

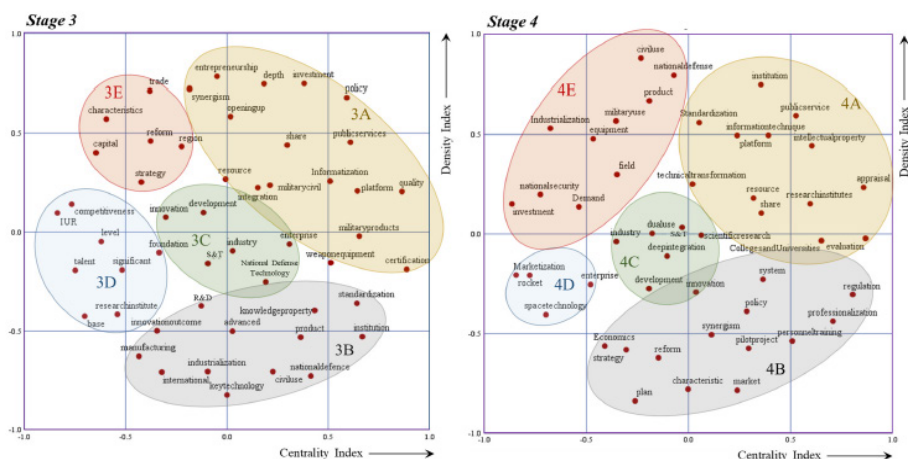
ha permitido que China desarrolle un sistema nacional de innovación integrado, mejorando y fortaleciendo su seguridad y defensa nacional (J.-H. Meng y Wang, 2023). Este proceso se desarrolló en cuatro etapas que se relacionan a continuación: en la Etapa 1 (1978-1997), China estableció las bases para integrar tecnologías de uso dual, enfocándose en aplicar tecnología militar en el ámbito civil y fortaleciendo la colaboración entre institutos de investigación y empresas militares. Además, se reconocieron logros científicos en defensa, se fomentó la colaboración entre militares y civiles, y se mejoró la situación de las familias del personal militar y jubilados. En la Etapa 2 (1998-2005), surgieron políticas clave como la reestructuración de empresas militares y la gestión de activos. También se impulsó la protección de la propiedad intelectual, la capacitación en empresas y universidades militares, la expansión del mercado tecnológico, el avance en I+D en temas aeroespaciales y marítimos, y el desarrollo científico en las regiones occidentales de China y la revitalización del noreste chino (J.-H. Meng y Wang, 2023).

En la Etapa 3 (2006-2016), se experimentó un rápido desarrollo centrado en crear plataformas de servicios para tecnologías de uso dual en áreas como fondos, información y certificación técnica. Se promovió la normalización técnica, la colaboración entre industrias, universidades e investigadores. En la Etapa 4 (2017-presente), el enfoque se trasladó a crear una red de servicios basada en la estandarización tecnológica y los derechos de propiedad intelectual. Se incluyó el desarrollo económico regional, la capacitación en universidades, el fomento del mercado de cohetes comerciales y el uso dual de tecnologías como actividad que contribuye a la seguridad nacional (J.-H. Meng y Wang, 2023).

La investigación de J.-H. Meng y Wang (2023) relaciona cada uno de los temas analizados en cada etapa, como se refleja en la Figura 8.

Figura 8. Temas desarrollados en cada etapa de evolución política de China en materia de CTeI





Fuente: J.-H. Meng and Wang (2023).

7.3 La ciencia, tecnología e innovación y el poder aéreo

En la actualidad, las fuerzas aéreas responsables de liderar el poder aéreo enfrentan condiciones de volatilidad, incertidumbre, complejidad y ambigüedad (VICA), que requieren una organización ágil y adaptable, capaz de responder rápidamente a los cambios. Esto exige un sistema educativo y de ciencia, tecnología e innovación robusto y eficiente, alineado con las necesidades modernas de competencia y eficacia militar (Antonacopoulou et al., 2020a).

La ciencia y la tecnología son fundamentales para el fortalecimiento del poder aéreo de una nación, y esto se observa claramente en la postura de defensa de Estados Unidos a lo largo de la historia, donde la tecnología ha sido parte esencial del núcleo misional de la Fuerza Aérea, impulsada por el desarrollo científico y la innovación. Iniciativas como el Consejo Asesor Científico de la USAF y estudios como New Horizons y Project Forecast resaltan la importancia perdurable de la tecnología para aprovechar el poder aéreo en beneficio de la seguridad y defensa nacional (Wayne A. Schroeder, 2023).

7.3.1 El futuro del poder aéreo

La Fuerza Aérea de los Estados Unidos, como referente global para mantener la ventaja en el poder aéreo, ha puesto en marcha programas continuos de investigación y desarrollo (I+D) que incluyen tecnologías avanzadas de Dominio Aéreo de Nueva Generación (NGAD). Estos esfuerzos se centran en el diseño de prototipos de motores adaptativos, plataformas autónomas y el desarrollo de armas hipersónicas, como el Arma de Respuesta Rápida Lanzada desde el Aire (ARRW), los Misiles de Ataque de Cruceros Hipersónicos (HACM) y capacidades de seguimiento y alerta de misiles resilientes para defenderse contra misiles hipersónicos. Estos esfuerzos tecnológicos, bajo una visión sostenida y ampliada, buscan asegurar la superioridad aérea sobre otras potencias militares en un mundo multipolar (Wayne A. Schroeder, 2023).

De manera similar, las revoluciones tecnológicas, como los materiales compuestos morfológicos que pueden cambiar de manera controlada, permiten adaptaciones dinámicas en las estructuras de los aviones, mejorando la aerodinámica, reduciendo el consumo de combustible y aumentando la maniobrabilidad durante el vuelo (Jones et al., 2022).

Asimismo, según Pereira, Lohmann y Houghton (2022) y Silfverskiöld, Andersson y Lundmark (2021), el desarrollo de tecnologías emergentes, como la inteligencia artificial, la robótica y la biotecnología, está transformando la aviación militar. Estos avances han dado lugar a sistemas de armas inteligentes y autónomos, capaces de operar en entornos complejos con mínima o ninguna intervención humana. Esto ha llevado a que el desarrollo y selección de tecnologías de manera sistémica aumenten la eficiencia operacional y se conviertan en ventajas militares tácticas y estratégicas en los teatros de operaciones.

7.3.2 El futuro de la aviación de combate

- La ciencia y la tecnología están impulsando una transformación en la aviación de combate, con los aviones de combate no tripulados emergiendo como posibles protagonistas en futuros conflictos aéreos. Los avances en inteligencia artificial (IA), autonomía y tecnologías de sensores están creando nuevas oportunidades para optimizar las capacidades operativas y reducir costos. Sin embargo, la transición hacia un sistema dominado por plataformas no tripuladas enfrentará desafíos significativos, incluidos obstáculos institucionales, culturales y políticos, así como la necesidad de asegurar la efectividad y seguridad de estos sistemas en entornos operacionales complejos (Jordan, 2021). Según Jordan (2021), el futuro de la aviación de combate puede reflejar tres posibles horizontes:
- **Horizonte 1:** Este horizonte abarca la mejora continua de las capacidades de los aviones a través de avances tecnológicos en aviación, con el uso de aviónica avanzada, sensores y sistemas de control de vuelo. Sin embargo, mantener la ventaja cualitativa de estos sistemas implica costos crecientes de adquisición y mantenimiento, lo que coloca en riesgo la utilidad estratégica de las plataformas tripuladas debido a la reducción del número de unidades disponibles (Jordan, 2021).
- **Horizonte 2:** La aviación de combate está experimentando una transición significativa con la introducción de tecnologías emergentes que crean sinergias entre plataformas tripuladas y no tripuladas. La inteligencia artificial (IA) para combate aéreo cercano ha demostrado que los sistemas autónomos pueden superar a los pilotos humanos en simulaciones de combate. Además, los avances en la autonomía de los UAV, como el reabastecimiento en vuelo y el aterrizaje en portaaviones, han fortalecido su rol en misiones de inteligencia, vigilancia, reconocimiento y combate (Jordan, 2021).
- **Horizonte 3:** El tercer horizonte presenta un futuro donde los sistemas no tripulados asumen un rol vital en misiones de combate y ataque. En este escenario, los UAV de combate habrán alcanzado un nivel de desarrollo tecnológico superior o similar al de las plataformas tripuladas en términos de rendimiento, obteniendo ventajas operativas como la eliminación de la

fatiga del piloto, mayor resistencia en maniobras extremas y menores costos de adquisición y mantenimiento. Además, la colaboración humano-máquina sería fundamental, donde los humanos se encargarían de la planificación y supervisión general, mientras que los UAV ejecutarían las misiones tácticas (Jordan, 2021).

7.3.3 La CTel en la Educación Aeronáutica

La integración de tecnologías avanzadas y prácticas educativas innovadoras puede fortalecer significativamente el poder aéreo de una nación, involucrando la ciencia, tecnología e innovación (CTel) como un régimen que transforma los métodos de entrenamiento, introduciendo tecnologías de simulación avanzada y realidad virtual para preparar a los pilotos y al personal de apoyo técnico de manera efectiva. Esto permite recrear escenarios, mejorando la preparación y la adaptabilidad del personal militar para el combate (Antonacopoulou et al., 2020b).

De igual manera, la CTel facilita el aprendizaje continuo y la adaptabilidad en un entorno de defensa en rápida evolución, altamente VICA. Además, fomenta una cultura de mejora continua y adaptación al cambio, lo que a su vez impulsa el fortalecimiento de capacidades colectivas mediante plataformas de aprendizaje digital y herramientas colaborativas, fortaleciendo las organizaciones de defensa a nivel colectivo y personal (Antonacopoulou et al., 2020b).

Un ejemplo que refleja la importancia de la ciencia y la tecnología en la educación para fortalecer el poder aéreo son los sistemas de simulación avanzados para los juegos de guerra, que permiten recopilar datos en tiempo real. Esto facilita que los docentes e instructores militares analicen el rendimiento, identifiquen áreas de mejora y ajusten las tácticas educativas para obtener retroalimentación inmediata, permitiendo el desarrollo continuo de habilidades y la optimización de las estrategias de combate aéreo (Lorusso, Gernhardt, and Novak, 2023).

7.3.4 La CTel, y el componente físico del poder aéreo

De acuerdo con la Fuerza Aérea Colombiana (2018), el componente físico del poder aéreo se refiere a “los elementos tangibles que se reflejan en el número de personas, infraestructura aeronáutica, aeronaves, industria aeronáutica, recursos económicos, logísticos y demás pertinentes y dispuestos para el uso de la aviación militar y civil del Estado” (Fuerza Aérea Colombiana, 2018, p. 52).

- Se podría intuir que el mayor aporte que realiza la ciencia, tecnología e innovación (CTel) al poder aéreo se da en su componente físico, teniendo en cuenta lo siguiente:
- El uso de nuevas tecnologías, como las simulaciones con realidad aumentada, virtual o mixta, mejora los procesos de capacitación técnica, proporcionando escenarios realistas sin los riesgos y costos del entrenamiento realizado en vivo (Liwång, 2022).
- De acuerdo con Meng y Wang (2023) y Wayne A. Schroeder (2023), la I+D+i en el diseño y desarrollo de aeronaves e infraestructura aeronáutica es crucial

- para mantener la superioridad aérea de una nación, ofreciendo capacidades mejoradas de vigilancia, reconocimiento y combate ajustadas a sus necesidades.
- Además, la CTeI beneficia el desarrollo de la industria aeronáutica mediante la transferencia tecnológica y la colaboración intersectorial, con procesos de co-creación que integran propiedades no técnicas y consideraciones sociales, optimizando el desarrollo de sistemas de defensa y la asignación de recursos de manera efectiva (Ruppert, 2022; Sueyoshi and Ryu, 2022).

7.4 La ciencia, tecnología e innovación y el poder espacial

El origen del poder espacial está determinado por las capacidades de ciencia, tecnología e innovación (CTeI) desarrolladas en el contexto de la Guerra Fría, impulsado por la contienda entre Estados Unidos y la Unión Soviética por ser potencias hegemónicas en su acceso al dominio espacial. Esto llevó a grandes inversiones en investigación y desarrollo de capacidades espaciales, generando importantes hitos en la carrera espacial, como el lanzamiento del Sputnik, la creación de la NASA, el programa Vostok, que llevó al primer hombre al espacio, y el programa Apollo, que llevó al hombre a la Luna, entre otros. Estas iniciativas desarrollaron tecnologías con aplicaciones tanto militares como civiles, abarcando la interdisciplinariedad y el desarrollo de capacidades industriales en sus países, fortaleciendo capacidades de vigilancia y reconocimiento, defensa aérea, comunicaciones, mando y control (Giraldo et al., 2023; Giraldo Martínez & Valencia Pérez, 2022; Teubal & Steinmueller, 1982).

7.4.1 La colaboración y la importancia de la integración con la industria para el desarrollo del poder espacial

La innovación colaborativa entre entidades públicas y privadas está transformando el sector espacial de defensa, liderado por un grupo de países (Figura 9) con acceso privilegiado al espacio debido a las capacidades desarrolladas en investigación, desarrollo e innovación (I+D+i). Esto se ha logrado mediante la articulación y creación de nuevas formas organizacionales que mejoran la eficiencia, la capacidad operativa y facilitan el desarrollo de infraestructura espacial robusta, al mismo tiempo que fortalecen la industria aeroespacial. Este proceso también ha facilitado la militarización del espacio, con inversiones significativas en capacidades de vigilancia espacial y guerra electrónica (Ahmed, Shoaib, & Ashraf, 2023; Heitor et al., 2024a; Secure World Foundation, 2024).

El informe “Global Counterspace Capabilities: An Open Source Assessment” de la Secure World Foundation (2024) permite evidenciar las capacidades y desarrollos contra espaciales a nivel mundial, detallando las capacidades destructivas y no destructivas de varios países en cinco categorías: ascenso directo, co-orbital, guerra electrónica, energía dirigida y cibernética, como se muestra en la Figura 9. En este contexto, Estados Unidos, Rusia, China e India se destacan por sus desarrollos avanzados en estas áreas, adoptando estrategias distintas para integrar y operar estas tecnologías en sus doctrinas de seguridad y defensa nacional (Secure World Foundation, 2024).

Por ejemplo, en el caso de Estados Unidos, entidades como la NASA, el Space Force y su flujo constante de conocimiento y recursos con la industria, a través de empresas como Blue Origin, SpaceX, Boeing, United Technologies Corporation, Arka Inc. y Lockheed

Martin, han logrado reducir los costos de producción de poner un activo en el espacio hasta en un 80%, poniendo a disposición nuevas tecnologías que se transfieren a otros sectores de la economía, generando un ciclo virtuoso basado en I+D+i (Giraldo, 2021; Giraldo et al., 2023).

Figura 9. Reporte 2024 de Activos Espaciales Países Referentes

	US	Russia	China	India	Aus.	France	Iran	Israel	Japan	North Korea	South Korea	UK
LEO Co-Orbital												
MEO/GEO Co-Orbital												
LEO Direct Ascent												
MEO/GEO Direct Ascent												
Directed Energy												
Electronic Warfare												
Space Situational Awareness												

Legend: none some significant

Fuente: Secure World Foundation (2024).

Por consiguiente, para demostrar su superioridad en el ámbito espacial, la nueva estrategia de Estados Unidos se centra en establecer una presencia sostenible en la Luna y en Marte, con el objetivo de mejorar la vigilancia y el control del espacio cercano a la Tierra, además de facilitar el uso de tecnologías clave para la seguridad y defensa nacional. Entre estas tecnologías se incluyen sistemas de navegación, comunicaciones seguras y tecnologías energéticas, esenciales para las operaciones militares modernas. Además, esta estrategia tiene implicaciones geopolíticas significativas, ya que busca mantener su liderazgo global en el espacio y competir internacionalmente por la presencia dominante en la Luna y Marte (Borowitz, Noonan, & El Ghazal, 2023; Frelk et al., 1991).

Por su parte, China, un país de concepción política comunista pero con una economía capitalista, implementó políticas que fomentan la inversión privada, el flujo de emprendedores y la colaboración entre el gobierno y el sector privado, diversificando y expandiendo su capacidad de lanzamiento espacial. Esta estrategia le permitió la entrada de nuevos actores que facilitan el desarrollo de una infraestructura espacial robusta e innovadora, con nuevos laboratorios, oficinas y líneas de producción distribuidas en varias provincias (Sénéchal-Perrouault, 2023).

Adicionalmente, India en las últimas décadas ha demostrado ser un referente importante, transformando la seguridad regional de Asia del Sur, reforzando la inversión en tecnología espacial avanzada, como satélites y sistemas de lanzamiento. Esto ha permitido a India monitorear y responder eficazmente a amenazas potenciales, además de fortalecer su posición en el dominio espacial en la región, mejorando el alcance de los misiles de su defensa antiaérea (Ahmed et al., 2023).

Esto ha llevado, según Rementeria (2022), a la redistribución del acceso al poder espacial y a la comercialización de servicios en este dominio entre varios países. Esta

redistribución ha creado oportunidades de negocio que impulsan el crecimiento económico y fortalecen la infraestructura espacial global. Estas dinámicas son direccionadas y facilitadas por la CTel, lo que permite a los países proteger sus intereses espaciales, colaborar y competir de manera más eficiente a nivel global, generando una nueva dinámica en el futuro de las actividades espaciales entre la autoridad estatal y las dinámicas del mercado.

7.4.2 Desafíos del poder Espacial

De acuerdo con los aportes de Krelina (2023), el mayor desafío que presenta el poder espacial es su adaptación a las nuevas tecnologías de la cuarta y quinta revolución industrial, especialmente con las tecnologías cuánticas que tienen el potencial de revolucionar la seguridad y defensa, transformando las operaciones espaciales de los países y ofreciendo nuevas capacidades en áreas como la comunicación, la ciberseguridad, la detección y la generación de imágenes. En las comunicaciones cuánticas se pueden desarrollar entrelazamientos para crear enlaces de comunicación extremadamente seguros, lo que se conoce como distribución de claves cuánticas (QKD), inviolable por los métodos de hacking tradicionales. Los sensores cuánticos pueden ofrecer niveles de precisión sin precedentes para medir variables físicas como la gravedad, los campos magnéticos y eléctricos, y el tiempo. Por su parte, la computación cuántica promete resolver problemas complejos mucho más rápido que las computadoras clásicas. En el contexto de la defensa espacial, esto podría incluir el análisis de grandes volúmenes de datos, la simulación de escenarios de combate y la optimización de estrategias (Krelina, 2023). Sin embargo, estas tecnologías enfrentan costos elevados de investigación y desarrollo, la necesidad de minimizar riesgos en el proceso de innovación y la creación de un marco regulatorio adecuado.

Un ejemplo de los desafíos para el desarrollo del poder espacial de un país en vías de desarrollo es Irán, que ilustra en profundidad los obstáculos que deben enfrentarse para el desarrollo tecnológico en el ámbito espacial. Irán enfrenta desafíos como la fuga de cerebros, el acceso internacional a este tipo de conocimiento e infraestructura, la ampliación de la base industrial y el soporte económico a largo plazo (Shahebrahimi et al., 2023).

En este sentido, Shahebrahimi et al. (2023) plantean que los factores impulsores para el éxito en el desarrollo espacial están enmarcados en:

- La voluntad política sostenida a largo plazo.
- La visión estratégica para el programa espacial, alineando sus objetivos espaciales con sus necesidades de seguridad nacional y desarrollo económico.

La colaboración internacional con países dispuestos a compartir su tecnología espacial es fundamental. Dentro de la organización estatal para países en vías de desarrollo, es vital la creación de una agencia espacial y centros de investigación especializados, que funcionen como articuladores del sector público y privado y aceleradores del desarrollo

tecnológico, construyendo un ecosistema de innovación. Esto permitirá impulsar experimentos críticos para alcanzar tecnologías espaciales trascendentales, lo que permitirá a los países integrarse en la cadena de valor del sector espacial, reduciendo riesgos tecnológicos y de mercado asociados con la innovación, y mejorando las comunicaciones militares, reduciendo costos operacionales e incrementando la independencia tecnológica frente a otros países. Sin embargo, esto implica asumir desafíos relacionados con el desarrollo de capacidades en CTel, apoyar la creación de industrias de alto valor agregado, y mantener políticas económicas y sociales que favorezcan la evolución y sostenibilidad de la competitividad tecnológica alineada al desarrollo espacial (Héder, 2017; Mazzucato y Robinson, 2018; Miranda, 2020; NASA, 2020; Thompson et al., 2012).

Los desafíos de la humanidad para volver a la Luna y establecer una base en Marte, con el fin de garantizar la expansión y supervivencia de la especie en otros planetas, implican el desarrollo de tecnología que requiere un proceso de colaboración internacional sin precedentes. Estos esfuerzos se enfocan en obtener resultados científicos y tecnológicos que podrían generar, en un futuro cercano, el fortalecimiento y desarrollo de nuevas capacidades para mejorar la seguridad y defensa en el dominio espacial de las naciones involucradas. Esto se logra mediante la colaboración entre entidades públicas y privadas para impulsar la innovación en el sector espacial, combinando recursos y conocimientos para desarrollar tecnologías avanzadas (Borowitz et al., 2023; Frelk et al., 1991; Heitor et al., 2024b).

8. CONCLUSIONES

Se confirmó la relación entre CTel y el fortalecimiento del poder aéreo y espacial. Asimismo, el capítulo reveló que la CTel es fundamental para la innovación en armamento, mejora de la vigilancia, el reconocimiento y la inteligencia, fortalecimiento de capacidades de respuesta y operación, así como para mejorar la calidad educativa en el marco de la seguridad y defensa de una nación.

Los documentos y autores analizados durante este capítulo indican que la ciencia, la tecnología y la innovación mejoran las capacidades militares, impulsan el crecimiento económico y la competitividad global. Se destaca la necesidad urgente de adoptar tecnologías emergentes, como la inteligencia artificial, la robótica y la biotecnología, para transformar las operaciones militares y mejorar la calidad educativa a nivel superior. Además, la colaboración entre el sector público y privado es crucial para el desarrollo de tecnologías avanzadas, mejorando las capacidades productivas de las pequeñas y medianas empresas, lo que conlleva una legitimización y aceptación pública, comprendiendo que las inversiones en CTel no solo benefician la defensa y la seguridad nacional, sino que también generan un impacto positivo en la economía. Esto se convierte también en una herramienta geopolítica para la colaboración internacional y el crecimiento económico.

Todo esto se logra a través de la co-creación entre los diferentes actores económicos del país, el fortalecimiento de las instituciones de educación superior, la creación de entornos de cooperación y creatividad, la comprensión de las perspectivas humanas en el uso de nuevas tecnologías, la construcción de equipos interdisciplinarios y la creación de una visión compartida entre todos los actores involucrados en el desarrollo de ACTIS, lo que

genera interdependencia (Gross and Sampat, 2023; Liwång, 2022; Marshall, Wilkins, and Bennett, 2023; Ruppert, 2022). Es clave interiorizar, a través de las organizaciones encargadas de la seguridad y defensa de una nación, que la innovación debe ser continua y adaptativa, ya que la adopción de tecnologías avanzadas es esencial para mantener la superioridad en el campo de batalla y enfrentar amenazas futuras.

Para maximizar el potencial de los esfuerzos para fortalecer el poder aéreo y espacial de un país, es esencial una estructura organizacional adecuada para gestionar y avanzar en iniciativas tecnológicas, bajo un liderazgo estratégico desde los niveles más altos del Estado, con injerencia en las decisiones políticas, económicas y militares. Esto garantizará que los esfuerzos en ciencia y tecnología reciban los recursos adecuados, para enfrentar desafíos tecnológicos y mantener la ventaja militar de un país frente a sus amenazas (Wayne A. Schroeder, 2023). La investigación y el desarrollo en estos campos permiten desarrollar sistemas que pueden operar en múltiples escenarios, desde la vigilancia hasta el combate aéreo directo, demostrando la versatilidad y escalabilidad del poder aéreo moderno (Ruppert, 2022).

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmad, Raja Wasim, Haya Hasan, Ibrar Yaqoob, Khaled Salah, Raja Jayaraman, and Mohammed Omar. (2021). "Blockchain for Aerospace and Defense: Opportunities and Open Research Challenges." *Computers & Industrial Engineering* 151:106982.
- Ahmed, Raja Qaiser, Muhammad Shoaib, and Ramsha Ashraf. (2023). "India's Space Pursuit and the Changing Matrix of South Asian Security." *Space Policy* 65:101564.
- Álvarez-Calderón, C. E., & Corredor-Gutiérrez C. G. (Trads.). (2020). *Mirando hacia las estrellas: una constante necesidad humana: El espacio exterior: una oportunidad infinita para Colombia*. Volumen 1. Sello Editorial ESDEG. <https://doi.org/10.25062/9789585245624>
- Álvarez-Calderón, C. E., Colmenares, S. M., Hernández Jara, J. L., y Urbina Carrero, J. L. (2019). EL PODER ESPACIAL Y LA SEGURIDAD MULTIDIMENSIONAL. En: Álvarez-Calderón, C. E., & Corredor-Gutiérrez C. G. (Trads.). *Mirando hacia las estrellas: una constante necesidad humana: El espacio exterior: una oportunidad infinita para Colombia*. (p. 21). Sello Editorial ESDEG. <https://doi.org/10.25062/9789585245624>
- Alvarez-Gayou Jurgenson, J. L. (2012). *Cómo hacer investigación cualitativa: fundamentos y metodología*.
- Antonacopoulou, E. P., Moldjord, C., Trygve J. Steiro, and Stokkeland, C. (2020a). "The New Learning Organisation: Part Ii-Lessons from the Royal Norwegian Air Force Academy." *The Learning Organization* 27(2):117–31.
- Arechavala Vargas, Ricardo. 2011. "Las Universidades y El Desarrollo de La Investigación Científica y Tecnológica En México: Una Agenda de Investigación." *Revista de La Educación Superior* 40(158):41–57.

- Baquero, Fabio. (2019). La Superioridad Aérea En El Contexto Geoestratégico Del Estado Colombiano. *Ciencia y Poder Aéreo* 14(1):66–89.
- Bijker, Wiebe E. (2005). ¿Cómo y Por Qué Es Importante La Tecnología?.
- Borowitz, Mariel, Althea Noonan, and Reem El Ghazal. 2023. US Strategic Interest in the Moon: An Assessment of Economic, National Security, and Geopolitical Drivers. *Space Policy* 101548.
- Bunge, Mario. (2013). *La Ciencia: Su Método y Su Filosofía*. 1a edición. Pamplona: Laetoli.
- Chaoqi, Fu, Gao Yangjun, Zhong Jilong, Sun Yun, Zhang Pengtao, and Wu Tao. (2021). “Attack-Defense Game for Critical Infrastructure Considering the Cascade Effect.” *Reliability Engineering & System Safety* 216:107958. doi: 10.1016/J.RESS.2021.107958.
- Coykendall, J., P. Wellener, and K. Hardin. (2022). *Aerospace and Defense Industry Outlook*. Deloitte: London, UK.
- Department of Defense. (2020). Small Business Innovation Research / Small Business Technology Transfer Department of Defense.
- Douhet, G. (2009). *The Command of the Air*. University of Alabama Press.
- Frelk, James, Willis Hawkins, Robert Jastrow, William Nierenberg, and Frederick Seitz. (1991). “New Directions in Space: A Report on the Lunar and Mars Initiatives.” *Space Policy* 7(1):51–59.
- Fuerza Aérea Colombiana. (2018). *Manual de Doctrina Básica Del Poder Aéreo, Espacial y Ciberespacial de La Fuerza Aérea Colombiana*. FAC.
- Fuerza Aérea Colombiana. (2020). *Estrategia Para El Desarrollo Aéreo y Espacial de La Fuerza Aérea Colombiana 2042*. FAC.
- Gallego, J. (2005). FUNDAMENTOS DE LA GESTION TECNOLÓGICA E INNOVACION. *TecnoLógicas*. pp. 113–31.
- Gamberini, S. J., & Lawrence, R. (2021). Quantum Sensing’s Potential Impacts on Strategic Deterrence and Modern Warfare. *Orbis* 65(2). pp. 354–68.
- 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, Santiago de Queretaro.
- Giraldo, G., Florez, J., & Escobar, J. (2023). Research, Development and Innovation Management Process to Generate Aerospace Defence Technologies. *IJIET (International Journal of Indonesian Education and Teaching)* 14:128. doi: 10.18178/ijimt.2023.14.4.949.
- Giraldo Martinez, G. A., & Valencia Pérez, L. R. (2022). The Triple Helix and Its Intervention in the Research and Development of Products for International Security and Defense. *Revista de Relaciones Internacionales, Estrategia y Seguridad* 17(1):31–46. doi: 10.18359/ries.5600.
- Gross, D. P., & Bhaven N. Sampat. (2023). The World War II Crisis Innovation Model: What Was It, and Where Does It Apply?. *Research Policy* 52(9):104845.

- Héder, Mihály. 2017. From NASA to EU: The Evolution of the TRL Scale in Public Sector Innovation. *The Innovation Journal* 22(2):1–23.
- Heitor, M., Pina e Cunha, M., Clegg, S., Sirage, E. & Oliveira, P. (2024a). Beyond New Space: Changing Organizational Forms, Collaborative Innovation and Public and Semi-Public Domains. *Space Policy*, p. 101609.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C. & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación*. México, D.F.: McGraw-Hill Education.
- Jones, M.P., Gokul G. Murali, Laurin, F., Robinson, P. & Bismarck, A. (2022). Functional Flexibility: The Potential of Morphing Composites. *Composites Science and Technology* 230:109792.
- Jordan, J. (2021). The Future of Unmanned Combat Aerial Vehicles: An Analysis Using the Three Horizons Framework. *Futures* 134:102848.
- Krelina, M. (2023). The Prospect of Quantum Technologies in Space for Defence and Security. *Space Policy* 65:101563.
- Langlois, J., BenMahmoud-Jouini, S. & Servajean-Hilst, R. (2023). “Practicing Secrecy in Open Innovation—The Case of a Military Firm.” *Research Policy* 52(1):104626.
- Lavados, I, y Ochoa, H. (1990). *Conceptos Generales de Gestión Tecnológica. Programa de Fortalecimiento de al Capacitación En Gestión y Administración de Proyectos y Programas de Ciencia y Tecnología En América Latina*. Santiago.
- Linhares, P. A. (2023). *Aerospace Power: A Brazilian Multidimensional Approach*. Air University Press.
- Liwång, H. (2022). Defense Development: The Role of Co-Creation in Filling the Gap between Policy-Makers and Technology Development. *Technology in Society* 68:101913.
- Lorusso, L., Dalibor Gernhardt, and Doris Novak. (2023). Wargaming Adjudication in the Air-Force and Other Military Areas of Education. *Transportation Research Procedia* 73. pp. 203–11.
- Malmio, Irja. (2023). Ethics as an Enabler and a Constraint—Narratives on Technology Development and Artificial Intelligence in Military Affairs through the Case of Project Maven. *Technology in Society*. 72. p. 102193.
- Marshall, H., Wilkins, H., & Bennett, L. (2023). Story Thinking for Technology Foresight. *Futures*. 146. p. 103098.
- Mazzucato, M., and Douglas K. R. Robinson. (2018). Co-Creating and Directing Innovation Ecosystems? NASA’s Changing Approach to Public-Private Partnerships in Low-Earth Orbit. *Technological Forecasting and Social Change* 136:166–77. doi: 10.1016/j.techfore.2017.03.034.
- Meng, Jia Hui, and Jian Wang. (2023). The Policy Trajectory of Dual-Use Technology Integration Governance in China: A Sequential Analysis of Policy Evolution. *Technology in Society* 72:102175. doi: 10.1016/J.TECHSOC.2022.102175.
- Miranda, D. (2020). *2020 NASA Technology Taxonomy*.

- NASA. (2020). *Nasa Strategy STEM ENGAGEMENT for Science, Technology, Engineering and Math 2020-2023*.
- OECD & Eurostat. (2018). *Oslo Manual 2018: Guidelines for Collecting, Reporting and Using Data on Innovation, 4th Edition*. OECD.
- Organización de las Naciones Unidas. (1987). “Informe de La Comisión Mundial Sobre El Medio Ambiente y El Desarrollo.”
- Pereira, Bruno Alencar, Gui Lohmann, and Luke Houghton. (2022). Technology Trajectory in Aviation: Innovations Leading to Value Creation (2000–2019). *International Journal of Innovation Studies* 6(3). p. 128–41.
- Raynaud, D. (2018). *¿Qué es la tecnología?*. Editorial Laetoli, SL.
- Rementeria, S. (2022). “Power Dynamics in the Age of Space Commercialisation.” *Space Policy* 60:101472.
- de Rezende, L. B., Denicol, J., Blackwell, P. & Kimura, H. (2022). The Main Project Complexity Factors and Their Interdependencies in Defence Projects. *Project Leadership and Society* 3:100050.
- Roldan, P. (2024). Tecnología: Qué Es, Usos y Ejemplos. *Economipedia*. Retrieved February 27, 2024 (<https://economipedia.com/definiciones/tecnologia.html>).
- Ruiz Olabuénaga, J. I.. (2012). *Metodología de la investigación cualitativa*.
- Ruppert, L.(2022). Affective Atmospheres of Weapons Technologies: The Case of Battle Drones, Combat Fighters and Bodies in Contemporary German Geopolitics. *Emotion, Space and Society* 45. p. 100909.
- Sánchez Silva, M. (2005). *La Metodología En La Investigación Cualitativa*.
- Schroeder, W. A. (2023). A Future US Defense Program in an Era of Great Power Competition. *Orbis* 67(1):85–102. doi: 10.1016/J.ORBIS.2022.12.009.
- Schroeder, W. A. (2023). Evaluating US Defense Posture in Light of Great Power Competition.” *Orbis* 67(3). pp. 389–410.
- Secure World Foundation. (2024). *G LOBAL COUNTERSPACE CAPABILITIES. 2024* pp. 19–27.
- Selviaridis, K., Hughes, A. & Spring, M. (2023a). Facilitating Public Procurement of Innovation in the UK Defence and Health Sectors: Innovation Intermediaries as Institutional Entrepreneurs. *Research Policy* 52(2). p. 104673.
- Sénéchal-Perrouault, Lucie. 2023. “Chinese Commercial Space Launchers: Historical Perspective; Policy Framework.” *Space Policy* 66:101572.
- Shahebrahimi, Shahab, Maral Mahdad, M. R. M. Aliha, and Ali Bonyadi Naeini. (2023). Transfer of Space Technologies in Iran: Drivers and Constraints of Success. *Space Policy* 64.p. 101518.
- Silfverskiöld, S., Andersson, K. & Lundmark, M. (2021). Does the Method for Military Utility Assessment of Future Technologies Provide Utility?. *Technology in Society* 67. p. 101736.
- Small Business Administration. (2020). *Leveraging America’s Seed Fund, Small Business Innovation Research (SBIR), Small Business Technology*

- Transfer (STTR)*. Retrieved June 10, 2024 (chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.sbir.gov/sites/default/files/SBA_SBIR_Overview_March2020.pdf).
- Sueyoshi, T., & Youngbo, R. (2022). Performance Assessment on Technology Transition from Small Businesses to the US Department of Defense. *Socio-Economic Planning Sciences*. 80. p. 101177.
- Teubal, M., and Steinmueller, E. (1982). Government Policy, Innovation and Economic Growth: Lessons from a Study of Satellite Communications. *Research Policy* 11(5). pp. 271–87.
- Thompson, V., Jill A. C. Hardash, Decker, B.,& Summers, R. O. (2012). *NASA (In) Novation Ecosystem: Taking Technology Innovation from Buzz to Reality*. Pp. 1–9 in. IEEE.

CAPÍTULO 2.

CARACTERIZACIÓN Y GOBERNANZA DE LOS SISTEMAS DE INNOVACIÓN EN EL MARCO DE LAS POLÍTICAS PÚBLICAS. CASO SECTOR AERONÁUTICO ANTIOQUIA

Jhon Freddy Escobar

Universidad Pontificia Bolivariana

<https://orcid.org/0000-0002-6826-6222>

Jhon.escobar@upb.edu.co

Teniente Coronel (RA) Jimmy Anderson Florez

Instituto Metropolitano de Medellín - ITM

<https://orcid.org/0000-0002-0426-1000>

jimmyflorez@itm.edu.co

Lina María Angarita Patiño

Universidad Pontificia Bolivariana

<https://orcid.org/0000-0001-5539-9651>

linamaria.angarita@upb.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

La industria aeroespacial, al igual que la de defensa, es un área altamente innovadora con elevados estándares de calidad. Debido a su avanzado nivel tecnológico, ambos sectores pueden considerarse determinantes para el desarrollo tecnológico y de innovación de un país, dado que responden a las exigencias de los mercados internacionales.

En estos sectores, la innovación, el desarrollo tecnológico y la investigación se presentan como elementos dinamizadores esenciales para el crecimiento y la transformación productiva de los países. Estos componentes son fundamentales para incrementar la competitividad y promover un desarrollo sostenible que impulse el progreso económico y social basado en el conocimiento.

En Colombia, mediante el Documento CONPES 4069 (DNP, 2021), el gobierno estableció la política que rige el Sistema de Ciencia, Tecnología e Innovación (SCTI) para el período 2022-2031. Este documento busca incrementar la capacidad en

Investigación, Desarrollo e Innovación (I+D+i) como motor de desarrollo económico y social, estableciendo una ruta para la ejecución y el trabajo coordinado entre los actores del sistema a través de actividades de Ciencia, Tecnología e Innovación (ACTI).

Además, el CONPES 4129 (DNP, 2023), correspondiente a la Política Nacional de Reindustrialización de 2023, define una política que organiza al Estado en términos de sectores, encadenamiento productivo y SCTI, en función de las capacidades productivas del país. Estos esfuerzos están orientados a responder a los cambios globales, cada vez más drásticos y rápidos debido a las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC), que agilizan procesos y transforman la educación, la producción y el desarrollo de la sociedad.

En adición a la estrategia del SCTI, se han promovido políticas orientadas a fortalecer las capacidades distintivas del país, tales como el CONPES 3975 y 3983 (DNP, 2019; DNP, 2020), que abordan la transformación digital e inteligencia artificial y el desarrollo espacial, respectivamente. Estas políticas buscan impulsar la competitividad nacional, aumentar la capacidad productiva, el valor social y el crecimiento económico mediante tecnologías de la Cuarta Revolución Industrial y las tecnologías aeroespaciales. Este enfoque se ve respaldado por la Ley 2294 de 2023 (Congreso de la República de Colombia, 2023), que expide el Plan Nacional de Desarrollo y prioriza el sector aeroespacial como un motor clave para la transformación tecnológica, estableciendo lineamientos para articular transferencias tecnológicas mediante créditos OFFSET que dinamicen la industria.

El Estado, a través de estas políticas, busca integrar a empresas, instituciones de educación superior y a la sociedad en un marco de globalización económica y desarrollo sostenible. Estas políticas están diseñadas para promover un ecosistema de innovación que surge de la interacción activa entre todos los actores y la sociedad, desempeñando un rol estratégico en la consolidación de la competitividad y productividad del país.

Este capítulo es producto de un análisis del sistema regional sectorial, específicamente del sector aeroespacial en Antioquia. En el sector aeronáutico y espacial, el fortalecimiento de la competitividad y productividad dependerá de una interacción profunda entre el Estado y sus dependencias, incluidos ministerios, la Aerocivil, la Fuerza Aérea Colombiana y las empresas del Grupo Empresarial y Social del Sector Defensa (GSED). Esta interacción debe extenderse a nivel nacional y regional, involucrando a la industria y al SCTI en cada territorio para lograr un encadenamiento efectivo con las capacidades locales.

El enfoque de estas políticas públicas es el desarrollo coordinado de la triple hélice desde el ámbito gubernamental nacional, irradiándose a las regiones a través de los sistemas regionales de innovación. Esto integra a las instituciones educativas, la capacidad industrial y las empresas públicas y privadas como pilares fundamentales para la transformación social y productiva del país. La alineación de estas políticas con los esfuerzos nacionales y regionales de fomento al emprendimiento es la base para el lanzamiento de nuevos proyectos productivos en los sectores priorizados, capitalizando las oportunidades creadas por políticas de alto nivel gubernamental.

En Antioquia, este enfoque llevó al fortalecimiento del ecosistema aeroespacial regional, impulsando la competitividad y productividad mediante una colaboración estrecha entre el Estado, las instituciones de educación superior, las empresas y

otros actores relevantes. Las perspectivas para el sector aeroespacial en la región son prometedoras, con un potencial significativo para contribuir al desarrollo tecnológico y económico de Colombia.

Palabras Clave: Clúster Aeroespacial, Desarrollo Tecnológico, Innovación, Políticas Públicas, Sistema Regional de Innovación (SRI)

2. REVISIÓN DE LA LITERATURA

La innovación, el desarrollo tecnológico y la investigación son fundamentales para transitar de una economía de bajo valor agregado a una que genere actividades industriales de mayor valor en sus procesos productivos (Lemus Delgado, 2020). La globalización y la geopolítica han transformado la producción y las relaciones internacionales, estableciendo nuevas dinámicas de poder entre los estados y el mercado global (Giacalone, 2016).

Los procesos de ciencia, tecnología e innovación (CTI) son herramientas esenciales para los Estados que buscan mejorar su estatus en el mercado mundial. El Estado actúa como un inversor de alto riesgo en el desarrollo de tecnologías y procesos de innovación, proporcionando un ambiente que permite a las empresas privadas innovar de manera más dinámica y ágil (Maya, 2013; Mazzucato, 2015, 2020). Además, el Estado facilita la creación de mercados y la transferencia tecnológica mediante políticas como la nueva política de Offset, impulsada por el Ministerio de Industria y Comercio y el Ministerio de Defensa.

En un entorno global competitivo, las empresas, industrias y organizaciones deben mejorar sus sistemas de producción y emplear procesos de innovación como herramientas estratégicas (León Serrano, 2020). La innovación se ha convertido en una base clave que permite a industrias, economías y países mantener y fortalecer su participación en el mercado (Jiménez-Navia et al., 2020; León Serrano, 2020).

Para que la innovación sea un factor estratégico, es necesaria la consolidación de los Sistemas Nacionales y Regionales de Innovación (SNI y SRI), que proporcionan el contexto adecuado para los procesos, considerando las necesidades, capacidades y características del país y la región (Canales & Cabrera, 2017; Morales et al., 2012). Un sistema nacional de innovación, según Centeno (2020) y Monroy (2006), debe ser entendido como una organización social abierta con un enfoque sistémico y una interacción activa entre sus actores. Esta sinergia requiere un adecuado nivel de integración entre todos los niveles del sistema de innovación, tanto nacional como regional. Un SRI es concebido como un sistema abierto, socialmente construido y vinculado a otros sistemas regionales, nacionales y globales, dentro de una perspectiva multinivel de gobernanza (Asheim & Coenen, 2005).

El conocimiento y las capacidades de innovación son factores clave para obtener ventajas competitivas (Linstone et al., 2013; Quintero Ramírez & Ramírez Giraldo, 2019a; Robledo Velásquez, 2020). Los SRI gestionan estos elementos a través de dos subsistemas: uno orientado a la generación de conocimiento, basado en la

infraestructura de apoyo regional, y otro centrado en la explotación del conocimiento, compuesto mayormente por empresas con características sistémicas (Escobar et al., 2016). Las organizaciones gubernamentales y las agencias de desarrollo regional actúan sobre estos subsistemas, constituyendo otro subsistema del SRI, conocido como habilitadores (Etzkowitz & Leydesdorff, 1997; Johansson, 1991).

En el sector aeroespacial y de defensa, el impacto de las tecnologías es significativo, actuando como sectores tractores de la innovación y procesos productivos de alto valor agregado (Giraldo et al., 2023; Giraldo Martínez et al., 2023). En Colombia, estos sectores se han venido desarrollando a la luz de los SRI, debido a la interrelación regional de la industria, la academia y el Estado, representado principalmente por las bases aéreas y sus necesidades logísticas específicas. Esta relación se ha concretado principalmente en regiones como el Valle del Cauca, Antioquia, Bogotá, Boyacá, el Eje Cafetero y, más recientemente, la Costa Atlántica. Cada región, con sus características propias y vocaciones específicas, podría complementarse a nivel industrial. Las regiones con mayores avances son Bogotá, Valle del Cauca y Antioquia, donde se han logrado llevar a buen término importantes proyectos para el país, y ya se cuentan con empresas y productos certificados en el sector.

Este análisis del sector aeroespacial en Antioquia destaca la importancia de una colaboración estrecha entre el Estado, las instituciones de educación superior, las empresas y otros actores relevantes. Las perspectivas para el sector aeroespacial en la región son prometedoras, con un potencial significativo para contribuir al desarrollo tecnológico y económico de Colombia.

Los agentes del SRI

La innovación es un proceso colaborativo que involucra una creciente y diversa red de actores, instituciones e individuos (OCDE, 2015), denominados agentes, que intervienen en el desarrollo y la evolución tecnológica de las regiones, con respuestas y comportamientos no conocidos a priori (Robledo Velásquez, 2013) y condicionados por factores económicos, sociales e institucionales, así como por las capacidades propias de cada territorio.

En los sistemas de innovación (SI), los flujos entre la producción y el intercambio de conocimiento no son los únicos prerequisites para la innovación; varios factores adicionales, como las políticas, la infraestructura, el financiamiento y el desarrollo de mercados, entre otros, juegan un papel importante (Klerkx & Leeuwis, 2008). Estos factores son una de las formas en que se define la gobernanza entre el sistema nacional y los sistemas regionales, a partir de políticas públicas que provienen de la nación hacia las regiones (Berry et al., 1991).

Las regiones, a su vez, a través de dichos sistemas, priorizan y gestionan necesidades que son recibidas y tramitadas por el sistema nacional, generando sinergia en el proceso. En este contexto, es importante contar con entidades del orden nacional y regional que, de manera coordinada, puedan ayudar en la formación de vínculos, facilitando la conexión entre oferentes y demandantes de información y conocimiento (Howells, 2006). Esto contribuirá a generar un ambiente de confianza y certidumbre que favorezca el aprendizaje, la creatividad y el trabajo en red (Pérez Hernández, 2009).

Según Doloreux (2002), los agentes están conformados principalmente por instituciones de educación superior (IES) y centros de investigación (generadores), empresas (explotadores), centros de desarrollo tecnológico (CDT), infraestructura de conocimiento, entidades transformadoras de conocimiento (transformadores) y la orientación política, destinada a mejorar el desempeño innovador en el SRI a través de instituciones, políticas públicas y normas que regulan su comportamiento (habilitadores). Estos agentes interactúan para desarrollar e intercambiar información, conocimiento y otros recursos necesarios para mejorar o generar nuevos productos y procesos (Torres Vargas, 2011). Esta articulación entre los agentes da sustento a la existencia de un sistema de innovación (SI), conformado por la unión de los sistemas nacionales y regionales.

Funciones de algunos de los agentes que forman parte de un SI

Los procesos de innovación y competitividad son un asunto del territorio, dado que es el entorno donde se definen, implementan y miden las políticas y acciones en términos de impacto (Consejo Privado de Competitividad, 2013). Asimismo, las relaciones y los vínculos entre los actores se encuentran inmersos en un marco socioeconómico y cultural común al territorio o la región (BID et al., 2011). Aunque los territorios presentan condiciones ventajosas debido al principio de cercanía física entre sus actores, esto no es suficiente. El desempeño del sistema depende del funcionamiento de las partes que lo componen y, sobre todo, de la manera en que están interconectadas (Montero & Morris, 1999).

Las funciones de los diferentes agentes que forman parte del SRI son:

Las instituciones de educación superior (IES): agentes generadores

Las universidades desempeñan un papel clave en el tejido social, debido a su labor en actividades de formación y docencia, investigación y vinculación con el entorno socioeconómico (D'Este et al., 2009). En Colombia, se agrupan dentro de una clasificación denominada IES, que incluye las instituciones técnicas profesionales, las instituciones universitarias o escuelas tecnológicas y las universidades (Congreso de la República de Colombia, 1992). Las IES, en el marco de los SRI, impactan al entorno mediante los generadores de conocimiento útil a través de los procesos de investigación (Castro-González et al., 2014; Gyekye et al., 2012). Las funciones de docencia y extensión les permiten establecer vínculos productivos con empresas locales para fomentar la asociatividad, la competitividad sistémica y el desarrollo regional (Dabos & Rivero, 2009a).

El incremento en la intensidad de la colaboración entre las IES y las empresas genera grandes beneficios para ambas partes, incluyendo mayor apoyo para la investigación, oportunidades para la innovación, aceleración del ritmo de transferencia tecnológica, aumento de la competitividad y, finalmente, un mayor impacto en el desarrollo económico regional (BID et al., 2011).

La empresa: agentes explotadores

Las empresas son receptoras dentro del SI, al poner en el mercado los resultados de investigación y concretar la innovación (Giraldo et al., 2023; OCDE & EUROSTAT, 2005; Schildorfer et al., 2017). La interacción de estos agentes con otras empresas

e IES puede generar una mayor productividad, nuevos productos, empleos, mayores ingresos y bienestar (OCDE, 2014a). En ocasiones, también puede ayudar a potenciar las actividades de investigación científica aplicada y la formación de capital humano avanzado por parte de las universidades e institutos de investigación (OECD & LEED, 2015).

Como parte del SI, la empresa decide hasta qué punto involucrarse en el proceso de innovación (Roa & Weintraub, 2013) y debe ser consciente de que la clave de su competitividad y supervivencia reside allí (Garay, 1998a). La disposición de una empresa para desarrollar actividades e inversiones en ciencia, tecnología e innovación (CTI) puede variar, dependiendo del segmento productivo al que pertenezca, en términos de tamaño, sector, antigüedad y origen de los capitales. Igualmente, dependerá de la sofisticación de la demanda que enfrente, de la identificación de oportunidades en los mercados en que compite, del ambiente macroeconómico y de negocios, entre otros (Chesbrough & Appleyard, 2007; OECD & LEED, 2015). En Colombia, mediante política pública, se definieron las empresas altamente innovadoras como “aquellas que demuestran la realización, de manera sistemática, de actividades conducentes a la innovación, a través de procesos establecidos, recursos asignados y resultados verificables” (DNP, 2015), con el objetivo de orientar recursos públicos y privados para potenciar esta actividad innovadora.

El gobierno y las políticas: agentes habilitadores

El objetivo de la política de innovación es facilitar el funcionamiento del SI, lo que implica una compleja interacción de oferta y demanda entre muchos actores (Colciencias, 2015; Minciencias, 2021). El sector empresarial, el sistema de educación, el sistema de financiación, la gobernanza y una serie de instituciones deben operar correctamente y estar vinculados de manera eficiente si se desea lograr un buen funcionamiento del sistema (OCDE, 2014a). Según lo anterior, además de contratar servicios y actuar como supervisor del mercado, el gobierno puede cumplir un tercer rol como facilitador y regulador del mismo. De hecho, el interés público de actuar como facilitador radica en que cataliza el proceso de innovación, lo cual es considerado un factor clave para la viabilidad económica (Klerkx & Leeuwis, 2008b).

Contexto: La industria aeroespacial nacional

La industria aeroespacial es innovadora por excelencia y atrae inversiones extranjeras directas, muchas de las cuales están orientadas a la investigación y desarrollo tecnológico (Sebasti & Alejandro, 2017). Según Rooyen (2010), la utilización de tecnología es un precepto básico en las economías para que los países puedan alcanzar el desarrollo; una industria tecnológicamente desarrollada constituye un requisito esencial para mantener la economía internacionalmente competitiva y acelerar el desarrollo económico (Quintero Ramírez & Ramírez Giraldo, 2019b).

La industria aeroespacial está compuesta por varias actividades que se caracterizan por su condición estratégica para los países (Canal & Ardanuy, 2017; Cecere et al., 2014; DANE, 2014; Insaurralde, 2016; Tsang, 2017), ya que son decisivas en la sociedad y presentan un impacto a medio y largo plazo en diversos sectores de la economía, como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. *Actividades principales y complementarias de la industria aeronáutica*

MANUFACTURA Y ENSAMBLE	SERVICIOS DE MANTENIMIENTO, REPARACIÓN Y OPERACIÓN (MRO)	ACTIVIDADES DE INGENIERÍA Y DISEÑO
Componentes de ingeniería	Turbinas y motores	Dinámica aeroespacial
Arneses y cables	Sistemas Unitarios de Poder (APU)	Sistemas de control
Componentes de sistemas de aterrizaje	Fuselajes	Dinámicas de proveeduría computacional (CFD)
Inyección y moldes de plástico	Sistemas eléctricos-electrónicos	Instrumentación
Intercambiadores de calor	Sistemas de aterrizaje	Simulación de vuelos
Maquinado de precisión	Componentes dinámicos	Técnicas de pruebas no destructivas (NDT)
Sistemas de audio y video	Hélices	Instrumentación virtual
Aislamiento en fuselajes	Cubrimientos, corrosión y protección	Procesamiento de datos e imágenes
Producción y control de software	Arreglo y rediseño de interiores	Sistemas de información de negocios especializados

Fuente: Adaptado de (Ospina, 2015).

El sector aeroespacial en Colombia ha experimentado un crecimiento continuo en los últimos 15 años, impulsado por las dinámicas establecidas en el contexto de un mundo globalizado y por las estrategias y respuestas a la demanda de bienes y servicios del sector. Dadas sus características, se convierte en un sector con una amplia y variada demanda laboral, educativa, tecnológica e investigativa, ya que requiere niveles, perfiles y conocimientos de diversas áreas del saber (Aeronáutica Civil, 2018; Aeronáutica Civil colombiana, 2019; CAF, 2017; Hardy, 1993; Hernández & Pineda García, 2018; Palop & Vicente, 1999; Pilotos, 2020; Rodríguez & Velásquez, 2013).

En 2018, el Plan Estratégico Aeronáutico 2030 Fase 1, “¿Hacia dónde debe ir la aviación en Colombia?” (Aeronáutica Civil, 2018), identificó como uno de los retos del sector aeroespacial en términos de educación la carencia de profesionales técnicos y tecnólogos necesarios para las actividades realizadas en el sector aeronáutico en Colombia. Se planteó, como herramienta para mejorar las condiciones educativas, la realización de diferentes estudios con el fin de tener claridad y emprender el desarrollo de la formación en capital humano. Entre estos estudios se incluyen la caracterización del sector, el análisis de la oferta educativa, el análisis de la demanda laboral y el diseño y catálogo de las cualificaciones. Además, se identificaron brechas en las capacidades del sistema empresarial colombiano para soportar procesos productivos o la prestación de servicios especializados al sector. En el mismo año, el foro sector aéreo 2030, “¿Hacia dónde debe ir la aviación en Colombia?”, presentó a académicos y empresarios una ruta para el desarrollo del talento humano en el sector (Aeronáutica Civil, 2018), donde se relacionan y articulan los diferentes actores involucrados en el

desarrollo del sector, las competencias genéricas y emergentes dentro de un marco guiado por la investigación, el desarrollo y la innovación.

La pandemia del COVID-19 tuvo un gran impacto en el sector aeroespacial durante 2020. Las estrategias utilizadas para mitigar los contagios y la propagación del virus, como las cuarentenas y las demás restricciones, redujeron la demanda de los servicios del sector. El transporte de pasajeros se redujo un 57,45% durante el periodo comprendido entre noviembre de 2019 y octubre de 2020, en comparación con el mismo periodo del año anterior. Por su parte, el transporte de carga decreció un 15,86% en el mismo periodo.

Este cambio ha sido drástico en el crecimiento del sector, considerando que, entre 2003 y 2017, la tasa de crecimiento de pasajeros fue dinámica, alcanzando un 10,1%. Durante el primer trimestre de 2020, se perdió 1.130 empleos debido a la reducción en el nivel de operaciones aéreas, además de una pérdida de contribución al Producto Interno Bruto de Colombia estimada en USD 550 millones. La rentabilidad en el sector se ha visto afectada y seguirá siéndolo debido a los nuevos protocolos de seguridad, las restricciones en los servicios y la desconfianza de los pasajeros.

No obstante, en 2022 y 2023, se registró una importante recuperación del sector de transporte, con cerca de 49.459.000 pasajeros movilizados desde y hacia los aeropuertos en Colombia durante 2023. Esto representa un crecimiento del 2,9% respecto a 2022, cuando se movilizaron 48.073.000 pasajeros, con un importante aumento en los pasajeros de vuelos internacionales (AEROCIVIL, 2024).

En el sector aeroespacial y de defensa, la Fuerza Aérea Colombiana (FAC) ha liderado la búsqueda de una ventaja tecnológica diferencial. Esto tiene implicaciones geopolíticas altamente relacionadas con la misión institucional y la visión de la FAC como líder regional en el sector aeroespacial. Para ello, ha desarrollado su propio sistema de innovación basado en cuatro centros de desarrollo tecnológico ubicados en Cali, Antioquia y Bogotá, que integran el sistema nacional de la FAC, pero que también se relacionan con los sistemas regionales en cada territorio.

En el documento *Towards a Competitive ST System In The Defense Sector. Case Air Force*, se plantea un diagnóstico base del sistema de CTI de la Fuerza, en el cual se destaca la necesidad de complementar el proceso institucional con una relación más intrincada con el sistema de innovación nacional. Sin embargo, como describe Nancy Mayley Pacheco O. (2014), el sector defensa ha generado importantes procesos de transferencia de tecnología y está comenzando a generar avances significativos en esta materia para el país, encaminados a la generación de recursos y capacidades.

3. METODOLOGÍA

El objetivo de este trabajo es analizar y discutir las dinámicas de los procesos de innovación en el sector aeronáutico en Antioquia, identificando los principales factores que contribuyen al éxito del Sistema Regional de Innovación (SRI) en esta región.

El enfoque metodológico se basa en la recopilación y análisis de información secundaria proveniente de diversas instituciones y fuentes relevantes. Este método permite una

comprensión integral de los procesos y actores involucrados en el SRI del sector aeronáutico en Antioquia.

Las fases del estudio son:

1. **Revisión de Literatura y Marco Teórico:** Busca establecer el marco teórico y conceptual sobre los sistemas de innovación, el rol de los CDT, bróker tecnológicos y la importancia de la colaboración entre universidad, empresa y estado, mediante un proceso bibliométrico soportado en la base de datos Scopus.
2. **Recopilación de Información Secundaria:** Orientada a obtener datos actualizados sobre las instituciones, empresas y actores clave en el sector aeronáutico en Antioquia.
3. **Desarrollo:** Se basa en analizar la información recopilada para identificar patrones, tendencias y factores críticos en el SRI de Antioquia, para ello se utiliza técnicas de análisis documental y de conversaciones con expertos.
4. **Resultados:** Se enfoca en interpretar los hallazgos del análisis de datos y discutir su implicancia para el desarrollo del SRI en Antioquia.
5. **Conclusiones:** Finaliza estructurando unas conclusiones basadas en el análisis y discusión de los resultados, y ofrecer recomendaciones prácticas para mejorar el SRI en Antioquia.

Las fuentes de Información consultadas fueron:

1. **Instituciones Educativas (IES):** Información sobre programas académicos, publicaciones y patentes.
2. **Empresas del Sector Aeronáutico:** Datos sobre proyectos, desarrollos tecnológicos y participación en el clúster CAESCOL.
3. **Entidades Gubernamentales:** Políticas, normativas y apoyo a la innovación (CONPES, Aeronáutica Civil Colombiana).
4. **Bases de Datos Académicas:** Scopus, Web of Science para identificación de publicaciones y patentes.

Limitaciones: Dependencia de la disponibilidad y calidad de la información secundaria proporcionada por las instituciones.

Posible sesgo en la interpretación de datos debido a la naturaleza cualitativa del análisis.

4. RESULTADOS

Para entender las dinámicas en los procesos de innovación, es importante reconocer las capacidades del SRI en ese territorio. En el caso de Antioquia, tal como se ha indicado, el SRI está compuesto por diversos grupos de agentes que interactúan, gestionan, compiten y colaboran. Para el caso de Antioquia y su sector, se analizaron dichos agentes con un enfoque de inventario.

Los generadores de conocimiento

El tema del capital humano es un desafío central en toda realidad territorial (nacional, regional o municipal) que busca establecer un SI exitoso para promover su propio desarrollo. La innovación depende de la capacidad de las personas para generar y aplicar conocimientos o ideas en el ámbito laboral y en la sociedad en general (OECD & LEED, 2015).

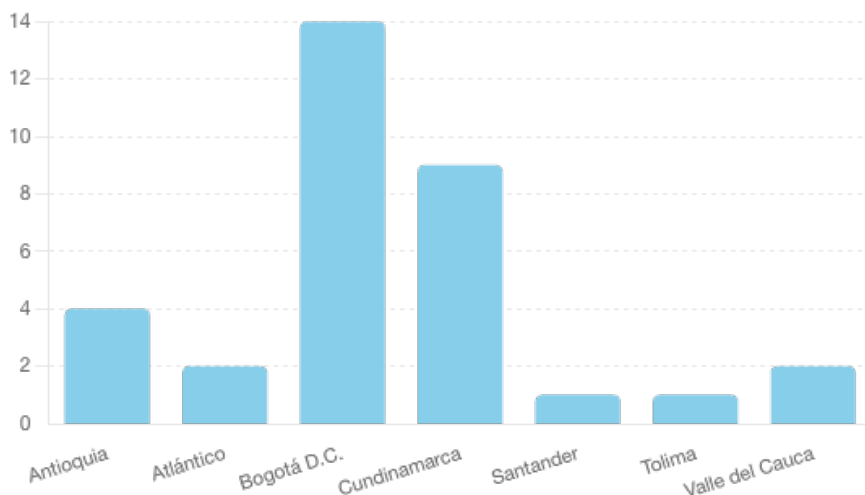
Por esta razón, las Instituciones de Educación Superior (IES) se convierten en actores clave, no solo como formadores de talentos, sino también como motores para la generación y transferencia de conocimiento y el desarrollo de innovaciones productivas. Así, las universidades innovadoras cumplen un cuarto rol, distinto a sus tradicionales funciones de docencia, investigación y extensión, construyendo entornos favorables para la innovación y estableciendo vínculos productivos con empresas locales, fomentando la asociatividad, la competitividad sistémica y el desarrollo regional (Dabos & Rivero, 2009b).

Estas universidades implementan mecanismos institucionales que impulsan la vinculación universidad-empresa, estimulando el desarrollo de innovaciones tecnológicas, la transferencia al medio productivo, la creación de nuevas empresas de base tecnológica y la atracción y retención de talento en la región (Dabos & Rivero, 2009b).

Un incremento en la intensidad de la colaboración entre universidad y empresa implica grandes beneficios para ambas partes, como mayor apoyo para la investigación, oportunidades para la innovación, aceleración del ritmo de transferencia tecnológica, aumento en la competitividad y, finalmente, un mayor impacto sobre el desarrollo económico regional. Igualmente, las universidades comprometidas con la innovación impulsan la formación de clústeres tecnológicos, donde las mismas empresas que los conforman se convierten en los principales demandantes de talento humano altamente calificado formado en las universidades, incrementando la capacidad de retención de este talento en la región (Dabos & Rivero, 2009b).

En Colombia, se reportan 20 instituciones que brindan formación en el sector aeroespacial, de las cuales, las instituciones de educación superior ofrecen programas relacionados con el sector aeroespacial, como se presenta en la Figura 1.

Figura 1. IES asociadas al sector AERO en Colombia, donde el eje Y es la frecuencia y el X los departamentos



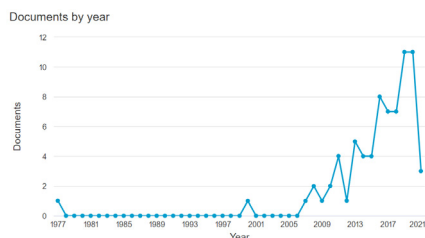
Fuente: Elaboración propia con base de datos del (MEN, 2020a).

En Antioquia se reportan instituciones con cuatro programas activos, destacando dos universidades con alto nivel investigativo y dos instituciones que ofrecen programas de pregrado y posgrado. Estas instituciones son la Institución Universitaria Pascual Bravo, el Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, la Universidad de Antioquia y la Universidad Pontificia Bolivariana. Estas entidades educativas consolidan una oferta formativa para todos los niveles y ofrecen cuatro programas específicos en la industria aeroespacial.

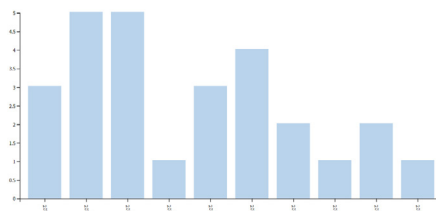
La Institución Universitaria Pascual Bravo ofrece el programa de Tecnología en Gestión del Mantenimiento Aeronáutico, el Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid ofrece Tecnología en Gestión Aeroportuaria, la Universidad de Antioquia ofrece Ingeniería Aeroespacial y la Universidad Pontificia Bolivariana ofrece Ingeniería Aeronáutica. Esta información se basa en datos del Ministerio de Educación Nacional (MEN, 2020a).

En cuanto a la generación de conocimiento, mediante una búsqueda básica en la base de datos Scopus® y Web of Science®, utilizando la ecuación -TITLE-ABS-KEY (airplane OR aeronautical) AND (LIMIT-TO (AFFILCOUNTRY, "Colombia")), se identificaron 73 artículos científicos en Scopus® y 28 en Web of Science® sobre la temática (Figura 2 a, b). Esto no implica que no existan otras publicaciones de tipo divulgativo relevantes, pero señala que la capacidad de producir conocimiento como país, y aún más como región, es marginal.

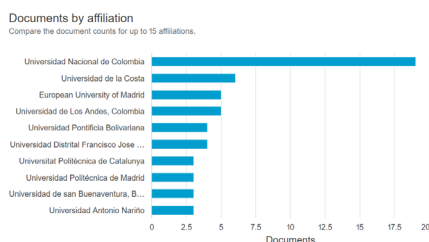
Figura 2. Resultados de la búsqueda en Scopus® y Web of Science ® de la ecuación TITLE-ABS-KEY (airplane OR aeronautical) AND (LIMIT-TO (AFFILCOUNTRY , “Colombia”))-



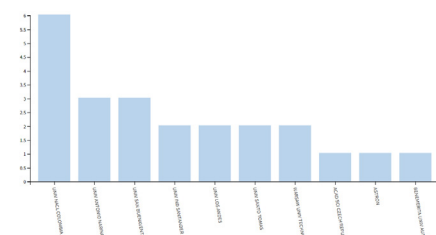
a. Reporte de productos en Scopus® por año



b. Reporte de productos en Web of Science ® por año



c. Instituciones que reportaron la producción en Web of Science ®



d. Instituciones que reportaron la producción en Web of Science ®

Fuente: Elaboración propia con base en Scopus® y Web of Science ® 2021.

La Universidad Nacional de Colombia es la institución con el mayor número de publicaciones (Figura 3 c, d), aunque no es posible identificar cuántas de ellas corresponden a la sede Medellín. Por otro lado, destaca la Universidad Pontificia Bolivariana como la institución antioqueña con aportes en este tipo de producción.

En cuanto a patentes, se identifican cinco: una de la Pontificia Universidad Javeriana, dos de la Universidad Cooperativa de Colombia y dos de carácter privado empresarial. Esto indica que la capacidad en desarrollo tecnológico, específicamente para el sector, también es marginal. Sin embargo, cabe destacar que Colombia cuenta con múltiples desarrollos que, aunque no están directamente orientados al sector aeroespacial, están dirigidos a tecnologías periféricas relacionadas.

- **Escuelas de Formación y Entrenamiento:** En Antioquia, la oferta formativa del sector aeroespacial se divide en instrucción y educación formal. Existen siete escuelas de formación, entrenamiento e instrucción, que ofrecen un total de 25 cursos disponibles. Las instituciones destacadas incluyen la Academia Antioqueña de Aviación, Halcones Escuela de Aviación, Escuela Flying, INEC, Academia de Aviación Internacional y JEC Aviation Services.

- **Instituciones de Educación Superior (IES):** En Antioquia, cinco IES ofrecen programas relacionados con el sector aeroespacial: Corporación Universitaria UNITEC, Institución Universitaria Pascual Bravo, Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, Universidad de Antioquia y Universidad Pontificia Bolivariana. Estas instituciones ofrecen un total de nueve programas académicos: siete de nivel pregrado y dos de posgrado.

Por otro lado, la oferta educativa transversal incluye diversos niveles, destacando nueve programas de doctorado, once maestrías, 21 tecnologías y 54 programas universitarios, cubriendo ampliamente las necesidades de conocimiento del sector, tal como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Oferta de formación relacionada con el sector aeronáutico en Antioquia

NIVEL	NÚMERO
Doctorado	9
Especialización universitaria	4
Formación técnica profesional	1
Maestría	11
Tecnológica	21
Universitaria	54

Fuente: Adaptado de (MEN, 2020b).

Esta oferta formativa integral permite atender casi todos los requerimientos de conocimiento para el sector aeroespacial en Antioquia, promoviendo el desarrollo y la innovación.

Explotadores de Conocimiento en el Sector Aeroespacial en Antioquia

En las economías dinámicas desde la perspectiva tecnológica, las empresas productivas (públicas y privadas, incluyendo el sector servicios) son el núcleo del sistema de innovación. La innovación emprendida por estas empresas (a menudo en un esfuerzo conjunto que implica la interacción con otras empresas y, en ocasiones, el uso de conocimiento procedente de universidades) se traduce en una mayor productividad, nuevos productos, sectores y empleos, mayores ingresos y bienestar (OCDE, 2014a; OECD et al., 2018). Asimismo, las empresas pueden ayudar a potenciar las actividades de investigación científica aplicada y la formación de capital humano avanzado por parte de las universidades e institutos de investigación (OCDE, 2014b; OECD & LEED, 2015).

La fuente más importante de innovación empresarial proviene de los propios esfuerzos de las empresas. Aunque parte del conocimiento utilizado se produzca externamente, es poco probable innovar sin interiorizar y desarrollar dicho conocimiento. Las fuentes externas de conocimiento, por lo tanto, complementan los esfuerzos internos de innovación (OCDE, 2014a; OECD et al., 2018).

Como elemento esencial del SI, la empresa decide hasta qué punto desea involucrarse en el proceso de innovación y debe ser consciente de que allí radica la clave de su competitividad y supervivencia (Garay, 1998b). En un SI empresarial débil, existe una demanda limitada de innovación por parte de los productores: las empresas que no son innovadoras tampoco exigen a sus proveedores que innoven (OCDE, 2014a; OECD et al., 2018).

La disposición de una empresa a desarrollar actividades e inversiones en ciencia, tecnología e innovación (CTI) puede variar, dependiendo del segmento productivo al que pertenezca, en términos de tamaño, sector, antigüedad y origen de los capitales, así como de la sofisticación de la demanda que enfrenta, la identificación de oportunidades en los mercados en los que compete, del ambiente macroeconómico y de negocios, entre otros (OECD & LEED, 2015). Para este ejercicio, se reportaron 222 empresas.

El gobierno y las políticas- Habilitadores

El objetivo de la política de innovación es facilitar el funcionamiento del sistema nacional de investigación e innovación, lo que implica una compleja interacción de oferta y demanda entre muchos actores. El sector empresarial, el sistema de educación, el sistema de financiación, la gobernanza y una serie de instituciones deben operar correctamente y estar vinculados de manera eficiente si se quiere lograr un buen funcionamiento del sistema (OCDE, 2014a). Según lo anterior, además de contratar servicios y actuar como supervisor del mercado, el gobierno puede cumplir un tercer rol como facilitador y regulador del mercado. De hecho, el interés público que suscita el actuar como facilitador es que este cataliza el proceso de innovación, lo cual es visto como un factor clave para la viabilidad económica (Klerkx & Leeuwis, 2008b). En Antioquia, el sistema está soportado por una amplia institucionalidad.

Los Centros de Desarrollo Tecnológico (CDT)- Como transformadores

Los Centros de Desarrollo Tecnológico (CDT) son una estrategia clave en la política de innovación, competitividad y desarrollo tecnológico, cuyo objetivo es aumentar la productividad y competitividad de los sectores productivos. Promueven una cultura de innovación empresarial basada en la cooperación y alianzas estratégicas entre empresas, universidades y otras entidades de apoyo al cambio tecnológico (Garay, 1998c). Estos centros funcionan como receptores naturales de tecnologías generadas en laboratorios básicos, facilitando su desarrollo y comercialización (Barreto Bonilla & Bermeo Andrade, 2008; Manco López et al., 2018). Sin embargo, a veces la colaboración con las universidades no es clara, generando competencia en lugar de cooperación.

Para ser efectivos, los CDT deben asegurar que sus servicios sean demandados por el sector productivo, complementando y potenciando la actividad tecnológica de sus clientes sin reemplazarla. Debe existir coherencia entre los objetivos y planes de cada CDT y los programas del Sistema Nacional de Innovación (SNI) y transferencia de tecnología (Garay, 1998c).

Debido a la complejidad de los Sistemas de Innovación (SI), se requiere contar con intermediarios que conecten los diferentes agentes del sistema (Cooke, 2011; Moncayo,

2018). Los brókeres tecnológicos facilitan la interacción entre demandantes y oferentes de tecnología, resolviendo asimetrías de información y fomentando la creación de redes entre actores heterogéneos, lo cual es esencial para el proceso de innovación (Castelblanco Gómez & Robledo Velásquez, 2016; Ruíz Castañeda et al., 2011).

Los brókeres tecnológicos son reconocidos por su neutralidad, imparcialidad e independencia, facilitando la negociación y relación entre agentes. Actúan en la “brecha de innovación”, incrementando la eficiencia de los SI y permitiendo que los investigadores y la comunidad empresarial se concentren en sus especialidades (Escobar et al., 2017; Herrera & Escobar, 2014).

En Antioquia, existe una alta concentración de empresas de metalmecánica, fundamentales para el crecimiento de la industria aeroespacial (Epicos, 2013). De las 22 capacidades analizadas por el estudio de Epicos, 19 pueden ser desarrolladas localmente, lo que implica que el 97.5% de las empresas podrían tener relación directa con el sector.

La Fuerza Aeroespacial Colombiana (FAC) ha articulado diversas empresas antioqueñas, generando resultados tangibles en piezas certificadas y proyectos relacionados con la industria aeroespacial. De esta articulación nace el Clúster Aeroespacial Colombiano (CAESCOL), liderado por el Centro de Desarrollo Tecnológico Aeroespacial para la Defensa (CETAD), ubicado en la Base Aérea – CACOM 5 en Rionegro. CAESCOL ha desarrollado cerca de 100 componentes aeronáuticos, con seis certificados por la FAC (Salazar, 2015b).

El Clúster Aeroespacial se fundó por iniciativa privada, aprovechando el potencial industrial y el Aeropuerto José María Córdova de Rionegro. Incluye a la FAC y varias empresas como Compoeestructuras S.A.S., Global Rotor S.A.S., y Dream House S.A.S., logrando representatividad nacional e internacional y generando convenios para su fortalecimiento (Salazar, 2015b, 2015a).

A pesar de los logros, la industria enfrenta desafíos como la falta de convenios formales, organización, experiencia en gestión de contratos tecnológicos y certificación. Para su crecimiento, es necesaria una articulación organizada como SRI, entendiendo los flujos de información y recursos necesarios para catalizar los procesos innovadores y aprovechar el potencial regional.

5. RESULTADOS

En Antioquia, el Sistema Regional de Innovación (SRI) está compuesto por diversos actores que interactúan, gestionan, compiten y colaboran para impulsar la innovación. Un desafío central en la promoción de la innovación es el capital humano, ya que la capacidad de las personas para generar y aplicar conocimientos impulsa el éxito del sistema. Las Instituciones de Educación Superior (IES) desempeñan un papel clave como formadoras de talento y motores de generación y transferencia de conocimiento. Estas universidades no solo cumplen funciones tradicionales de docencia, investigación y extensión, sino que también crean entornos favorables para la innovación, estableciendo vínculos productivos con empresas locales.

Las empresas productivas, tanto públicas como privadas, son el núcleo del sistema de innovación, ya que sus esfuerzos se traducen en mayor productividad y el desarrollo de nuevos productos. En Antioquia, la disposición de las empresas a desarrollar actividades de ciencia, tecnología e innovación (CTI) varía según su tamaño, sector y otras características. La región destaca por la alta concentración de empresas de metalmecánica, fundamentales para el crecimiento de la industria aeroespacial.

La Fuerza Aeroespacial Colombiana ha articulado diversas empresas antioqueñas, logrando resultados tangibles como la certificación de piezas y el desarrollo de proyectos relacionados con el sector. De esta articulación surgió el Clúster Aeroespacial Colombiano (CAESCOL), liderado por el Centro de Desarrollo Tecnológico Aeroespacial para la Defensa (CETAD). CAESCOL ha desarrollado cerca de 100 componentes aeronáuticos, consolidando su representatividad a nivel nacional e internacional.

El gobierno juega un papel preponderante como facilitador y regulador del sistema de innovación, promoviendo la colaboración entre el sector empresarial, el sistema educativo y las instituciones de financiación. En Antioquia, el sistema de innovación está respaldado por una sólida institucionalidad que busca mejorar la competitividad y el desarrollo tecnológico.

Los Centros de Desarrollo Tecnológico (CDT) tienen un rol destacado dentro de la política de innovación, competitividad y desarrollo tecnológico, promoviendo una cultura de innovación empresarial basada en la cooperación. Estos centros actúan como receptores de tecnologías generadas en laboratorios básicos, facilitando su desarrollo y comercialización. Sin embargo, en ocasiones, la colaboración con las universidades no es clara, lo que genera competencia en lugar de cooperación. Los brókeres tecnológicos desempeñan un papel fundamental, facilitando la interacción entre los demandantes y oferentes de tecnología, lo que incrementa la eficiencia del sistema de innovación.

El Clúster Aeroespacial Colombiano (CAESCOL) es un ejemplo exitoso de articulación entre empresas, gobierno y academia. Liderado por el CETAD y la Fuerza Aeroespacial Colombiana, CAESCOL ha desarrollado numerosos componentes aeronáuticos y ha establecido convenios internacionales. Además, iniciativas como el Centro Aeroespacial MRO de Avianca y los programas de sustitución de importaciones han fortalecido el sector aeroespacial en Antioquia.

Las políticas nacionales, como el CONPES 4069 y el CONPES 4129, buscan integrar a las empresas, instituciones educativas y la sociedad en un ecosistema estratégico de innovación. En Antioquia, la colaboración entre las industrias, la academia y el gobierno ha permitido aprovechar el potencial regional, fomentando el desarrollo de tecnologías de alto valor agregado y contribuyendo al crecimiento de la economía tanto regional como nacional.

6. RESULTADOS DE LA CONSOLIDACIÓN DEL SISTEMA REGIONAL DE INNOVACIÓN Y LA GOBERNANZA

Clúster Aeroespacial Colombiano CAESCOL: surgió como resultado de un esfuerzo del sector empresarial antioqueño y el Centro de Desarrollo Tecnológico Aeroespacial para la Defensa – CETAD, de la Fuerza Aérea Colombiana, con sede en la Base Aérea de Combate Número Cinco – CACOM 5 Rionegro (Antioquia), quien ha liderado el proceso de desarrollo del sector aeroespacial y aeroespacial en la región.

Durante 4 años, las empresas han logrado desarrollar cerca de 100 componentes aeroespaciales, de los cuales se tienen seis certificados por la Sección de Certificación de la Fuerza Aérea Colombiana. Se trabaja para certificar al menos 15 piezas más, antes de terminar 2015.

El Clúster Aeroespacial se fundó por iniciativa privada, como una corporación sin ánimo de lucro, en conjunto con la Fuerza Aérea Colombiana (representada por el Comando Aéreo de Combate Número Cinco – CACOM 5). Las empresas que lo conforma son: Compoestructuras S.A.S, Global Rotor S.A.S, Cima Ltda., Fulcrum S.A.S, Dream House S.A.S, Intertelco S.A.S, Rutech S.A.S, Oriontech S.A.S, Maquinamos Industrias S.A.S, MPL Aviation S.A.S, Setein S.A.S, Setimmec S.A.S, Nediari S.A.S, Comando Aéreo De Combate Número Cinco – Cacom 5.

Centro Aeronáutico de Avianca: Inaugurado el 28 de septiembre de 2016, el nuevo Centro Aeroespacial MRO (Mantenimiento, Reparación y Revisión) está ubicado en las cercanías del Aeropuerto José María Córdova, en Rionegro, Antioquia.

Este megaproyecto tuvo una inversión superior a los US \$50 millones de dólares, marcando un paso esencial para consolidar la aerolínea en el ámbito del entendimiento técnico especializado y posicionando a Colombia como una opción clave en la industria de mantenimiento aeroespacial internacional. El MRO de Avianca se ha convertido en una excelente opción para todas las aerolíneas que operan en Latinoamérica, brindando servicios de mantenimiento para sus aeronaves.

Este centro aeroespacial alberga actualmente a más de 600 técnicos e ingenieros expertos en las flotas Airbus A318, A319, A320, A321 y ATR72. Además, se encuentra en proceso de acreditación para la prestación de servicios de ingeniería y mantenimiento a las flotas Boeing 787 y Airbus A330.

El complejo de mantenimiento cuenta con una zona de talleres especializados para la reparación de componentes, así como con una infraestructura completa que incluye plataformas para el rodaje de aeronaves, oficinas, almacenes de repuestos y tres aulas de capacitación con capacidad para 25 alumnos cada una.

Programa “Sustitución de importaciones”: El CETAD ha permitido potencializar y desarrollar a empresas locales, facilitando un proceso de acercamiento a las necesidades puntuales de algunos tipos de aeronaves, cuyo mantenimiento se realiza en el CACOM 5. Así, se inicia el programa denominado “Sustitución de Importaciones”, el cual permite a cualquier empresa de la región participar en dicho proceso.

Gracias al impulso brindado por la Fuerza Aérea al sector, empresas locales se han convertido en proveedores de grandes aerolíneas como Avianca y Copa Airlines, sin dejar de participar en el mercado militar como proveedores de la Fuerza Aérea Colombiana.

Alianzas público-privadas para desarrollar el mercado local: La Agencia de Cooperación e Inversión de Medellín y el Área Metropolitana (ACI) apoya la Red Empresarial para la Manufactura de Productos de Alto Componente Tecnológico (Red de Ensamble), que nació en 2013 con el fin de generar sinergias productivas. Esta red facilita el intercambio de tecnologías, procesos productivos y proveedores, y permite enfrentar retos comunes como los tratados de libre comercio y los costos logísticos en el país.

La red está integrada por Incolmotoys Yamaha, Renault Sofasa, Haceb, Auteco, AKT y Mitsubishi Electric, que representan el 55% de la producción nacional de electrodomésticos, el 56% de los automóviles, el 66% de los ascensores y el 76% de las motocicletas, generando más de 9 mil empleos directos.

En agosto de 2016, la ACI organizó un encuentro entre la Red de Ensamble, el Metro de Medellín, el Clúster Aeroespacial, el CETAD y proveedores locales del sector aeroespacial, con el objetivo de establecer alianzas para desarrollar proveedores comunes.

Convenio UPB con el Clúster Aeroespacial Colombiano: La Universidad Pontificia Bolivariana firmó un convenio marco de cooperación con el Clúster Aeroespacial Colombiano, con el objetivo de desarrollar estrategias conjuntas para fortalecer el sector. Esta alianza permitirá a la Universidad conocer las necesidades reales de la industria y proyectarlas hacia el futuro, ajustando sus programas académicos a las demandas del sector aeronáutico nacional.

Este acuerdo busca eliminar brechas en formación y tecnología, fortalecer las alianzas con estudiantes y egresados, y proporcionar acompañamiento a la industria aeronáutica. Además, la Universidad pretende desarrollar programas ajustados a las necesidades de los empresarios del sector aeroespacial y apoyarlos en nuevos procesos de innovación, favoreciendo convenios nacionales e internacionales con otros países y clústeres regionales.

Convenio de UPB con la UABC en formación aeronáutica: La Universidad Pontificia Bolivariana firmó un convenio con la Universidad Autónoma de Baja California (UABC) para fortalecer el intercambio de información, promoviendo la cooperación profesional, docente y estudiantil, con el fin de mejorar la calidad educativa en el sector aeroespacial.

Este convenio se gestó gracias al Clúster Aeroespacial de Baja California, lo que permitió vincular la parte académica y reconocer capacidades complementarias entre Colombia y México. A través de este acuerdo, se facilitará el intercambio de tecnología, docentes, investigaciones e incluso transacciones comerciales entre las empresas de ambos países.

Feria Aeronáutica 2023 (F-AIR) en Rionegro: La F-AIR Colombia 2023, enfocada tanto en los aficionados a la aviación como en los profesionales del sector y el público en general, es el encuentro más importante de la industria aeronáutica del país y uno de los más destacados de Latinoamérica. El evento ofrece una muestra estática con más de 30 aeronaves, shows aéreos a cargo de equipos de Colombia, Estados Unidos y Brasil, una muestra comercial de productos y servicios clave en la industria civil y militar, además de conferencias especializadas.

7. CONCLUSIONES

Antioquia ha demostrado ser un ejemplo de cómo la articulación entre la triada universidad-empresa-estado puede impulsar el desarrollo del sector aeroespacial. A pesar de los desafíos, la región ha logrado avances significativos en innovación y desarrollo tecnológico. La consolidación del Sistema Regional de Innovación (SRI) y la colaboración entre los diversos actores son fundamentales para seguir avanzando

en esta dirección, aprovechando el potencial regional y contribuyendo al crecimiento económico del país.

Es necesario que el Estado colombiano, a través de sus diversas entidades, asuma el liderazgo en el desarrollo del sector aeroespacial mediante proyectos de inversión en innovación. Estos proyectos permitirán a las empresas alinearse con una hoja de ruta estratégica, diseñada en función de las capacidades regionales y nacionales de Colombia, con el objetivo de participar activamente en el desarrollo de bienes y servicios para el sector aeroespacial. Además, estos esfuerzos deben estar respaldados por una priorización basada en estudios técnicos que minimicen los riesgos de inversión y maximicen el aprovechamiento de las fortalezas y capacidades nacionales y regionales, facilitando una inserción exitosa en los mercados internacionales y nacionales del sector.

En Colombia existen diversas regiones, cada una con sus propios sistemas regionales de innovación, que cuentan con capacidades y características específicas. Sin embargo, actualmente no existe una iniciativa pública que ejerza un liderazgo real y organizado en el sector aeronáutico, lo cual es fundamental para su desarrollo y consolidación en el ámbito nacional e internacional.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AEORCIVIL. (2024). *Colombia registró histórica movilización de pasajeros por vía aérea durante el transcurso de 2023*. <https://www.aerocivil.gov.co/prensa/noticias/Pages/Colombia-registro-historica-movilizacion-de-pasajeros-por-via-aerea-durante-el-transcurso-de-2023.aspx>
- Aeronáutica Civil. (2018). Plan Estratégico Aeronáutico 2030 Fase 1 ¿Hacia dónde debe ir la aviación en Colombia? *Foto Sector Aéreo 2030.*, 83.
- Aeronáutica Civil colombiana. (2019). *PLAN ESTRATÉGICO AERONÁUTICO 2030* (Planes).
- Asheim, B. T., & Coenen, L. (2005). Knowledge bases and regional innovation systems: Comparing Nordic clusters. *Research Policy*, 34(8), 1173–1190. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2005.03.013>
- Barreto Bonilla, G., & Bermeo Andrade, H. (2008). Los CDT y las universidades en Colombia: ¿Aliados o competidores? algunas lecciones frente a la actual política de C&T. *Congreso Internacional de Gestión Tecnológica e Innovación*, 8.
- Berry, L. G., Brown, M. A., & Goel, R. K. (1991). Guidelines for successfully transferring government-sponsored innovations. *Research Policy*, 20(2), 121–143.
- BID, Llisterri, J. J., & Pietrobelli, C. (2011). *Los Sistemas De Innovación En América Latina* (J. José, C. Pietrobelli, & M. Larsson, Eds.). Banco Interamericano de Desarrollo.
- CAF. (2017). *Indicadores de Innovación tecnológica de las regiones 2017* (Indicadores de Innovación Tecnológica Por Regiones).
- Canal, J. M., & Ardanuy, M. (2017). The future textile engineers and the textile training in the Terrassa School of Industrial, Aerospace and Audiovisual Engineering of the UPC [Los futuros ingenieros textiles y la formación textil en la escuela superior de ingenierías industrial, aeroespac. *Revista de Química e Industria Textil*, 221, 47–51.

- Canales, M. U., & Cabrera, P. C. (2017). *Estado, Mercado, Academia... Y Comunidad. Una Cuádruple Hélice Para El Desarrollo Integral Y La Innovación*.
- Castelblanco Gómez, J., & Robledo Velásquez, J. (2016). Relación entre el PIB y algunos indicadores de Ciencia y Tecnología: Colombia vs. Corea del Sur. *Empresa y Territorio*, May.
- Castro-González, S., Peña-Vinces, J., Ruiz-Torres, A. J., Sosa, J. C., Castro, S., Peña, J., Ruiz, A. J., Sosa, J. C., Castro-González, S., Peña-Vinces, J., Ruiz-Torres, A. J., Sosa, J. C., Castro, S., Peña, J., Ruiz, A. J., Sosa, J. C., Castro-González, S., Peña-Vinces, J., Ruiz-Torres, A. J., ... Sosa, J. C. (2014). Estudio intrapaíses de la competitividad global desde el enfoque del doble diamante para Puerto Rico, Costa Rica y Singapur. *Investigaciones Europeas de Dirección y Economía de La Empresa*, 20(3), 122–130. <https://doi.org/10.1016/j.iedee.2013.09.001>
- Cecere, D., Giacomazzi, E., & Ingenito, A. (2014). A review on hydrogen industrial aerospace applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(20), 10731–10747. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.04.126>
- Centeno, J. P. (2020). El cambio en las políticas públicas de ciencia, tecnología e innovación: apuntes para el caso colombiano. *Saber, Ciencia y Libertad*, 15(2), 21–36. <https://doi.org/10.18041/2382-3240/saber.2020v15n2.6623>
- Chesbrough, H. W., & Appleyard, M. M. (2007). Open Innovation and Strategy. *California Management Review*, 50(1), 57–77. <https://doi.org/10.1002/sml.201000755>
- Colciencias. (2015). *Documento de Política Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación N° 1602*.
- Congreso de la República de Colombia. (1992). Ley 30 de Diciembre 28 de 1992; Por el cual se organiza el servicio público de la Educación Superior. In *Diario Oficial* (p. 26).
- Congreso de la República de Colombia. (2023). *Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026 (PND 2022-2026) Colombia, potencia mundial de la vida*.
- CONPES 4069. Política Nacional de Ciencia Tecnología e Innovación 2022-2031 (2021).
- Consejo Privado de Competitividad. (2013). *Índice departamental de Competitividad 2013* (Índice dep).
- Cooke, P. (2011). Transition regions: Regional-national eco-innovation systems and strategies. *Progress in Planning*, 76(3), 105–146. <https://doi.org/10.1016/j.progress.2011.08.002>
- Dabos, G. E., & Rivero, A. G. (2009a). *Políticas institucionales para la vinculación tecnológica: nuevos roles en la universidad innovadora*. 1–17.
- Dabos, G. E., & Rivero, A. G. (2009b). *Políticas institucionales para la vinculación tecnológica: nuevos roles en la universidad innovadora*. 1–17.
- DANE. (2014). *Ocupaciones más demandadas en el sector de las Smart Cities* (p. 8).
- DANE. (2020). *CONPES 3983. Política de Desarrollo Espacial: Condiciones Habilitantes para el Impulso de la Competitividad Nacional*. 45.
- D'Este, P., Martínez, E. C., & Molas-Gallart, J. (2009). *Documento de base para un "Manual de Indicadores de Vinculación de la universidad con el entorno socioeconómico": un marco para la discusión*. 42. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1202.2884>
- DNP. (2015). *CONPES 3834: Lineamientos de política para estimular la inversión privada en ciencia, tecnología e innovación a través de deducciones tributarias*.

- Doloreux, D. (2002). What we should know about regional systems\rof innovation. *Technology in Society*, 24(3), 243–263. [https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0160-791X\(02\)00007-6](https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0160-791X(02)00007-6)
- Epicos. (2013). *Industrial capabilities mapping analysis of Colombia´s aerospace defence and high-tech (ADHT) industry*.
- Escobar, J. F., Cardenas, M. F., Fernandez-Jardon, C. M., Bedoya, I. B., Herrera, J. F., Mosquera, J., Arroyave, J., & Argudelo, L. C. (2016). *Agentes, funciones e impactos de los sistemas regionales de innovación* (J. F. Escobar, M. F. Cardenas, & T. Editores, Eds.; 1st ed.).
- Escobar, J. F., Henao, L. J., & Herrera, J. F. (2017). Los bróker tecnológicos del AMVA (Área Metropolitana del Valle de Aburrá). *Revista Ciencias Estratégicas*, 25(38), 361–374. <https://doi.org/10.18566/rces.v25n38.a6>
- Etzkowit, H., & Leydesdorff, L. (1997). *Universities and the Global Knowledge Economy. A Triple Helix of University-Industry-Government Relations*. Pinter.
- Garay, L. J. (1998a). Colombia: estructura industrial e internacionalización 1967-1996. In *Biblioteca Virtual del Banco de la República*.
- Garay, L. J. (1998b). Colombia: estructura industrial e internacionalización 1967-1996. In *Biblioteca Virtual del Banco de la República*.
- Garay, L. J. (1998c). Colombia: estructura industrial e internacionalización 1967-1996. In *Biblioteca Virtual del Banco de la República*. <http://www.banrepultural.org/comment/reply/29538>
- Giacalone, R. (2016). Geopolítica y geoeconomía en el proceso globalizador. In *Geopolítica y geoeconomía en el proceso globalizador*. <https://doi.org/10.16925/9789587600582>
- Giraldo, G., Anderson, J., Valencia, L., & Escobar, J. (2023). Research, Development and Innovation Management Process to Generate Aerospace Defence Technologies. *International Journal of Innovation, Management and Technology*, 14(4), 128–137. <https://doi.org/10.18178/ijimt.2023.14.4.949>
- Giraldo Martinez, G. A., Flórez Zuluaga, J. A., Morante Granobles, D. F., & Escobar Soto, J. F. (2023). Economic Effects of Investment in Defense Research and Development and its Impact on Productivity in Developed Countries. *Revista Facultad de Ciencias Económicas*, 31(1), 13–29. <https://doi.org/10.18359/rfce.6223>
- Gyekye, A. B., Oseifuah, E. K., & Vukor-quarshie, G. N. K. (2012). The Impact of Research and Development on Socio-Economic Development: Perspectives from Selected Developing Economies. *Journal of Emerging Trends in Economics and Management Sciences (JETEMS)*, 3(6), 915–922.
- Hardy, R. (1993). Industrial base and the future of U.S. Aerospace power. *Comparative Strategy*, 12(3), 285–288. <https://doi.org/10.1080/01495939308402928>
- Hernández, A. E., & Pineda García, A. M. (2018). Desarrollo del Talento Humano en el Sector Aeronáutico. *FORO PLAN ESTRATÉGICO AERONÁUTICO 2018 - 2030*, 1–34.
- Herrera, J. F., & Escobar, J. F. (2014). *Los bróker tecnológicos en los sistemas regionales de innovación*. 17.
- Howells, J. (2006). Intermediation and the role of intermediaries in innovation. *Research Policy*, 35(5), 715–728. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2006.03.005>

- Insaurrealde, C. C. (2016). Modeling standard for distributed control systems: IEC 61499 from industrial automation to aerospace. *AIAA/IEEE Digital Avionics Systems Conference - Proceedings, 2016-Decem*. <https://doi.org/10.1109/DASC.2016.7777980>
- Jiménez-Navia, B., Villa-Enciso, E. M., & Bermúdez-Hernández, J. (2020). La gestión de la tecnología y la innovación en el sector defensa: resultados desde un análisis bibliométrico. *Revista Virtual Universidad Católica Del Norte*, 5821(59), 45–70. <https://doi.org/10.35575/rvucn.n59a4>
- Johansson, B. (1991). Economic networks and self-organization. In E. M. Bergman, G. Maier, & F. Tödtling (Eds.), *Regions reconsidered - Economic networks, innovation and local development in industrialised countries* (pp. 17–34). Mansell.
- Klerkx, L., & Leeuwis, C. (2008a). Matching demand and supply in the agricultural knowledge infrastructure: Experiences with innovation intermediaries. *Food Policy*, 33(3), 260–276. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2007.10.001>
- Klerkx, L., & Leeuwis, C. (2008b). Matching demand and supply in the agricultural knowledge infrastructure: Experiences with innovation intermediaries. *Food Policy*, 33(3), 260–276. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2007.10.001>
- Lemus Delgado, D. R. (2020). Vietnam: políticas públicas en ciencia, tecnología e innovación TT - Science, technology and innovation policies of Vietnam. *Estudios de Asia y África*, 55(2), 263–294.
- León Serrano, G. (2020). Repercusiones estratégicas del desarrollo tecnológico: impacto de las tecnologías emergentes en el posicionamiento estratégico de los países. In *Cuadernos de estrategia*.
- Linstone, H. a, Phillips, F. Y., Martino, J. P., Alic, J. a, Coates, J. F., Heitor, M. V, Pistorius, C. W. I., Corning, P. a, Jouvenel, H. De, Porter, A. L., Roberts, E. B., Mitchell, G. R., Beau, R., Wright, G., Cairns, G., Martelli, A., Giaoutzi, Maria; Sapoio, B., Godet, M., Durance, P., ... Schwartz, P. (2013). Strategic Foresight La Prospective Use and Misuse of Scenario Building. In *The Circle of Future Entrepreneurs* (Vol. 65, Issue 1). <https://doi.org/10.1057/9781137293503>
- Manco López, O., Pérez-Ortega, G., & Lotero Botero, J. (2018). Valoración de activos intangibles, aplicación en desarrollos de propiedad intelectual para la transferencia tecnológica. *Saber, Ciencia y Libertad*, 13(2), 116–131. <https://doi.org/10.18041/2382-3240/saber.2018v13n2.4624>
- Maya, G. (2013). Innovación, el estado asume los riesgos, el sector privado rentabiliza. *Ensayos de Economía*, 23(42), 9–11.
- Mazzucato, M. (2015). *The Entrepreneurial State*.
- Mazzucato, M. (2020). The value of everything. Making and taking in the global economy (an excerpt). *Ekonomicheskaya Sotsiologiya*, 21(5), 39–57. <https://doi.org/10.17323/1726-3247-2020-5-39-57>
- MEN. (2020a). *Sistema Nacional de Información de la Educación Superior -SNIES-*. Reporte Periódico de Indicadores de Educación.
- MEN. (2020b). *Sistema Nacional de Información de la Educación Superior -SNIES-*. Reporte Periódico de Indicadores de Educación. <https://snies.mineducacion.gov.co/consultasnies/programa#>
- Minciencias. (2021). *Documento conceptual del modelo de reconocimiento y medición de grupos de investigación e investigadores, 2021* (M601PRO4G01).

- Moncayo, E. (2018). *Propuestas para profundizar la regionalización y descentralización del Sistema Nacional de Competitividad, Ciencia, Tecnología e Innovación Separata No. 6 de 6* (ARCHIVOS DE ECONOMÍA, Issue 6).
- Monroy, S. E. (2006). Nuevas políticas y estrategias de articulación del sistema deficiencia, tecnología e innovación colombiano. *Innovar*, 16(28), 157–172.
- Montero, C., & Morris, P. (1999). *Territorio, competitividad sistémica y desarrollo endógeno: Metodología para el estudio de los Sistemas Regionales de Innovación* (U. del Bio-Bio & CEPAL, Eds.; Primera Ed).
- Morales, M., Ortiz Riaga, C., & Arias Cante, M. (2012). Determining factors in innovation processes: a quick look at the Latinamerican current situation. *Revista EAN*, 72, 148–163.
- OECD, Eurostat, & Madrid+d. (2018). *Manual de Oslo 2018* (Vol. 66). <https://doi.org/https://doi.org/10.1787/9789264304604-en>
- OCDE. (2015). Estudios Económicos de la OCDE. *Microscopy and Microanalysis*, 18(S2), 48.
- OCDE. (2014a). Estudios de la OCDE de las Politicas de Innovación. *PDF Tomado Del MINTIC*, 3 pp.
- OCDE. (2014b). Estudios de la OCDE de las Politicas de Innovación. *PDF Tomado Del MINTIC*, 3 pp.
- OCDE, & EUROSTAT. (2005). *Manual de Oslo: Guía para la recogida e interpretación de datos sobre innovación* (3rd ed.).
- OECD, & LEED. (2015). *Promoviendo Desarrollo Sistemas Locales Innovacion Caso Medellin*.
- OSPINA, F. A. S. (2015). PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BRÓKER TECNOLÓGICO DE CONOCIMIENTO, QUE FORTALEZCA LA INDUSTRIA AEROESPACIAL EN ANTIOQUIA. In *UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA* (Vol. 3, Issue 2). UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA.
- Pacheco Oviedo, N.M. (2014). *Políticas y avances en ciencia, tecnología e innovación en defensa*. Universidad Militar Nueva Granada.
- Palop, F., & Vicente, J. M. (1999). Vigilancia Tecnológica E Inteligencia Competitiva. Su Potencial Para La Empresa Española. ... *Gestión de Las Persona y ...*, 116.
- Pérez Hernández, P. (2009). Contribución de los Organismos Intermedios a la innovación en México. *Biblioteca Digital de La Asociación Latino-Iberoamericana de Gestión Tecnológica*, 1(1), 1–19.
- Pilotos, T. D. D. E. (2020). *Reglamentos Aeronáuticos de Colombia* 65.
- Quintero Ramírez, S., & Ramírez Giraldo, D. P. (2019a). *El aprendizaje en los sistemas regionales de innovación desde la perspectiva de la modelación basada en agentes* (J. C. Rodas Montoya, Ed.; Primera Ed). Editorial Universidad Pontificia Bolivariana.
- Quintero Ramírez, S., & Ramírez Giraldo, D. P. (2019b). *El aprendizaje en los sistemas regionales de innovación desde la perspectiva de la modelación basada en agentes* (J. C. Rodas Montoya, Ed.; Primera Ed). Editorial Universidad Pontificia Bolivariana.
- Roa, J., & Weintraub, J. (2013). How Innovative is Your Company's Culture? *MIT Sloan Management Review*, 54(3), 29–37.
- Robledo Velásquez, J. (2013). *Introducción a la Gestión de la Tecnología y la Innovación*. 184,190.

- Robledo Velásquez, J. (2020). *Introducción a la gestión de la tecnología y la innovación empresarial* (C. E.-F. de Minas, Ed.; Primera ed).
- Rodríguez, M., & Velásquez, D. (2013). Evolución de las capacidades de innovación en la industria colombiana: Un análisis comparativo de los resultados de las encuestas de innovación de 1996 y. *Biblioteca Digital de La Asociación*
- Rooyen, N. Van. (2010). *An investigation into the impact of revising the accounting treatment of intangible assets on information technology value perception* (Issue December). Stellenbosch University.
- Ruiz Castañeda, W. L., Quintero Ramírez, S., & Robledo Velasquez, J. (2011). Modelo conceptual para el análisis del impacto de los intermediarios en los sistemas de innovación. *Revista Educación En Ingeniería, October*, 115–125.
- Salazar, F. Andrés. (2015a). Bróker Tecnológico para el Clúster Aeroespacial Colombiano – CAESCOL. *UPB*, 1–11.
- Salazar, F. Andrés. (2015b). *Propuesta de diseño de un bróker tecnológico de conocimiento, que fortalezca la industria aeroespacial en Antioquia* [UPB]. <http://weekly.cnbnews.com/news/article.html?no=124000>
- Schildorfer, W., Aigner, W., & Hasenauer, R. (2017). *TRL and MRL of C-ITS as lessons learnt from the Austrian C-ITS Corridor ECo-AT. September 2018*, 0–12.
- Sebasti, J., & Alejandro, G. (2017). Design, Construction and Testing of a Data Transmission System for a Mid-power Rocket Model. *IEEE Aerospace Conference*.
- Torres Vargas, A. (2011). *Transferencia de tecnología y conocimiento entre centros públicos de investigación y productores agropecuarios: el papel de las instituciones intermediarias para la innovación*. 1–14.
- Tsang, D. (2017). Industrial democracy in the Chinese aerospace industry: The innovation catalyst. In *Industrial Democracy in the Chinese Aerospace Industry: The Innovation Catalyst*. Palgrave Macmillan. <https://doi.org/10.1057/978-1-137-58023-8>

CAPÍTULO 3.

PROPUESTA SISTÉMICA DE UN PROGRAMA ESPACIAL

Cesar Augusto Rodríguez Adaime

Structural Synergy SAS

Clúster Aeroespacial del Pacífico -Aerospacific

<https://orcid.org/0000-0002-4819-8939>

cesarpostdoctoral@gmail.com

Teniente Coronel Sonia Ruth Rincón Urbina

Fuerza Aeroespacial Colombiana (FAC)

Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnologías Aeroespaciales (CITAE)

<https://orcid.org/0000-0003-2628-7516>

sonia.rincon@fac.mil.co

Edwin Jairt Bastidas Bonilla

Institución Universitaria Escuela Nacional del Deporte

<https://orcid.org/0000-0002-0725-640X>

edwin_bastidas10@yahoo.es

1. INTRODUCCIÓN

Las estrategias empleadas para resolver problemas específicos del ámbito aeroespacial y desarrollar soluciones eficaces se fundamentan en heurísticas derivadas del Método Científico. Estas estrategias utilizan metodologías robustas, iterativas y recursivas que han sido validadas por organismos como la NASA (2007), JAXA (2013), INCOSE (2015), y EIA632A (2021). Sin embargo, su implementación en la Fuerza Aérea Colombiana (FAC) enfrenta limitaciones debido a la falta de personal especializado, lo cual genera una dependencia de contratos externos para alcanzar ciertos objetivos críticos del programa.

En el ámbito de la investigación espacial, existen diversas arquitecturas específicas, como aquellas empleadas en la Ingeniería de Sistemas Espaciales, las cuales incluyen estructuras globales con aplicaciones definidas en sistemas satelitales, lanzadores y plataformas de soporte en tierra. No obstante, en el contexto espacial colombiano, se identifica la necesidad de adaptar o desarrollar modelos metodológicos experimentales que aborden materiales, diseños y procesos específicos para las condiciones y objetivos nacionales, apoyados en axiomas claros que faciliten el uso de herramientas de escalabilidad en el desarrollo de capacidades propias. Si bien existen metodologías ampliamente reconocidas, como las de la NASA y la ESA, estas podrían requerir modificaciones para ajustarse a los recursos y objetivos locales (Wasson, 2012;

Robledo Asencio, Rincón Urbina, Cárdenas García, Méndez Gómez & Salek Chaves, 2023; Dallamuta & Rocha de Oliveira, 2023).

Las unidades académicas se centran en generar conocimiento mediante el desarrollo de fragmentos de metodologías diseñadas para resolver problemas específicos o proponer soluciones, apoyándose en aplicaciones matemáticas y conceptos científicos con métodos deductivos o inductivos (Rodríguez A., 2019). Sin embargo, en el contexto espacial colombiano, la implementación de estas metodologías enfrenta desafíos significativos debido a la limitada formación de recursos humanos especializados en el sector. Esta falta de personal capacitado dificulta la transferencia y adaptación de conocimientos al entorno operativo, subrayando la necesidad de programas educativos que aborden las competencias específicas requeridas para proyectos espaciales en el país.

Las unidades académicas se enfocan en generar conocimiento al abordar fragmentos de metodologías para resolver problemas o desarrollar soluciones. Estas metodologías a menudo se basan en aplicaciones matemáticas y/o conceptos científicos utilizando métodos deductivos o inductivos.

La estrategia es clave para evitar la duplicación de esfuerzos a lo largo del tiempo, y se sustenta en la implementación de una estructura marco con arquitecturas de la Ingeniería de Sistemas vinculadas a productos de un sistema escalable en capacidades y personal.

Este documento propone una estrategia sistémica para los proyectos de Ciencia, Tecnología e Innovación (CTeI) en un programa espacial. Su enfoque radica en identificar y emplear estructuras comunes que fomenten el desarrollo de los proyectos espaciales.

Para implementar la estrategia en un programa espacial, se proponen varios puntos clave basados en el modelo de Kotter, elegido por su relevancia ante los desafíos del sector. Aunque existen otros modelos de gestión del cambio, como los de Lewin y ADKAR, el enfoque de Kotter destaca por su capacidad para crear un sentido de urgencia, formar coaliciones efectivas, establecer una hoja de ruta clara, mejorar la comunicación, eliminar obstáculos, asegurar éxitos a corto plazo, adaptar la estrategia durante la implementación e integrar los cambios en la cultura organizacional. Esta estructura permite abordar las necesidades específicas del ámbito espacial, respaldada por casos de éxito en organizaciones similares, lo que refuerza su efectividad en la facilitación de cambios significativos y en la mejora del rendimiento organizacional (Kotter, 2007).

Es importante resaltar que esta propuesta es un punto de partida que requiere de un trabajo colaborativo para lograr una implementación efectiva.

Palabras clave: Systems Engineering and theory; Systems Management; Performance analysis; System analysis and design; Functional analysis.

2. REVISIÓN DE LA LITERATURA

El Diseño y Análisis de la Misión Espacial (SMAD, de sus siglas en inglés) inicia con uno o más objetivos amplios que restringen y establecen las fases del programa espacial. Su desarrollo se formaliza mediante la arquitectura de Sistemas de Ingeniería (SI), que pretende dar respuesta a las interrogantes y descubrimientos de la heurística de componentes espaciales (Wertz & Larson, 2007).

La Ingeniería de Sistemas orienta interdisciplinariamente los esfuerzos técnicos y administrativos hacia una solución de productos, y respalda las soluciones a lo largo de la vida útil del sistema. Esto incluye el rendimiento técnico, la integración de especialidades de ingeniería para el establecimiento de una arquitectura de producto y la definición de procesos de ciclo de vida de soporte que equilibran el costo, el rendimiento y los objetivos del cronograma (CMMI Product Team, 2002).

En el presente capítulo, se plantean algunos sistemas espaciales definidos en la literatura, enfocándose en aquellos más relevantes para el contexto del desarrollo experimental. En particular, se selecciona e implementa el subsistema de Estructuras y Mecanismos como método de validación de los resultados que emplea (Wertz & Larson, 2007). Este subsistema desempeña un papel crucial al proporcionar el soporte mecánico de los artefactos y facilitar su ensamble. Su diseño debe cumplir rigurosamente los requisitos del artefacto, así como asegurar una interfaz adecuada con otros sistemas. Esto incluye la definición de materiales, la realización de ensayos, las dimensiones, las fuerzas, las restricciones, la instrumentación, entre otros aspectos. La elección de Estructuras y Mecanismos se justifica por su importancia en garantizar la integridad y funcionalidad del sistema espacial en su conjunto, lo que resalta su papel central en el desarrollo de tecnologías espaciales efectivas (Sarafin, Doukas, McCandless, & Britton, 2007).

La Ingeniería de Sistemas tendrá aplicación en los elementos del Sistema Espacial, en cuatro elementos principales dentro de su esquema de desarrollo: el segmento espacial (Spacecraft), el segmento terrestre (Ground segment), el ascenso de vehículo al espacio (Space-lift) y el enlace de comunicación entre los segmentos espacial y terrestre.

2.1 Ingeniería de Sistemas (IS)

Los proyectos espaciales deben cumplir con estrictos estándares de calidad, fiabilidad y seguridad que aseguren el funcionamiento efectivo de los componentes del satélite o misión espacial. En este contexto, se analizarán los sistemas espaciales definidos en la literatura, incluyendo: 1) Sistemas de Propulsión, 2) Sistemas de Energía, 3) Sistemas de Control de Actitud, 4) Sistemas de Comunicación, 5) Sistemas de Estructuras y Mecanismos, y 6) Sistemas de Instrumentación. Estas categorías abordan actividades y prácticas que abarcan elementos de la Ingeniería de Sistemas (IS) e integran un conjunto de métodos, herramientas y procesos para el diseño y gestión de sistemas complejos. Esto incluye la integración de distintos componentes técnicos y la gestión de sus interacciones y dependencias (Elm, Goldenson, El Emam, Donatelli, & Neisa, 2008).

JAXA (2013) estudió la creación de un sistema espacial avanzado, incluyendo satélites de ensayo de próxima generación y tecnología satelital innovadora. Este estudio respalda la teoría de (Firesmith, 2009) sobre los Sistemas de Sistemas de Ingeniería (SoS), que son sistemas complejos y flexibles con características emergentes y geográficamente distribuidos que combinan sistemas preexistentes, autónomos y gobernados de manera independiente, lo que los hace tecnológicamente ambiciosos y dinámicamente evolutivos.

El inicio se basa en una estructura o arquitectura de la ingeniería de sistemas, que organiza los componentes principales y establece sus interrelaciones y funciones conjuntas para cumplir con los requisitos establecidos. Este enfoque orienta tanto el diseño como la evolución del sistema. Dado que la secuencia lógica de la arquitectura requiere ajustes continuos, el diseño de sistemas de información debe permitir la escalabilidad (Tabla 1) (Firesmith, 2009).

Tabla 1. *Diferencias entre Arquitectura y Diseño de la IS*

ARQUITECTURA	DISEÑO
Difusivo (Múltiples componentes)	Local (único componente)
Decisiones e invenciones estratégicas	Decisiones e invenciones tácticas
Sistemas de Alto Nivel	Sistemas de Bajo Nivel
Alto impacto en calidad, costo y cronograma	Bajo impacto en calidad, costo y cronograma
Determina el diseño e integración de ensayos	Determina la implementación y ensayo de la unidad
Determinado por requisitos y arquitectura de Alto Nivel	Dirigido por requisitos, arquitectura y diseño de Alto Nivel
Refleja el desarrollo de Alto Nivel de la organización del equipo (Leyes de Conway)	Sin impacto en el Alto Nivel de desarrollo de la organización del equipo

Fuente: (Firesmith, 2009).

El Método Marco para Arquitecturas de Ingeniería de Sistemas (MFESA) define la IS como decisiones estratégicas, invenciones y suposiciones clave orientadas a cumplir requisitos específicos. Este enfoque abarca estructuras lógicas y físicas, decisiones de arquitectura, y aspectos como el cumplimiento de requisitos de calidad y datos, estilos de arquitectura, y mecanismos de reúso y construcción (Firesmith, 2009).

El limitado conocimiento sobre las causas y consecuencias de fallos, como la explosión de un cohete o la caída de un artefacto en vuelo, implica una alta complejidad e interdisciplinariedad. Por ello, es esencial clasificar estos fallos en subsistemas específicos que aborden responsabilidades, personal, objetivos, actividades y entregables, lo que facilita el análisis del número de fallos y su impacto en el desarrollo del proyecto. La criticidad de los sistemas espaciales, debido a su elevado costo y la complejidad de los fallos potenciales, requiere metodologías que permitan gestionar esta clasificación y facilitar el avance a través de las fases de desarrollo y seguimiento. Estas metodologías, integradas en la arquitectura del marco de procesos, son fundamentales para garantizar la calidad y redundancia en el diseño, satisfacer las necesidades de la organización y gestionar la complejidad del proyecto de manera efectiva (Firesmith, 2009).

2.2 Modelos Metodológicos de la Ingeniería de Sistemas (IS)

Las estrategias heurísticas en la IS emplean diversos modelos metodológicos basados en normativas como (EIA632A, 2021), (INCOSE, 2015), (NASA, 2007), (JAXA, 2013), entre otras como US Army FM 770-78, USAF AFSCM 375-5, MIL-STD-499, ISO/IEC 26702-2005, y IEEE 1220-2005. Estas metodologías abordan la administración de procesos, proyectos, soporte y áreas de ingeniería de procesos (Wasson, 2012), (CMMI Product Team, 2002). No obstante, enfrentan desafíos como el aumento en tamaño y complejidad de los sistemas, problemas con componentes arquitectónicos, interfaces de interoperabilidad, y aspectos de calidad y mantenimiento del sistema (Firesmith, 2009).

El Departamento de Defensa de los Estados Unidos (DoD) y el Comité de IS de la Asociación Industrial de Defensa Nacional (NDIA) desarrollaron los Modelos de Madurez de Capacidad (CMM) y los Modelos de Madurez de Integración de Capacidades (CMMI) como guías para la mejora de procesos organizacionales, estableciendo objetivos, prioridades y marcos para procesos maduros y estables (CMMI Product Team, 2002). En línea con el modelo CMMI, el comité de expertos del SI define productos de trabajo, como documentos y especificaciones, como resultados clave de las prácticas necesarias para alcanzar los objetivos organizacionales, destacando aquellos con mayor impacto en el proyecto (Elm, Goldenson, El Emam, Donatelli, & Neisa, 2008).

2.3 Análisis y Diseño de Misiones Espaciales (SMAD)

El diseño de una misión se fundamenta en cómo la definición de requisitos guía la formulación de soluciones, basadas en una teoría que proporcione la base para la implementación y desarrollo de la misión. La Tabla 2 ilustra cómo estos requisitos se estructuran para garantizar que el diseño sea efectivo y viable, asegurando el alineamiento con los objetivos y necesidades del proyecto (Wertz & Larson, 2007) (Rodríguez-Pirateque, Sofrony E., Cortés G., & Rueda, 2020, p. 146).

Tabla 2. *Diseño de una misión espacial en cuatro pasos según SMAD*

PASO	SUBPASO	DESCRIPCIÓN
1. Definir objetivos	a. Definir objetivos generales y limitaciones	Establecer los objetivos generales de la misión y las restricciones asociadas.
	b. Estimar necesidades y requisitos cuantitativos	Evaluar las necesidades y requerimientos cuantitativos necesarios para la misión.
2. Caracterizar la misión	a. Definir conceptos alternativos de misión	Identificar diferentes enfoques y conceptos posibles para la misión.
	b. Definir arquitecturas alternativas de misión	Desarrollar diversas estructuras y configuraciones posibles para la misión.
	c. Identificar los controladores del sistema	Identificar los factores clave que influirán en el sistema de la misión.

PASO	SUBPASO	DESCRIPCIÓN
2. Caracterizar la misión	d. Caracterizar conceptos y arquitecturas de misión	Detallar los conceptos y estructuras identificadas para la misión espacial.
	a. Identificar requisitos críticos	Identificar los requisitos esenciales y cruciales para el éxito de la misión.
3. Evaluar la misión	b. Evaluar la utilidad de la misión	Evaluar la relevancia y utilidad global de la misión en relación con los objetivos establecidos.
	c. Definir el concepto de misión base	Establecer el concepto fundamental y esencial sobre el cual se construirá la misión completa.
4. Definir requisitos	a. Definir requisitos del sistema	Establecer los requisitos funcionales, operativos y restricciones para el sistema de la misión.
	b. Asignar requisitos a elementos del sistema	Distribuir y asignar los requisitos identificados a componentes y elementos específicos del sistema.

Fuente: A partir de (Wertz & Larson, 2007) y (Rodríguez-Pirateque, Sofrony E., Cortés G., & Rueda, 2020, p. 146)

Los pasos para el diseño de una misión espacial se detallan en la Tabla 3, organizados en fases del ciclo de vida del proyecto, lo que permite un seguimiento minucioso basado en objetivos y productos esperados en cada etapa (Wertz & Larson, 2007).

Tabla 3. *Fases de desarrollo de un programa espacial según SMAD*

FASE	SUBFASE	DESCRIPCIÓN
Presistema	Prefase-A / evaluación de conceptos	a. Borrador de los requerimientos del proyecto. b. Revisión del concepto de la misión (Mission Concept Review –MCR).
	Fase A / desarrollo de concepto y tecnología	a. Plan de proyecto preliminar b. Revisión de los requerimientos del sistema (Systems Requirements Review –SRR). c. Revisión de la definición de la misión (Mission Definition Review –MDR).
	Fase B / diseño preliminar y definición tecnológica	a. Plan de proyecto de línea base b. Preliminar (Preliminary Design Review –PDR–).
Sistema	Fase C / diseño final y fabricación	a. Revisión crítica del diseño (Critical Design Review –CDR). b. Revisión de las interfaces del sistema (System Interface Review –SIR).

FASE	SUBFASE	DESCRIPCIÓN
Sistema	Fase D / ensamblaje del sistema, integración y prueba, lanzamiento	a. Revisión de preparación operacional (Operational Readiness Review –ORR). b. Revisión previa del transporte antes de llegar al sitio de lanzamiento (Review prior to shipment to launch site –PRE-SHIP–).
Operaciones	Fase E / operaciones y sostenimiento	a. Fin de misión. b. Revisión de preparación de vuelo (Flight Readiness Review –FRR). c. Revisión de preparación de lanzamiento (Launch Readiness Review –LRR). d. Revisión de valoración post lanzamiento (Post Launch Assessment Review –PLAR). e. Revisión de preparación de eventos críticos (Critical Events Readiness Review –CERR).
Retiro de Servicio	Fase F / cierre y recuperación	a. Archivo final de datos. b. Revisión de retiro de servicio (Decommissioning Review –DR).

Fuente: A partir (Wertz & Larson, 2007).

Este enfoque estructurado facilita la toma de decisiones al ofrecer una visión clara del progreso, ayudando a evaluar el cumplimiento de metas e hitos clave. El ciclo de vida del diseño de la misión abarca desde la definición inicial hasta la disposición final del sistema, permitiendo ajustes continuos basados en la evolución tecnológica y las lecciones aprendidas. La descomposición del sistema en niveles y la asignación de responsabilidades a los actores clave aseguran una gestión eficiente del proyecto. A pesar de las posibles omisiones en fases o documentos, el proceso de regulación, licenciamiento y certificaciones sigue siendo crucial para garantizar la conformidad con los estándares requeridos.

2.4 Subsistema de Estructuras y Mecanismos

El proceso de diseño preliminar de estructuras y mecanismos se presenta en cinco secciones: 1. Identificación de requisitos, definiendo la misión de lanzamiento y el medio ambiente; 2. Desarrollo de configuraciones de empaquetamiento, determinando los requisitos de subsistemas y accesibilidad; 3. Opciones de diseño consideradas, evaluando opciones de construcción y materiales; 4. Selección de ensayos y análisis, definiendo criterios de ensayo y diseño; y 5. Tamaño de los componentes, verificando el cumplimiento de requisitos para avanzar al diseño detallado. Además, se destaca que el subsistema de estructuras y mecanismos presenta una arquitectura de diseño ajustada a la misión, considerando pruebas comunes y específicas, manufactura, ensamblaje, transporte, manejo, prelanzamiento y operaciones de la misión (Sarafin, Doukas, McCandless, & Britton, 2007).

Las pruebas de vibración y acústica, junto con el arreglo de cargas operativas, son cruciales para la manufactura y el ensamblaje de sistemas espaciales. Estas pruebas incluyen la evaluación de las reacciones del contenedor y del arreglo inducido, así como del transporte, manejo y las reacciones de grúas o Dolly. También abarcan

aspectos medioambientales, prelanzamiento y operaciones de la misión (Sarafin, Doukas, McCandless, & Britton, 2007). Las consideraciones varían según la misión, dado que la aplicación de la carga útil y el diseño de cada subsistema debe integrarse con otros subsistemas, lo que puede requerir incluso el rediseño de la carga útil (Figura 1) (Sellers J. J., 2007).

Figura 1. *Proceso de diseño de la nave espacial*



Fuente: (Sellers J. J., 2007)

3. METODOLOGÍA

3.1 Estructura de la Unidad de Análisis

La metodología correlacional-descriptiva se desarrolla a partir de investigaciones iniciales, basándose en un análisis sistemático, holístico y estructurado de los sistemas y procesos existentes, considerando las filosofías de las autoridades espaciales, las capacidades adquiridas y los requisitos establecidos en la misión. Este enfoque permite la creación de estructuras organizativas claras y funcionales, garantizando la estabilidad operativa mediante protocolos bien definidos y estableciendo mecanismos de evaluación y retroalimentación continua.

Al identificar, diseñar, protocolizar y evaluar de manera rigurosa, se asegura una gestión integral y eficiente de los proyectos espaciales. Además, la metodología no solo mejora el rendimiento del programa espacial, sino que también fomenta una cultura de mejora continua y adaptación frente a desafíos tecnológicos y regulatorios emergentes, consolidando una base sólida para la innovación y la sostenibilidad del proyecto.

De forma paralela, el control de resultados y productos mediante indicadores clave de rendimiento (KPIs) se desarrollará en conformidad con los lineamientos de

MinCiencias, autoridad en proyectos de Ciencia, Tecnología e Innovación (CTeI). Para ello, se utilizará el software de la Metodología General Ajustada (MGA), siguiendo los estándares establecidos. El diseño de la misión se estructura sobre la base de requisitos que guían la formulación de soluciones; estos se apoyan en una teoría que armoniza con los sistemas de información espaciales, con el objetivo de implementar un sistema de gestión documental centralizado que facilite la minería de datos y el monitoreo de fallas.

3.2 Componentes de la Estructuración de la Estrategia

Este documento presenta una estrategia detallada para desarrollar y gestionar sistemas de ingeniería en el ámbito espacial, proporcionando una hoja de ruta integral para el desarrollo y gestión de sistemas de ingeniería en proyectos espaciales, que permite:

- A. Identificar y clasificar los sistemas dentro del marco de procesos y estructuras establecidos para crear una base sólida para la gestión de sistemas
- B. Diseñar la estructura organizativa y funcional de los sistemas de ingeniería específicos para los proyectos espaciales que sigue la identificación de sistemas.
- C. Crear protocolos que aseguren que los sistemas se mantendrán operativos y estables en el tiempo.
- D. Implementar mecanismos de evaluación y retroalimentación continua para revisar la eficacia de los procedimientos establecidos. Esto implica monitorear y medir el desempeño de los procedimientos en la práctica, identificando áreas de mejora y ajustando los métodos según sea necesario.

3.3 Alcance

Se pretende diseñar una Ingeniería de Sistemas que contenga, como concepto de eficiencia y de sistema espacial, los componentes de proceso, metodología, herramientas y ambiente (JAXA, 2013). En el desarrollo de las actividades se pretende, entre otras cosas:

- Establecer los diversos actores y perfiles de expertos de varios campos técnicos para investigar y desarrollar los conceptos novedosos de la arquitectura espacial, que incluyan las configuraciones del sistema espacial y terrestre, integración, ensayos, entre otros.
- Recopilar la información de estudios preliminares previos de misiones espaciales.
- Establecer las decisiones jerárquicas del proyecto, comenzando con las decisiones estratégicas y generalizadas a nivel de misión, y extendiéndose a decisiones estratégicas y generalizadas a nivel de diseño e implementación.

Los cambios recientes en los sistemas brindan nuevos desafíos, que en este caso corresponden a necesidades escalables para el sistema espacial definido en una

arquitectura. El inevitable intercambio entre diseño, costo y facilidad de uso establece el valor del sistema, así como el cumplimiento de los requisitos para lograr la misión requerida.

3.4 Socialización

La socialización se llevará a cabo a lo largo de todo el proyecto, utilizando la Metodología General Ajustada (MGA) implementada por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (MinCiencias). Este proceso se enfocará en el cumplimiento de los objetivos para desarrollar una estrategia sistémica del programa espacial, basada en sus estructuras comunes.

3.4.1 Principios

La socialización incluirá la Apropiación Social del Conocimiento, generada mediante la gestión, producción y aplicación de ciencia, tecnología e innovación. Esto se logrará promoviendo el reconocimiento del contexto, la cohesión, la participación, el diálogo de saberes y conocimientos, la confianza y la reflexión crítica. Este proceso convoca a los ciudadanos a dialogar e intercambiar sus saberes, conocimientos y experiencias, generando entornos de confianza y equidad para transformar sus realidades y generar bienestar social.

3.4.2 Métodos de socialización

1. Productos y resultados de las actividades de apropiación social del conocimiento:

- **Participación en eventos científicos:** se participará en eventos científicos donde se fomentará el intercambio de conocimientos entre investigadores, la comunidad, funcionarios públicos y la ciudadanía en general.
- **Preparación de productos:** integrar diversas perspectivas y conocimientos

2. Presentación de resultados a autoridades:

- **Presentación de resultados a autoridades locales, nacionales y sectoriales:** se presentarán los resultados a autoridades locales, nacionales y sectoriales, promoviendo la gobernanza de los procesos de CTeI en sus territorios. Esto contribuirá no solo a los programas y proyectos de investigación, sino también al empoderamiento y sostenibilidad a través de la toma de decisiones participativas.

3. Articulación:

- **Conformación de redes de conocimiento:** se conformarán redes de conocimiento que fomenten el intercambio de saberes compartidos. La sostenibilidad de estas redes dependerá del sentido, uso y construcción del conocimiento que realicen los actores vinculados.

4. Participación ciudadana en CTel:

- ***Diálogo y encuentro entre actores:*** se propiciará el diálogo y el encuentro entre actores para solucionar, tramitar e involucrarse en asuntos de interés social de manera pertinente y desde la CTel, así como con empresas interesadas y otras áreas de conocimiento.

3.4.3 Documentación y difusión

Este proceso incluirá presentaciones con su respectiva documentación y un informe final que resuma los resultados. Además, se publicarán artículos en revistas indexadas en diversos cuartiles y en los boletines de divulgación de la Fuerza Aérea Colombiana (FAC), a través del Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnologías Aeroespaciales (CITAE) y la Jefatura de Educación Aeronáutica y Espacial (JEAES).

3.4.4 Participación y colaboración

Participarán en este proceso profesionales de áreas administrativas, ingeniería de sistemas, gerentes y empresarios, la Aeronáutica Civil, y asociaciones aeroespaciales como: Clúster Aeroespacial del Pacífico - Aerospacific, Asociación Clúster Aeroespacial y Turístico del Caribe – CLAC, Asociación Colombiana de Productores Aeroespaciales - Acopaer, Clúster Aeroespacial Colombiano - Caescol, Aeroclúster de Boyacá - AeroBoyacá, Federación de la Industria Aeroespacial Colombiana - Fediac, Corporación Científica del Sector Aeroespacial - Cocsa, Clúster Aeronáutico Región Eje Cafetero Colombia - Clare, Cauca Valley Aerospace Cluster - CVAC, National Space Society Colombia - NSS Colombia; y todos aquellos interesados en conocer la heurística de una propuesta de desarrollo de una estrategia sistémica en estructuras organizacionales complejas.

3. DESARROLLO

Se deben desarrollar modelos metodológicos experimentales en el ámbito espacial para evitar interpretaciones erróneas y asegurar la escalabilidad adecuada (Wasson, 2012). La estructura de la Ingeniería de Sistemas (IS) en programas espaciales comienza con la planeación estratégica y la definición del ciclo de vida, colaborando con agencias o autoridades espaciales. El marco de procesos de la IS proporciona una guía estructurada para el desarrollo y gestión de proyectos, asegurando la consideración y gestión eficiente de todos los aspectos del sistema (NASA, 2007), (JAXA, 2013). La cadena de valor en la gestión de calidad identifica y gestiona actividades que agregan valor, siguiendo una gestión documental conforme a estándares internacionales (INCOSE, 2015), (EIA632A, 2021).

La generación de conocimiento en unidades académicas aborda metodologías fragmentadas centradas en aplicaciones matemáticas y conceptos científicos. La investigación busca desarrollar capacidades técnicas y operacionales en el ámbito espacial, con la colaboración de aliados. La implementación de una estructura marco con arquitecturas de Sistemas de Información asociadas a productos escalables reducirá esfuerzos y fomentará la integración de disciplinas. Esto facilitará la administración y la implementación de decisiones en proyectos espaciales, lo cual es crucial para el avance del programa espacial.

Para evaluar la implementación de proyectos espaciales, se desarrollan procedimientos que optimizan el rendimiento del sistema, mejoran la gestión del proyecto y aseguran la eficiencia operativa competitiva. Estos procedimientos incluyen metodologías ágiles, herramientas de optimización de procesos, modelos y simulaciones, y capacitación continua del personal. Esta evaluación continua y adaptativa asegura el cumplimiento de estándares, mejora la coordinación y la calidad general del proyecto, contribuyendo al éxito y sostenibilidad a largo plazo del programa espacial (INCOSE, 2015), (NASA, 2007).

4.1 Generación de la Estrategia

Se crea la hoja de ruta para desarrollar y gestionar los Sistemas de Información (SI) en el ámbito espacial, definiéndose así los objetivos de la estrategia.

4.1.1 Identificación y clasificación de sistemas

Se establece una base según los procesos y estructuras existentes.

- **Ingeniería de sistemas espaciales**

La Ingeniería de Sistemas (IS) es un proceso interdisciplinario que convierte un requisito en una solución sistémica mediante un esfuerzo técnico coordinado (Elm, Goldenson, El Emam, Donatelli, & Neisa, 2008), (IEEE P1220, 1994).

La IS requiere un enfoque interdisciplinario debido a su complejidad y los significativos recursos financieros involucrados. Este enfoque busca definir y estandarizar los procesos de diseño, apoyando la teoría de Firesmith (2009) sobre los Sistemas de Sistemas (SoS) y sus características emergentes y complejas (Tabla 4) (Tubio Pardavila, 2012), (JAXA, 2013).

Tabla 4. Estándares de Ingeniería de Sistemas

ESTÁNDAR / ORGANIZACIÓN	DESCRIPCIÓN	OBJETIVO
UML (Unified Modelling Language)	Por Rationale y adoptado por OMG, establece diagramas normalizados para describir procesos de software.	Normalizar la especificación, diseño, implementación y distribución de software.
INCOSE (International Council On Systems Engineering) (INCOSE, 2015)	EE.UU., estandariza el diseño de sistemas complejos y desarrolló SysML, extendiendo UML a sistemas complejos.	Estandarizar el diseño de sistemas complejos con diagramas gráficos basados en UML.

ESTÁNDAR / ORGANIZACIÓN	DESCRIPCIÓN	OBJETIVO
ECSS ¹ (European Cooperation for Space Standardization)	Europa, estandariza los procesos de ingeniería en el diseño de sistemas espaciales con el apoyo de la ESA.	Mejorar la competitividad de la industria espacial europea con normativas comunes de diseño y fabricación.
NASA (National Aeronautics and Space Administration)	Desarrolla estándares propios para normalizar el diseño de sistemas espaciales complejos.	Normalizar el diseño de sistemas espaciales complejos con estándares internos.
ISO (International Standards Organization)	El comité técnico TC20 estandariza procesos de ingeniería en sistemas espaciales.	Estandarizar los procesos de ingeniería en sistemas espaciales a nivel global.

Nota. OMG es Object Management Group o Grupo de Gestión de Objetos.

Las iniciativas y organizaciones en el ámbito de la IS aplicadas a proyectos espaciales emplean normas y procesos fundamentales que facilitan la colaboración y garantizan la calidad, así como la seguridad en la realización de misiones espaciales (Cappelletti, Battistini, & Malphrus, 2021, p. 18) (Tabla 5).

Tabla 5. *Definiciones clave en la Ingeniería de Sistemas espaciales*

FUENTE	ENFOQUE	DEFINICIÓN
Manual de la IS de INCOSE	Interdisciplinario	Promueve la creación de sistemas exitosos que satisfagan las necesidades de clientes, usuarios y partes interesadas (INCOSE, 2015)
Manual de la IS de la NASA	Metódico y multidisciplinario	Un sistema es una combinación de elementos (hardware, software, personal, etc.) que funcionan conjuntamente para cumplir una necesidad (NASA, 2007)
ESA ECSS E-10 Parte 1B / ECSS-E-ST-10C	Interdisciplinario	Regula la transformación de un requisito en una solución de sistema (ESA, ECSS-E-ST-10C, 2009).
James R. Wertz	Eficiencia y costo	Define parámetros y asegura el cumplimiento de requisitos de misión con bajo riesgo y costo (Wertz & Larson, 2007)

Fuente: A partir de (Cappelletti, Battistini, & Malphrus, 2021, p. 18), (Wertz & Larson, 2007), (NASA, 2007), (INCOSE, 2015), (ESA, ECSS-E-ST-10C, 2009).

- 1 Cooperación Europea para la Normalización del Espacio (ECSS). Fundada en 1993 por la ESA para crear un conjunto coherente y único de normas espaciales para las actividades espaciales europeas. Requieren que el usuario final los adapte de acuerdo con sus necesidades y son utilizados activamente por muchos países fuera de las fronteras de América del Norte y Europa.

Estas definiciones proporcionan bases para la cooperación, tanto en el éxito de proyectos como en misiones espaciales, especialmente en la gestión técnica del diseño y desarrollo de productos espaciales, ya sea en la NASA o en la ESA, al requerir una metodología que identifique los componentes y sus interacciones (Cappelletti, Battistini, & Malphrus, 2021) (Tabla 6).

Tabla 6. *Estándares y metodologías en la ingeniería de sistemas espaciales*

ORGANIZACIÓN	ESTÁNDAR	ENFOQUE	DESCRIPCIÓN
NASA	Manual de IS	Metódico y multidisciplinario	Basado en un enfoque metódico y multidisciplinario para el diseño y gestión de sistemas espaciales. Accesible a través del Servicio de Información de Directivas en Línea de la NASA.
ESA	E-ST-10	Estandarización en IS espaciales	Creado por la ECSS, establece normativas para la IS espaciales en la Agencia Espacial Europea.

Fuente: A partir de (Cappelletti, Battistini, & Malphrus, 2021, p. 18), (NASA, 2007), (ESA, ECSS-E-ST-10C, 2009).

Finalmente, el ciclo de vida de un proyecto espacial consta de seis fases, desde la Prefase I hasta la Fase V, que abarcan desde la introducción en Ingeniería de Sistemas hasta las actividades posteriores al lanzamiento y disposición final (Shiotani, 2018) (Tabla 7).

Tabla 7. *Ciclo de vida del proyecto espacial*

FASE	DESCRIPCIÓN
Prefase I	Introducción a la Ingeniería de Sistemas para los participantes del proyecto
Fase I	Identificación del concepto de la misión y diseño preliminar
Fase II	Desarrollo del diseño detallado del proyecto
Fase III	Desarrollo, integración y pruebas de componentes y subsistemas
Fase IV	Ensamblaje, integración de sistemas, pruebas ambientales y preparación del lanzamiento
Fase V	Actividades posteriores al lanzamiento, operación, retiro y disposición conforme a normativas vigentes

Fuente: A partir de (Shiotani, 2018).

Según Forsberg, Mooz y Cotterman (2005), citados por Shiotani (2018), se desarrollaron modelos de procesos de SI, cada uno con enfoques específicos que dependen del tipo de sistema, los requisitos y los recursos disponibles. En la Tabla 8, se exploran en detalle las dinámicas y características de los modelos más relevantes para el proyecto.

Tabla 8. *Modelos de procesos en la Ingeniería de Sistemas*

MODELO	AÑO	DESCRIPCIÓN	ENFOQUE PRINCIPAL
Cascada	1970	Enfoque secuencial en el que cada fase debe completarse antes de avanzar a la siguiente. Es un modelo lineal que no permite regresar a etapas anteriores.	Desarrollo secuencial y lineal del sistema.
Espiral	1986	Incorpora elementos de desarrollo iterativo y progresivo. Enfocado en la gestión de riesgos y permite la repetición de ciclos para refinar y mejorar el sistema.	Iteración y gestión de riesgos.
V (Cappelletti, Battistini, & Malphrus, 2021)	-	Desarrollo del sistema como una “V”. La parte izquierda representa actividades de diseño y la derecha actividades de prueba y verificación.	Diseño y verificación en paralelo.
W	-	Información específica no proporcionada, pero se asume que tiene características distintivas en el desarrollo de sistemas.	Desconocido.
IS de la NASA (NASA, 2007)	2007	Desarrollo y operación de sistemas complejos. Las directrices aseguran que los sistemas cumplan requisitos, siendo seguros y confiables.	Desarrollo y operación de sistemas complejos.
INCOSE (INCOSE, 2015)	2011	Desarrollado por INCOSE, se enfoca en la práctica de la IS y proporciona un marco para desarrollar sistemas de alta calidad.	Práctica de la IS y desarrollo de sistemas de alta calidad.
De la Agencia ESA (ESA, ECSS-E-ST-10C, 2009)	2009	Desarrollado por la ESA, se ajusta a las necesidades específicas de proyectos espaciales en Europa.	Adaptación a proyectos espaciales europeos.

Fuente: A partir de (Cappelletti, Battistini, & Malphrus, 2021).

Los gestores garantizan el éxito del proyecto y la eficiencia al seleccionar el enfoque más adecuado según las características y necesidades del sistema en desarrollo, teniendo en cuenta factores como la complejidad del proyecto, la necesidad de iteración, la gestión de riesgos y los requisitos específicos del sector (Cappelletti, Battistini, & Malphrus, 2021).

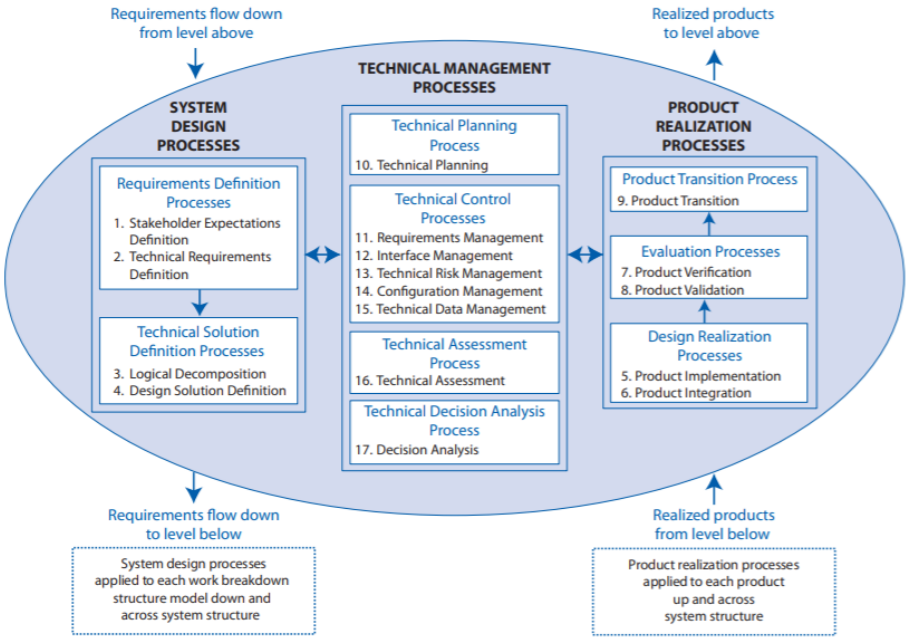
4.1.2 Diseño de estructuras organizativas y funcionales

e establece una base sólida para el desarrollo de proyectos espaciales, asegurando que cada componente del sistema esté adecuadamente planificado, diseñado, integrado y mantenido, lo que garantiza la calidad y el éxito del proyecto. Existen diversas estructuras organizativas y funcionales diseñadas para el ciclo de vida de misiones espaciales (Wertz & Larson, 2007).

• **Ingeniería de Sistemas de la NASA**

La NASA estableció el Estándar NPR 7123.1C de 2020, Procesos y requisitos de la IS de la NASA, clasificando el desarrollo de productos y sistemas espaciales en tres: diseño del sistema, realización del producto y gestión técnica (Figura 2) (NASA, 2007, p. 23).

Figura 2. Estructura organizacional de la Ingeniería de Sistemas de la NASA



Fuente: (NASA, 2007, p. 23).

El Estándar de la NASA se divide en tres procesos establecidos por niveles, los cuales se interrelacionan entre sí (NASA, 2019) (Tabla 9).

Tabla 9. Productos y sistemas espaciales de la NASA

PROCESO	DESCRIPCIÓN	COMPONENTES CLAVE	APLICACIÓN
Diseño de Sistemas	Requerimientos técnicos y soluciones técnicas. Incluye la descomposición lógica y el diseño de soluciones.	- Definición de requerimiento - Soluciones técnicas - Descomposición lógica - Diseño de soluciones	Desde la definición hasta la construcción, compra o reutilización de productos del sistema.

PROCESO	DESCRIPCIÓN	COMPONENTES CLAVE	APLICACIÓN
Administración Técnica	Gestión técnica integral. Incluye planeación, control, y evaluación.	- Planeación técnica - Control técnico (requerimientos, interfaces, riesgos, configuración, datos) - Evaluación técnica	Aplicable a todos los elementos de la misión
Realización de Producto	Análisis de decisiones, que abarca productos de transición, evaluación de procesos, y realización del diseño.	- Procesos de productos de transición - Evaluación de procesos - Realización del diseño - Implementación e integración	Establece planes técnicos, gestiona comunicación a través de interfaces y evalúa progreso respecto a los requisitos.

Fuente: A partir de (NASA, 2019).

El ciclo de vida del proyecto de la NASA es en siete fases agrupadas en dos etapas fundamentales: la formulación y la implementación (Shiotani, 2018, p. 51) (Figura 3).

Figura 3. Ciclo de vida de proyectos de la NASA

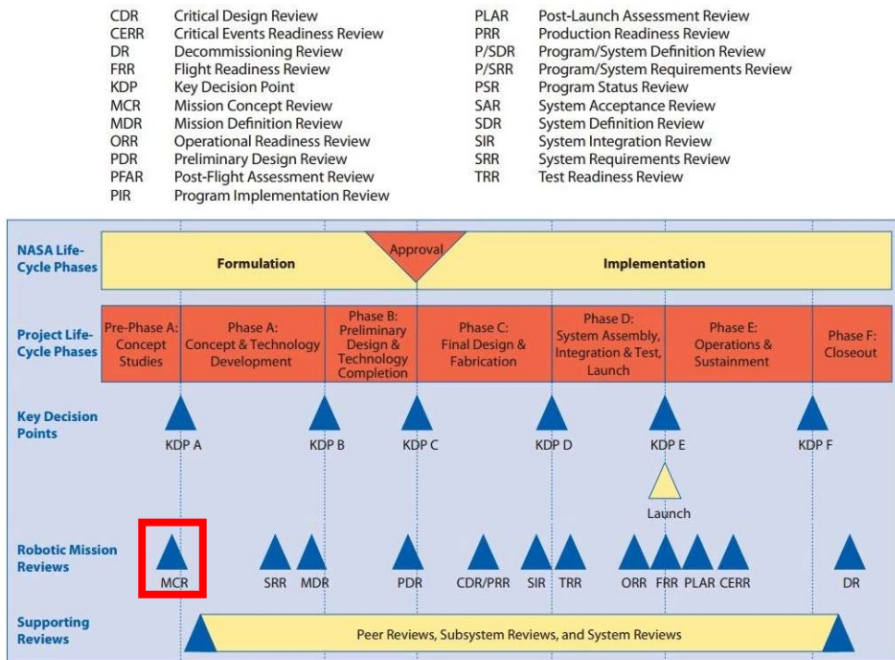


Figure 3.0-2 NASA project life cycle

Fuente: (NASA, 2007, p. 38).

En la **formulación**, se planifica y analiza, definiendo los objetivos de la misión, desarrollando conceptos y preparando requisitos que aseguren la satisfacción de las partes interesadas y la identificación de los componentes del sistema antes de avanzar. Luego, en la **implementación**, se ejecuta el proyecto, desde el diseño final hasta la producción, integración, verificación, operación y eventual desmantelamiento del sistema, garantizando que cumpla con todos los requisitos establecidos y esté listo para su operación (Tabla 10) (NASA, 2007, p. 38), (NASA, 2019).

Tabla 10. *Fases del ciclo de vida del proyecto según el estándar de la NASA*

ETAPA	FASE	DESCRIPCIÓN
Formulación	Prefase A	Determinación de la misión, elaboración y evaluación de un borrador de requisitos del sistema.
	A	Desarrollo conceptual y tecnológico, definición del concepto final de misión y conceptos preliminares de operación (CONOPS).
	B	Diseño preliminar, finalización de tecnología, desarrollo de software preliminar y simulación.
Implementación	C	Diseño final del sistema, inicio de la fabricación y desarrollo del software de vuelo.
	D	Montaje, integración, verificación y validación, (pruebas ambientales). Preparación para lanzamiento.
	E	Operación de misión y evaluación posterior al lanzamiento (PLAR), y valida el sistema en operación.
	F	Implementación del plan de eliminación y desmantelamiento del sistema.

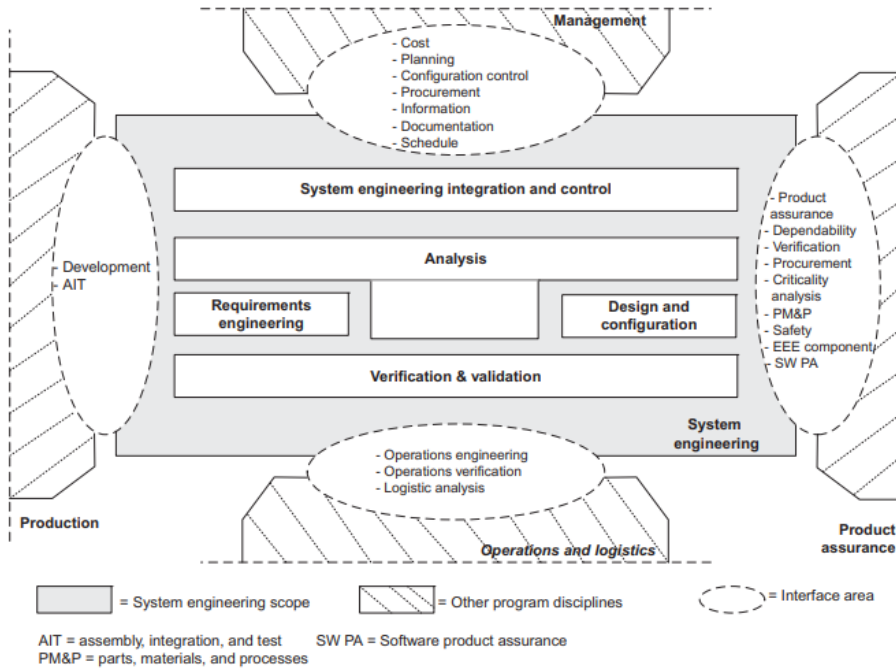
Fuente: A partir de (NASA, 2007, p. 38), (NASA, 2019).

Esta Tabla 10 muestra una visión estructurada de las fases del ciclo de vida del proyecto, según el estándar de la NASA, agrupadas en las etapas de formulación e implementación.

• **Ingeniería de Sistemas de la ESA**

La estandarización en el desarrollo de sistemas y productos espaciales se organiza en fases de planificación del proyecto, donde equipos especializados definen la documentación, los productos y gestionan la integración, verificación, validación y aspectos administrativos como costos, planificación, compras y pruebas (Tubio Pardavila, 2012, p. 42).

Los procesos y actividades involucrados en la ingeniería de sistemas de la NASA, sobre los productos y sistemas de la ESA, se aprecian en la Figura 4 (INCOSE, 2015).

Figura 4. Estructura organizacional de la Ingeniería de Sistemas de la ESA

Fuente: (ECSS, 2017, p. 17), (Cappelletti, Battistini, & Malphrus, 2021, p. 4).

Los marcos de la ESA ofrecen directrices similares a las de la NASA, para asegurar una gestión documental precisa y actualizada, basadas en modelos (MBSE) del diseño conceptual al ciclo de vida del producto (Tabla 11) (INCOSE, 2015).

Tabla 11. Productos y sistemas espaciales de la ESA

PROCESO	DESCRIPCIÓN	COMPONENTES CLAVE	APLICACIÓN
Requisitos y Diseño	De requisitos de ingeniería a diseño y configuración del producto espacial.	Ingeniería de requisitos, diseño de sistemas, análisis.	Desarrollo y configuración de sistemas espaciales.
Integración y Control	Integración y control de los SI, análisis, verificación y validación del sistema.	Integración desistemas, verificación, validación, control.	Asegurar que los sistemas cumplan con requisitos y funcionan correctamente

PROCESO	DESCRIPCIÓN	COMPONENTES CLAVE	APLICACIÓN
Administración del Proyecto	Control transversal que incluye costos, planificación, control, compras, información, documentación y programación.	Planificación, gestión de costos, compras, documentación.	Gestión eficiente de recursos y seguimiento del proyecto espacial.
Ensamblajes e Integración	Gestión de ensamblajes, integración y pruebas del sistema.	Ensamble de componentes, pruebas de integración.	Montaje y verificación de sistemas completos antes de su lanzamiento.
Operaciones de Ingeniería y Logística	Garantiza fiabilidad, continuidad operativa y soporte logístico del sistema.	Gestión de operaciones, logística, soporte técnico.	Mantenimiento y soporte continuo de sistemas espaciales para asegurar su operación.

Fuente: A partir de (INCOSE, 2015).

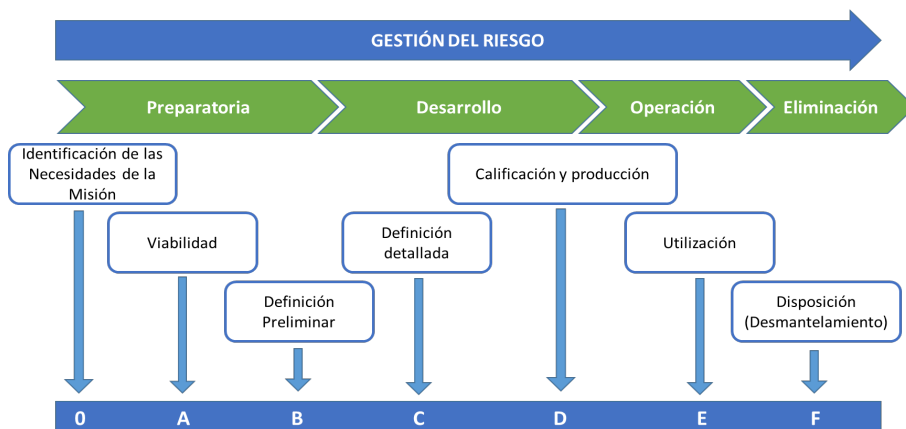
Para la ESA, el ciclo de vida de los proyectos espaciales se divide en siete fases, organizadas en tres etapas, tal como se muestra en la Tabla 12 (Shiotani, 2018, p. 53-54).

Tabla 12. *Ciclo de vida de proyectos de la ESA*

ETAPA	FASES	DESCRIPCIÓN
Preparatoria	0, A, B	Identificación de necesidades, elaboración de requisitos técnicos y funcionales, desarrollo de conceptos, y evaluación de riesgos técnicos y programáticos iniciales
Desarrollo	C, D	Desarrollo y construcción del sistema espacial y de tierra, integración de componentes, pruebas y validación
Operación y Eliminación	E, F	Operación, mantenimiento y utilización de los productos entregables, y eliminación de todos los sistemas espaciales y terrestres al final de su vida útil

Fuente: A partir de (Shiotani, 2018, p. 53-54).

La Arquitectura de la IS organiza los componentes y sus funciones para cumplir con los requisitos del sistema (Figura 5). Sin embargo, debe ajustarse continuamente para adaptarse a las necesidades específicas del proyecto, un proceso conocido como diseño del SI, que permite su escalabilidad y flexibilidad (Firesmith, 2009; Rodríguez A., 2019).

Figura 5. Ciclo de vida de un proyecto ESA

Fuente: Adaptado de (Ortega, 2009) con base en ECSS-E-10.

La ESA estructura y gestiona el desarrollo de sistemas espaciales desde la definición inicial hasta el desmantelamiento (Tabla 13) (Tubio Pardavila, 2012, p. 39).

Tabla 13. Fases del ciclo de vida de los proyectos espaciales según la ESA

FASE	DESCRIPCIÓN
0: Identificación de Necesidades	Caracterización y definición de la misión y el producto final a alto nivel. Involucra iniciadores del proyecto, usuarios finales y cliente principal.
A: Viabilidad	Análisis de la idoneidad del diseño preliminar para lograr la misión. Contratista principal y proveedores son responsables de la mayor parte del trabajo.
B: Definición Preliminar	Desarrollo de un diseño preliminar implementable. Involucra proveedores de distintos niveles.
C: Definición Detallada	Completar el diseño preliminar con definición completa de requisitos e interfaces. Implica realización de pruebas para validar el sistema.
D: Calificación y Producción	Producción y calificación del producto final, incluyendo pruebas de interoperabilidad y compatibilidad. Preparación de documentación entregable.
E: Utilización	Operación del sistema hasta su finalización. Control del segmento espacio y uso del sistema por los usuarios.
F: Desmantelamiento	Desmantelamiento del sistema al final de su vida útil para evitar daños a terceros.

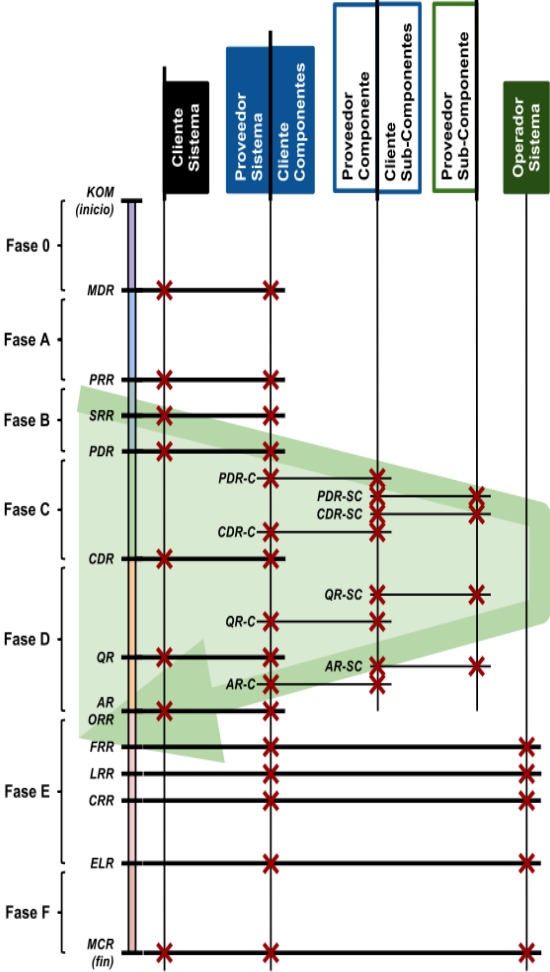
Fuente: A partir de (Tubio Pardavila, 2012, p. 39).

Este enfoque sistemático incluye reuniones clave para revisar y validar cada etapa del proceso, facilitando una gestión integral y la calidad del producto final.

• **Modelos de procesos en la Ingeniería de Sistemas**

El modelo “V” es un enfoque estructurado que comienza con un diseño de alto nivel y se desarrolla en detalle con la colaboración de proveedores especializados (Tubio Pardavila, 2012). Este modelo permite refinar las especificaciones de manera progresiva, lo que facilita la integración de los componentes del sistema y asegura la alineación entre la planificación estratégica y la ejecución técnica en proyectos espaciales (Cappelletti, Battistini y Malphrus, 2021) (Figura 6).

Figura 6. Fases y modelo de ingeniería en “V”



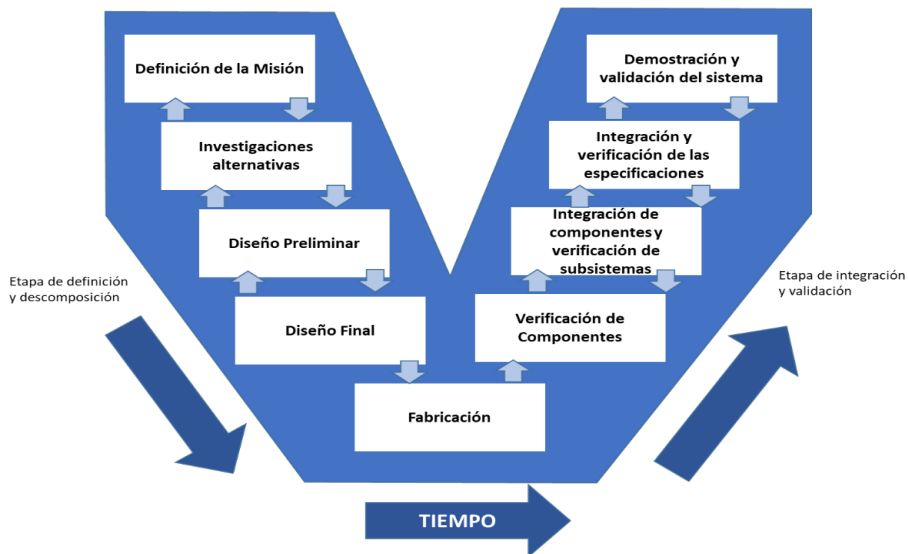
Fuente: (Tubio Pardavila, 2012, p. 54).

Los estándares ECSS proporcionan una base común para la gestión de proyectos espaciales (Tubio Pardavila, 2012, p. 85), aunque requieren adaptaciones para satisfacer las necesidades específicas del ciclo de vida del proyecto (Selva & Krejci, 2012; King, Kolbeck, Kang, Sanders & Keidar, 2021). La compatibilidad entre componentes adicionales y la ampliación de las capacidades del sistema son aspectos fundamentales (Cappelletti, Battistini & Malphrus, 2021).

- ***Ingeniería de Sistemas de la Agencia Espacial de México -AEM***

Según Duarte Muñoz (2018), los proyectos espaciales son intrínsecamente complejos y requieren la coordinación de un equipo multidisciplinario para cumplir con rigurosos estándares y superar los desafíos que puedan comprometer el éxito de la misión. La ingeniería de sistemas (IS) desempeña un papel fundamental al guiar el diseño, desarrollo y operación de estos sistemas complejos, asegurando que las especificaciones del proyecto se cumplan en el sistema final. Su impacto abarca todas las etapas del desarrollo a través de tres tareas principales (Figura 7) (AEM, 2019; AEM, 2016).

Figura 7. Estructura organizacional de la ingeniería de sistemas de la AEM



Fuente: (Duarte Muñoz, 2018), (Cappelletti, Battistini, & Malphrus, 2021, p. 14), (Robledo Asencio, Rincón Urbina, Cardenas García, Mendez Gomez, & Salek Chaves, 2023, p. 8).

Esta metodología se divide en tres etapas principales que orientan el proceso desde la definición inicial hasta la gestión del proyecto (Tabla 14) (Duarte Muñoz, 2018; Cappelletti, Battistini y Malphrus, 2021, p. 14; Robledo Asencio, Rincón Urbina, Cárdenas García, Méndez Gómez y Salek Chaves, 2023, p. 8).

Tabla 14. *Estructura en V de la Ingeniería de Sistemas*

ETAPA	OBJETIVOS	ACTIVIDADES
Definición y Descomposición	Establecer la misión y la arquitectura del sistema, detallando el modelo completo del sistema.	- Definir la misión del sistema. - Diseñar la arquitectura del sistema. - Descomponer el sistema en subsistemas y definir sus interacciones.
Integración y Validación	Desarrollar o adquirir subsistemas, coordinarlos, y verificar que cumplan con los requisitos antes de la integración completa.	- Desarrollar o adquirir los subsistemas. - Coordinar los equipos de trabajo en cada subsistema. - Evaluar los subsistemas individualmente. - Verificar el cumplimiento de los requisitos y su correcta integración.
Administración del Proyecto	Planificar, organizar y controlar el desarrollo técnico del proyecto, y supervisar los costos, plazos y calidad.	- Planificar y organizar el desarrollo del sistema. - Controlar el progreso técnico. - Monitorear y gestionar costos, plazos y calidad. - Realizar ajustes según sea necesario.

Fuente: A partir de (Duarte Muñoz, 2018), (Cappelletti, Battistini, & Malphrus, 2021, p. 14), (Robledo Asencio, Rincón Urbina, Cardenas Garcia, Mendez Gomez, & Salek Chaves, 2023, p. 8).

La estructura en “V” de la ingeniería de sistemas es una metodología robusta que facilita la gestión y el desarrollo de proyectos complejos mediante la descomposición y definición detallada de requisitos, seguida de una integración y validación sistemáticas. Este enfoque garantiza que cada componente del sistema se desarrolle y pruebe minuciosamente, minimizando riesgos y asegurando la calidad del producto final (Duarte Muñoz, 2018; Cappelletti, Battistini y Malphrus, 2021, p. 14; Robledo Asencio, Rincón Urbina, Cárdenas García, Méndez Gómez y Salek Chaves, 2023, p. 8).

La ingeniería de sistemas (IS) de la AEM proporciona una estructura metodológica con una visión integral del ciclo de vida de los proyectos espaciales, detallando cada etapa del desarrollo y garantizando la coherencia y el correcto funcionamiento de los sistemas desarrollados (Tabla 15).

Tabla 15. *Ciclo de vida de proyectos espaciales según la ingeniería de sistemas de la AEM*

ETAPA	DESCRIPCIÓN	ACTIVIDADES
Definición de la Misión	Establecimiento de resultados esperados y definición de objetivos. Identificación de actores y requisitos.	Declaración de la misión, definición de objetivos y requisitos, identificación de usuarios finales y partes interesadas.

ETAPA	DESCRIPCIÓN	ACTIVIDADES
Investigación de Alternativas	Revisión y evaluación de diferentes opciones para alcanzar la misión.	Evaluación de Conceptos de Operación según criterios de costo, tiempo, riesgo, etc.
Diseño Preliminar	Elaboración de un diseño preliminar con especificaciones de subsistemas y componentes.	Establecimiento de especificaciones, creación de documentos para control de interfaces, identificación de partes y software.
Diseño Final	Desarrollo detallado de todos los sistemas y subsistemas del producto espacial.	Desarrollo del Diseño Crítico o de Detalle para todos los componentes del sistema.
Integración del Sistema Propuesto	Integración de diferentes elementos para el funcionamiento conjunto.	Asegurar que todos los componentes funcionen sincronizadamente como un único sistema.
Fabricación	Producción de los sistemas integrados según requisitos establecidos.	Fabricación de los componentes y sistemas cumpliendo con los requisitos de masa, resistencia y condiciones ambientales.
Verificación	Comprobación de que los componentes cumplen con los requisitos de la misión.	Pruebas rigurosas de sistemas, componentes y subsistemas bajo diversos escenarios operativos.
Pruebas de Funcionamiento	Análisis del comportamiento de los componentes en relación con los requisitos operativos.	Evaluación del rendimiento de los componentes en condiciones operativas simuladas.
Pruebas Ambientales	Simulación de condiciones ambientales a las que estará expuesto el sistema.	Realización de pruebas de vibración, ruido, termovació, radiación, entre otras.
Operación	Monitoreo del sistema en funcionamiento para garantizar el cumplimiento de especificaciones.	Registro de parámetros operativos y aplicación de medidas correctivas en caso de desviaciones.
Evaluación	Revisión de resultados y conclusiones post-misión.	Evaluación de los resultados obtenidos, lecciones aprendidas y conclusiones para futuros proyectos.

Fuente: A partir de Duarte Muñoz (2018), Cappelletti, Battistini y Malphrus (2021, p. 14), y Robledo Asencio, Rincón Urbina, Cárdenas García, Méndez Gómez y Salek Chaves (2023, p. 8).

Cada fase está diseñada para garantizar que el sistema cumpla con los requisitos establecidos y opere bajo una metodología estructurada de planificación y ejecución, con un enfoque en la verificación y validación para maximizar el éxito de la misión.

4.13 Creación de protocolos de articulación que personalicen el sistema

Los aspectos clave en el contexto espacial considerados por los autores para la creación de protocolos destinados a la implementación de la ingeniería de sistemas en un programa espacial incluyen los tipos de implementación, el enfoque, el ciclo de vida y la interdisciplinariedad. De este modo, la ingeniería de sistemas se convierte en una disciplina predecible, repetible, entrenable y aplicable, lo que permite optimizar el desarrollo de los productos (Sheard, 2000).

Se identifican dos tipos principales de situaciones complejas: aquellas en las que la complejidad surge de problemas sin precedentes (Ingeniería de Sistemas de Descubrimiento) y aquellas donde los problemas son bien conocidos, pero las soluciones resultan altamente complejas (Ingeniería de Sistemas de Programas).

• Tipos de implementación

Los tres tipos de implementación de IS se abordan en el contexto de diferenciar enfoques internos (Tabla 16) (Sheard, 2000), (Doran, 2006), (EIA632A, 2021).

Tabla 16. Tipo de implementación de ingeniería de sistemas

TIPO	PERSPECTIVA	ACTIVIDADES	RESULTADO
Ingeniería de Sistemas de Descubrimiento	Énfasis en el análisis profundo del espacio del problema, descubriendo y entendiendo las complejidades antes del diseño de soluciones.	Obtención de requisitos, análisis de partes interesadas, estudios de viabilidad y diseño conceptual.	- Obtención de requisitos específicos del programa - Identificación de las necesidades y expectativas de las partes interesadas - Estudios de viabilidad - Diseño conceptual.
Ingeniería de Sistemas de Programa	Enfoque en la coordinación y aspectos generalistas, gestionando interfaces técnicas y humanas para una solución integrada.	Gestión de proyectos, integración de subsistemas, coordinación entre equipos de ingeniería y gestión de interfaces.	- Gestión efectiva de proyectos - Integración de subsistemas - Coordinación entre diferentes equipos de ingeniería.
Ingeniería de Sistemas de Enfoque	Procedimientos y estándares establecidos para asegurar consistencia y calidad en el trabajo de ingeniería.	Adherencia a estándares de ingeniería, mejora de procesos, documentación, verificación y validación.	- Adherirse a los estándares de ingeniería de sistemas - Mejorar los procesos continuamente - Actividades de documentación, verificación y validación.

Fuente: A partir de (Sheard, 2000), (Doran, 2006), (EIA632A, 2021).

La combinación de un análisis exhaustivo del problema (Ingeniería de Sistemas de Descubrimiento), una gestión y coordinación efectivas (Ingeniería de Sistemas de Programa) y la adherencia a procedimientos y estándares establecidos (Ingeniería de Sistemas de Enfoque) garantiza que el programa no solo cumpla con los requisitos técnicos, sino que también sea eficiente, confiable y de alta calidad. Esta integración holística de enfoques permite abordar tanto las complejidades iniciales como las necesidades operativas y de calidad a lo largo del ciclo de vida del programa espacial (Sheard, 2000; Doran, 2006; EIA632A, 2021).

En la implementación de la ingeniería de sistemas, los tres tipos se emplean de manera complementaria según la complejidad del ciclo de vida del proyecto y la capacidad instalada. En el desarrollo de satélites, que incluye sistemas de aviónica y hardware, se utiliza con mayor frecuencia la Ingeniería de Sistemas de Programa. Por otro lado, para el desarrollo de software, subsistemas y componentes de grandes subsistemas, se prefiere la tipología de enfoque descrita por Sheard (2000).

• *Enfoque de Sistema Completo*

La metodología empleada para abordar un problema o proyecto en el ámbito espacial se fundamenta en el diseño, integración, prueba y operación de sistemas espaciales complejos. Estos sistemas comprenden subsistemas críticos como la carga útil, propulsión, energía, comunicaciones, control térmico y estructuras, además de las interfaces entre ellos, garantizando un funcionamiento integral y holístico (Rincón U, Bastidas B y Rodríguez A, 2023).

El programa FACSAT se centra en el desarrollo y operación de satélites con el objetivo de fortalecer las capacidades espaciales de Colombia y promover el avance tecnológico del país. Este programa se enfoca en tres aspectos clave según INCOSE (2015): **el Problema**, que requiere un análisis y definición exhaustiva antes de diseñar soluciones; **la Solución**, que abarca el diseño e implementación de la solución propuesta; y **el Proceso**, que implica seguir procedimientos y estándares para garantizar la calidad en todas las etapas del proyecto. Este enfoque metodológico permite gestionar los proyectos aeroespaciales de manera efectiva y coordinada, asegurando su éxito y sostenibilidad a largo plazo.

Lograr el funcionamiento coherente de un sistema espacial sin una base sólida representa un desafío significativo. Por ello, programas como FACSAT se sustentan en la colaboración con aliados estratégicos. Un ejemplo de esta colaboración es la asociación con GomSpace para el diseño y construcción de los satélites de las misiones FACSAT-1 y FACSAT-2. Para garantizar el éxito de estas misiones, se adopta el estándar ECSS de la Agencia Espacial Europea (ESA), utilizado por GomSpace como referencia en sus procesos de desarrollo. Este estándar se fundamenta en un historial probado de misiones exitosas, lo que permite mitigar riesgos asociados a enfoques inciertos (Rincón U, Bastidas B y Rodríguez A, 2023).

- **Ciclo de Vida del Sistema Espacial**

Cada fase del ciclo de vida tiene actividades y objetivos específicos, y el éxito en cada una depende del trabajo realizado en las fases anteriores. La identificación de objetivos y necesidades desde el inicio asegura una base sólida, mientras que el desarrollo y refinamiento de los diseños garantizan soluciones óptimas. La fabricación, pruebas y verificaciones exhaustivas aseguran el correcto funcionamiento en el espacio. La gestión del lanzamiento y operación, junto con el monitoreo continuo, optimizan el rendimiento. Finalmente, la planificación del fin de la misión y la eliminación segura del sistema son esenciales para minimizar el impacto ambiental (INCOSE, 2015, pág. 25).

- **Interdisciplinariedad en el Contexto Espacial**

Se refiere a la colaboración entre diversas disciplinas y áreas de conocimiento para resolver problemas complejos. Dado que los sistemas espaciales suelen involucrar múltiples componentes técnicos y humanos, se requiere: **Integración de Especialidades**, al combinar conocimientos de diversas disciplinas, como ingeniería eléctrica, mecánica, informática y gestión, para abordar los desafíos técnicos y operativos del sistema espacial; **Trabajo en Equipo**, al fomentar la colaboración entre expertos de diferentes áreas, asegurando que todas las partes del sistema funcionen juntas de manera coherente; y **Enfoque Holístico**, al considerar el sistema en su totalidad en lugar de enfocarse solo en partes individuales, lo que permite entender mejor la interacción entre sus componentes y con el entorno, garantizando un funcionamiento armónico e integral.

La interdisciplinariedad facilita el desarrollo de soluciones innovadoras y efectivas, optimiza el rendimiento del sistema y asegura el éxito de las misiones. Proporciona una visión completa de los problemas y las oportunidades, promoviendo la innovación y la sostenibilidad en el ámbito espacial.

4.1.4 Evaluación y retroalimentación continua

El proceso para monitorear y evaluar continuamente los procedimientos establecidos en proyectos espaciales, ajustando y mejorando los métodos para mantener la eficacia operativa se aprecian en la Tabla 17 (NASA, 2007) (INCOSE, 2015).

Tabla 17. Proceso de Monitoreo y Evaluación Continua en Proyectos Espaciales

ACTIVIDAD	DESCRIPCIÓN	EJEMPLOS
Definición de KPIs	Establecer indicadores específicos para medir el rendimiento de procedimientos y procesos.	Tiempo de inactividad, tasa de éxito en pruebas, costos operativos.
Implementación de un Sistema de Monitoreo	Utilizar herramientas para recopilar datos en tiempo real sobre el desempeño.	Software de gestión de proyectos, herramientas de monitoreo.

ACTIVIDAD	DESCRIPCIÓN	EJEMPLOS
Realización de Auditorías Periódicas	Llevar a cabo auditorías para revisar el cumplimiento y la efectividad de los procedimientos.	Auditorías internas, revisiones de conformidad con normas.
Análisis de Desempeño y Evaluación de Datos	Analizar los datos recopilados para identificar tendencias y áreas de mejora.	Análisis de tendencias, informes de desempeño.
Revisión y Ajuste de Procedimientos	Ajustar y mejorar los procedimientos basados en los resultados del análisis y auditorías.	Actualización de manuales, implementación de nuevas prácticas.
Capacitación y Desarrollo Continuo	Proporcionar formación continua sobre los procedimientos y mejores prácticas.	Talleres de formación, sesiones de actualización.
Fomento de la Retroalimentación Continua	Crear canales para recibir retroalimentación sobre la eficacia de los procedimientos.	Encuestas de satisfacción, reuniones de revisión.
Documentación y Comunicación de Cambios	Documentar y comunicar todos los cambios en procedimientos y métodos.	Documentos de cambio, comunicados internos.
Implementación de un Proceso de Mejora Continua	Adoptar un enfoque iterativo para la mejora continua de procedimientos.	Ciclos de retroalimentación, revisiones periódicas del sistema.

Fuente: A partir de (NASA, 2007) (INCOSE, 2015).

Al implementar estas estrategias, se monitorean y evalúan continuamente los procedimientos, ajustando y mejorando los métodos para adaptarse de manera ágil a los cambios desafiantes, lo que garantiza la calidad y el éxito de la misión (INCOSE, 2015; NASA, 2007).

5. RESULTADOS

Para el desarrollo de proyectos espaciales, se definen los objetivos (generales y específicos), así como los resultados y productos asociados a los proyectos.

La implementación de una estrategia sistémica para los proyectos de Ciencia, Tecnología e Innovación (CTeI), basada en sus estructuras comunes, genera capacidades en el programa espacial. Esta implementación se vincula con las regulaciones del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (MinCiencias), permitiendo la adecuada regulación de resultados y productos conforme a la Metodología General Ajustada (MGA) para su control correspondiente.

5.1 Desarrollo de Proyectos Espaciales

La estructura de la ingeniería de sistemas (IS) de un programa espacial surge con la planificación estratégica de la organización y la definición del modelo de ciclo de vida. Bajo la premisa de colaborar con aliados internacionales, se suelen emplear filosofías y estándares específicos, según la agencia espacial o autoridad regulatoria correspondiente, como la ESA, NASA, AEM, entre otras.

Dentro del campo de la IS, existen diversos modelos y metodologías que proporcionan enfoques estructurados para llevar a cabo proyectos de ingeniería de sistemas. No obstante, la selección de estos modelos se basa en tres aspectos fundamentales (INCOSE, 2015; NASA, 2007):

1. **Evaluación inicial:** consiste en evaluar los requisitos del proyecto, analizar los riesgos e identificar las restricciones con los recursos disponibles.
2. **Selección del modelo:** dependiendo de las características del proyecto, se selecciona uno de los siguientes modelos:
 - **Cascada**, para proyectos con requisitos bien definidos y baja incertidumbre.
 - **V**, para proyectos que requieren verificación temprana y continua.
 - **Espiral**, para proyectos con alta incertidumbre o cambios frecuentes.
 - **Específicos de agencias espaciales**, como los definidos por la ESA, NASA o siguiendo las directrices del INCOSE para proyectos específicos de agencias espaciales, adaptados a sus necesidades y estándares.
3. **Implementación:** se planifica y gestiona el proyecto de acuerdo con las fases y actividades definidas por el modelo elegido, asegurando que todas las partes interesadas estén alineadas y que se cumplan los objetivos del proyecto de manera eficiente y eficaz.

En el caso del desarrollo del proyecto FACSAT-2, la ingeniería de sistemas siguió un modelo “V”, que permitió la interacción entre el diseño y las pruebas de verificación y validación, hasta completar la fase E, de Operación y utilización del activo (Rincón-Urbina, y otros, 2023).

Es fundamental establecer una estructura codificada para optimizar el acceso y la gestión de la información dentro del proyecto. Esto incluye la implementación de una metadada estandarizada que asegure la consistencia y facilidad de recuperación de datos, la creación de un repositorio centralizado que facilite la minería de datos y el monitoreo de fallas, así como la utilización de licencias de software de investigación que maximicen la eficiencia y efectividad en el desarrollo del proyecto. Esta estructura garantiza no solo la organización y la integridad de la información, sino también la mejora continua en la calidad del proyecto.

5.2 Generación de la Estructura

El marco de procesos de la ingeniería de sistemas tiene como objetivo proporcionar una guía estructurada y coherente para el desarrollo y gestión de proyectos espaciales. Este marco garantiza que todos los aspectos del sistema sean considerados y gestionados de manera eficiente y efectiva (NASA, 2007). Para ello, es necesario contar con el plan estratégico organizacional, la estrategia de adaptación y las políticas de calidad (INCOSE, 2015).

La cadena de valor integrada en la gestión de calidad se establece para identificar y gestionar las actividades que aseguran que todas las etapas del proceso productivo agreguen valor a la categoría de planificación de proyectos espaciales. Los procedimientos requieren una gestión documental que siga una estructura de gobernanza y el estándar internacional a cumplir (Tabla 18) (Wertz & Larson, 2007; Tubio Pardavila, 2012, p. 39; INCOSE, 2015; NASA, 2007).

Tabla 18. Documentos comunes de planificación de proyectos espaciales

CATEGORÍA	NASA	ESA	AEM
Estudio de Viabilidad	Mission Concept Review (MCR)	Preliminary Design Review (PDR)	Análisis de Factibilidad del Proyecto
Requisitos	System Requirements Review (SRR)	System Requirements Review (SRR)	Revisión de Requisitos del Sistema
Diseño Conceptual	Preliminary Design Review (PDR)	Preliminary Design Review (PDR)	Revisión de Diseño Conceptual
Diseño Detallado	Critical Design Review (CDR)	Detailed Design Review (DDR)	Revisión de Diseño Detallado
Desarrollo y Construcción	Engineering Development and Manufacturing Plan	Engineering Development and Manufacturing Plan	Plan de Desarrollo y Construcción
Pruebas y Validación	Test Readiness Review (TRR)	Test Readiness Review (TRR)	Revisión de Preparación para Pruebas
Integración	Integration and Test Plan	Integration and Test Plan	Plan de Integración y Pruebas
Lanzamiento	Launch Readiness Review (LRR)	Launch Readiness Review (LRR)	Revisión de Preparación para el Lanzamiento
Operación y Mantenimiento	Operational Readiness Review (ORR)	Operational Readiness Review (ORR)	Revisión de Preparación Operativa
Informe Final	Final Report and Lessons Learned	Final Report and Lessons Learned	Informe Final y Lecciones Aprendidas

Fuente: A partir de (Wertz & Larson, 2007), (Tubio Pardavila, 2012, p. 39), (INCOSE, 2015), (NASA, 2007).

Los documentos comunes de planificación de proyectos espaciales, según el estándar seleccionado, se personalizan de acuerdo con las capacidades instaladas, así como con los procesos de aprendizaje y los requisitos funcionales y no funcionales, los cuales responden a las particularidades de cada cliente.

5.3 Protocolos de Articulación

Los protocolos se establecen en función de la complejidad del sistema y del alcance del producto, de las fases del ciclo de vida a desarrollar (concepto, producción, utilización, soporte y retiro del servicio), de los entregables, responsabilidades e interacciones entre los subsistemas y los ingenieros de sistemas, así como de la integración con aspectos no solo de la solución técnica, sino también de la gestión y gerencia del proyecto.

Las normas de ingeniería para proyectos satelitales, basadas en los estándares ECSS de la ESA, definen 88 estándares para proyectos satelitales, que luego se resumen en 15 normas para el desarrollo de misiones con CubeSat, especificando si cada norma aplica en su totalidad y/o requiere ajustes (Tabla 19) (ESA, TEC-SY/128/2013/SPD/RW, 2016).

Tabla 19. Estándares de ingeniería ECSS para proyectos de CubeSat

No	ESPECIFICACIÓN ECSS-E-ST	REFERENCIA	EXCEPCIO- NES -PÁGINAS-
1.	10-02C	Verification	13-14
2.	10-03C	Testing	14-21
3.	10-04C	Space environment	21-22
4.	20C	Electrical and electronic	23-25
5.	20-08C	Rev.1 Photovoltaic assemblies and components	25-27
6.	31C	Thermal control general requirements	27-29
7.	32C Rev.1	Structural general requirements	29-32
8.	32-01C Rev.1	Fracture control	32-33
9.	32-02C	Rev.1 Structural design and verification of pressurised hardware	33
10.	32-08C	Materials	33-34
11.	33-01C	Mechanisms	34-35
12.	35-01C	Liquid and electric propulsion for spacecraft	35-38
13.	50C	Communications	39-42
14.	50-05C	Radiofrequency and modulation	42

No	ESPECIFICACIÓN ECSS-E-ST	REFERENCIA	EXCEPCIO- NES -PÁGINAS-
15.	60-30C	Satellite attitude and orbit control system (AOCS) requirements	43-44

Fuente: (Rincón U, Bastidas B, & Rodríguez A, 2023), a partir de (ESA, TEC-SY/128/2013/SPD/RW, 2016).

Dicha normativa excluida se convierte en una pauta o guía para los contratistas. Esto asegura la coherencia y eficiencia en el cumplimiento de los indicadores clave de rendimiento (KPI), fundamentales para la gestión normativa y la evaluación del progreso del proyecto, facilitando una gobernanza efectiva y transparente (ESA, TEC-SY/128/2013/SPD/RW, 2016; Rincón U, Bastidas B, & Rodríguez A, 2023).

5.4 Evaluación de la Implementación

La aplicación de una evaluación de implementación en proyectos espaciales produce varios resultados clave (INCOSE, 2015; NASA, 2007).

- 1. Optimiza el rendimiento del sistema**, reducción de tiempos inactivos, reduce costos, cumplimiento de normas, mitigación del riesgo y alineación con las regulaciones.
- 2. Mejora continua en la gestión del proyecto**, ajustando adaptativos con metodologías ágiles en la capacidad de respuesta del equipo, fortaleciendo comunicaciones claras y documentación precisa, reduciendo errores y mejorando la colaboración.
- 3. Eficiencia Operativa competitiva**, al mejorar las prácticas de implementación y empleo de herramientas de optimización de procesos, integrando modelos y simulaciones. Con la capacitación continua de competencias del personal.

Todo esto, permite un ajuste continuo y adaptativo, asegura el cumplimiento de estándares, y mejora la coordinación y la calidad general del proyecto, contribuyendo al éxito y sostenibilidad a largo plazo del programa espacial (INCOSE, 2015), (NASA, 2007).

5.5 Relación de Actividades y Resultados por Objetivo

En el marco del análisis y evaluación del desarrollo de la propuesta sistémica, los objetivos específicos del proyecto se desagregan en componentes clave en cinco categorías principales:

1. **Resultados**, que reflejan los logros alcanzados;
2. **Actividades**, que describen las acciones emprendidas para lograr estos resultados;
3. **Indicadores**, que permiten medir el éxito de las actividades realizadas;
4. **Medios de Verificación**, que ofrecen los métodos y documentos utilizados para validar los indicadores;
5. **Productos**, que constituyen los entregables tangibles derivados del proceso.

Esta estructura permite un seguimiento claro y sistemático del progreso del proyecto, asegurando la alineación de las actividades con los objetivos planteados y facilitando la evaluación de su impacto y efectividad.

5.5.1 Resultados y productos del primer objetivo específico

Para el logro de este objetivo, se llevarán a cabo diversas actividades y se obtendrán resultados concretos, como la creación de documentos técnicos y la generación de redes de conocimiento (Tabla 20). Estas actividades incluirán la búsqueda documental en fuentes primarias y secundarias, la investigación y documentación de modelos metodológicos aplicables al espacio, así como la socialización del conocimiento a través de seminarios y publicaciones indexadas. Los productos resultantes de estas acciones abarcarán informes técnicos, artículos en revistas indexadas y la generación de una red de conocimiento, todos verificados mediante registros documentales y listas de asistencia.

Tabla 20. Resultados y productos del objetivo específico 1

RESULTADOS	ACTIVIDADES	INDICADO-RES	MEDIO DE VERIFICA-CIÓN	PRODUCTOS
Estado del Arte	Búsqueda documental en fuentes primarias y secundarias (revistas, libros, etc.)	Un (1) Capítulo en libro resultado de investigación	Documento escrito en repositorio	Número de Capítulos: 1
Documento Tipo Dossier	Investigar y documentar los modelos metodológicos de la Ingeniería de Sistemas con aplicación espacial	Un (1) Informe técnicos tipo Dossier	Documento escrito en repositorio	Número de informes técnicos finales: 1

RESULTADOS	ACTIVIDADES	INDICADORES	MEDIO DE VERIFICACIÓN	PRODUCTOS
		Un (1) artículo tipo Review, enviada a revista indexada en un cuartil	Documento escrito en revista indexada	Número de publicaciones indexadas: 1
		Ejecución de la capacitación de conocimientos técnicos	Registro de capacitaciones	
		Asistencia a la capacitación de conocimientos técnicos	Listas de asistencia por capacitación realizada con firmas	Un (1) seminario certificado de la Capacitación
		Aprobación del examen de conocimientos técnicos	Exámenes realizados y calificados	
Artículo tipo Review, enviada a revista indexada en un cuartil	Búsqueda y selección de la revista indexada donde se realizará la publicación	Entrega de memorias y análisis de la evaluación	Memorias del evento y constancia de recibido	
Generación de una Red de conocimiento	Generación de una Red de conocimiento	Producto resultado de actividades de Apropiación Social del Conocimiento: Participación CTeI (Evento social de divulgación)	Acta de divulgación	Acta, Asistencia con firmas y certificados
Apropiación Social del conocimiento en CTeI	Socialización de la apropiación del conocimiento	Producto resultado de actividades de Apropiación Social del Conocimiento: Generar una Red de Conocimiento	Red creada en la página y montada en MinCiencias	Red de conocimiento generada: 1
		Producto resultado de actividades de Circulación de conocimiento especializado: Participación CTeI (Evento social de divulgación)	Artículo en Boletín trimensual divulgativo de resultados de investigación	Número de boletines informativos: 1

5.5.2 Resultados y productos del segundo objetivo específico

En la Tabla 21 se detallan los resultados esperados, actividades planificadas, indicadores y medios de verificación para el establecimiento de un modelo de estructura de diseño de la arquitectura del Sistema de Información (SI) en el caso PRUEBA. Se incluye la dirección y asesoría de pasantías, trabajos de grado, proyectos de investigación en Maestría y tesis doctorales, así como la generación de la Estructura Desglosada del Trabajo (EDT). Además, se abordan seminarios de capacitación para el personal del programa satelital y la publicación de artículos en revistas indexadas. Estas actividades están orientadas a la apropiación y socialización del conocimiento técnico y científico, fomentando la circulación de conocimiento especializado y la participación en eventos de divulgación.

Tabla 21. Resultados y productos del objetivo específico 2

RESULTADOS	ACTIVIDADES	INDICADORES	MEDIO DE VERIFICACIÓN	PRODUCTOS
Modelo de la estructura de diseño de la arquitectura caso PRUEBA	* Levantamiento de los proyectos del programa Espacial. * Desarrollo de Perfiles, líneas de investigación, proyectos * Diseño de la arquitectura del IS	Un (1) Capítulo en libro resultado de investigación	Documento escrito en repositorio	Número de Capítulos: 1
Dirección o Asesoría de pasantía, trabajo de grado, proyectos de Investigación y tesis doctoral	Dirigir documentos de estudiantes	Ejecución de la Dirección o asesoría Aprobación de la pasantía, trabajo de grado o proyecto de investigación	Documento Escrito en repositorio	Pasantías o trabajos de grado: 2 Proyectos de maestría: 2 Tesis doctoral:1
Generar la EDT	Generación de una matriz de trabajo	Una única matriz del proyecto actualizable	Documento escrito en repositorio de la Institución	EDT
Seminario de Capacitación para el personal del programa satelital	* Escribir el artículo * Búsqueda y selección de la revista indexada donde se realizará la publicación	Un (1) artículo: Sistema de Ingeniería del programa Espacial en Colombia: caso PRUEBA	Documento escrito en revista indexada	Número de publicaciones indexadas: 1

RESULTADOS	ACTIVIDADES	INDICADORES	MEDIO DE VERIFICACIÓN	PRODUCTOS
Seminario de Capacitación para el personal del programa satelital	Socialización de la apropiación del conocimiento	Ejecución de la capacitación de conocimientos técnicos	Registro de capacitaciones	Un (1) seminario certificado de la Capacitación
		Asistencia a la capacitación de conocimientos técnicos	Listas de asistencia por capacitación realizada con firmas	
		Aprobación del examen de conocimientos técnicos	Exámenes realizados y calificados	
		Entrega de memorias y análisis de la evaluación	Memorias del evento y constancia de recibido	Acta, Asistencia con firmas y certificados
		Producto resultado de actividades de Apropiación Social del Conocimiento: Participación CTel (Evento social de divulgación)	Acta de divulgación	
		Producto resultado de actividades de Circulación de conocimiento especializado: Participación CTel (Evento social de divulgación)	2do artículo en Boletín trimestral divulgativo de resultados de investigación	
				Número de boletines informativos: 1

5.5.3 Resultados y productos del tercer objetivo específico

La Tabla 22 muestra cómo las actividades contribuirán a la obtención de indicadores clave y medios de verificación, resultando en productos tangibles que fortalecerán la articulación entre sistemas de ingeniería, la infraestructura de comunicación y toma de decisiones, así como la capacitación del personal del programa satelital. Además, destaca el proceso de socialización y circulación del conocimiento especializado a través de publicaciones y eventos, asegurando una apropiación efectiva del conocimiento generado.

Tabla 22. Resultados y productos del objetivo específico 3

RESULTADOS	ACTIVIDADES	INDICADORES	MEDIO DE VERIFICACIÓN	PRODUCTOS
Procedimiento de articulación entre las secciones de los sistemas de Ingeniería	* Levantamiento de líneas comunes entre proyectos * Ajuste de perfiles y requerimientos * Establecer la redundancia de los sistemas	Un (1) Capítulo en libro resultado de investigación	Documento escrito en repositorio	Número de Capítulos: 1
Infraestructura de comunicación-toma de decisiones	* Descripción de la jerarquía y gobernanza * Planteamiento de la resiliencia * Constitución de los requisitos logísticos	Un (1) Capítulo en libro resultado de investigación	Documento escrito en repositorio	Número de Capítulos: 1
Seminario de Capacitación para el personal del programa satelital	* Escribir el artículo * Búsqueda y selección de la revista indexada donde se realizará la publicación	Un (1) artículo: Sistema de Ingeniería del programa Espacial en Colombia: caso PRUEBA	Documento escrito en revista indexada	Número de publicaciones indexadas: 1
	Socialización de la apropiación del conocimiento	Ejecución de la capacitación de conocimientos técnicos	Registro de capacitaciones	Un (1) seminario certificado de la Capacitación
		Asistencia a la capacitación de conocimientos técnicos	Listas de asistencia por capacitación realizada con firmas	
		Aprobación del examen de conocimientos técnicos	Exámenes realizados y calificados	
		Entrega de memorias y análisis de la evaluación	Memorias del evento y constancia de recibido	
		Producto resultado de actividades de Apropiación Social del Conocimiento: Participación CTel (Evento social de divulgación)	Acta de divulgación	Acta, Asistencia con firmas y certificados

RESULTADOS	ACTIVIDADES	INDICADORES	MEDIO DE VERIFICACIÓN	PRODUCTOS
Seminario de Capacitación para el personal del programa satelital	Socialización de la apropiación del conocimiento	Producto resultado de actividades de Circulación de conocimiento especializado: Participación CTeI (Evento social de divulgación)	3er artículo en Boletín trimestral divulgativo de resultados de investigación	Número de boletines informativos: 1

5.5.4 Resultados y productos del cuarto objetivo específico

La Tabla 23 proporciona una visión detallada de los resultados, indicadores y medios de verificación proyectados. La identificación de requerimientos y ensayos para sistemas de estructuras y mecanismos en diversos proyectos, junto con la implementación de una estrategia sistémica, son aspectos clave. Además, la socialización mediante publicaciones y eventos especializados fortalece la capacidad técnica y científica del programa satelital.

Tabla 23. Resultados y productos del objetivo específico 4

RESULTADOS	ACTIVIDADES	INDICADORES	MEDIO DE VERIFICACIÓN	PRODUCTOS
Informe de la identificación de requerimientos del subsistema Estructuras y mecanismos	* Identificar los requerimientos de acuerdo con la misión * Revisión de fuerzas y restricciones * Condiciones medioambientales * Identificación de materiales a emplear	Un (1) Capítulo en libro resultado de investigación	Documento escrito en repositorio	Número de Capítulos: 2
Informe de la identificación de ensayos del subsistema Estructuras y mecanismos	* Establecer las pruebas * Definir las pruebas * Laboratorios a realizar las pruebas * Estándar que se sigue	Un (1) Capítulo en libro resultado de investigación	Documento escrito en repositorio	Número de Capítulos: 2

RESULTADOS	ACTIVIDADES	INDICADORES	MEDIO DE VERIFICACIÓN	PRODUCTOS
Informe final con la estrategia sistémica implementada de al menos dos proyectos	* Compilación de los resultados del proyecto	Un (1) Capítulo en libro resultado de investigación	Documento escrito en repositorio	Número de Capítulos: 2
	* Edición documental	Un (1) Informe técnicos tipo Dossier	Documento escrito en repositorio	Número de informes técnicos finales: 2
Celebración de jornadas de transferencia de resultados que permitan descubrir y reflexionar sobre las experiencias realizadas del programa satelital	* Escribir el artículo	Un (1) artículo: Sistema de Ingeniería del programa Espacial en Colombia: caso PRUEBA	Documento escrito en revista indexada	Número de publicaciones indexadas: 1
	* Búsqueda y selección de la revista indexada donde se realizará la publicación	Ejecución de la capacitación de conocimientos técnicos	Registro de capacitaciones	Un (1) seminario certificado de la Capacitación
	Socialización de la apropiación del conocimiento	Asistencia a la capacitación de conocimientos técnicos	Listas de asistencia por capacitación realizada con firmas	
		Aprobación del examen de conocimientos técnicos	Exámenes realizados y calificados	
		Entrega de memorias y análisis de la evaluación	Memorias del evento y constancia de recibido	
		Producto resultado de actividades de Apropiación Social del Conocimiento: Participación CTel (Evento social de divulgación)	Acta de divulgación	Acta, Asistencia con firmas y certificados
		Producto resultado de actividades de Circulación de conocimiento especializado: Participación CTel (Evento social de divulgación)	4to artículo en Boletín trimensual divulgativo de resultados de investigación	Número de boletines informativos: 1

5.5.5 Resultados y productos del objetivo general

En la Tabla 24 se presentan los objetivos, resultados y productos esperados, con el fin de establecer un marco claro y eficiente para la generación de conocimiento, la formación del personal y la sostenibilidad del sistema, asegurando que cada componente cumpla con los estándares necesarios y contribuya al avance de la ciencia y la tecnología en el ámbito espacial.

Tabla 24. *Objetivos, resultados y productos de proyectos espaciales*

OBJETIVOS	RESULTADOS	PRODUCTOS
1. Establecer la metodología para la identificación de sistemas de acuerdo con los procesos y estructuras comunes, basándose en la ingeniería de sistemas, para facilitar el crecimiento del programa espacial a través la estandarización de procesos y trabajos colaborativos entre sistemas y con aliados internacionales.	Estado del Arte	Número de Capítulos: 1
	Documento Tipo Dossier	Número de informes técnicos finales: 1
	Artículo tipo Review, enviada a revista indexada en un cuartil	Número de publicaciones indexadas: 1
	Generación de una Red de conocimiento	Un (1) seminario certificado de la Capacitación
	Apropiación Social del conocimiento en CTeI	Acta, Asistencia con firmas y certificados
2. Generar la estructura de los sistemas de ingeniería de los proyectos espaciales, para asegurar que todos los aspectos del sistema sean considerados y gestionados de manera eficiente y efectiva por medio de la implementación de metodologías y prácticas estandarizadas que faciliten la integración, verificación, y validación de los subsistemas, así como la gestión de riesgos y el cumplimiento de los requisitos del proyecto.		Red de conocimiento generada: 1
		Número de boletines informativos: 1
	Modelo de la estructura de diseño de la arquitectura caso PRUEBA	Número de Capítulos: 1
	Dirección o Asesoría de pasantía, trabajo de grado, proyectos de Investigación y tesis doctoral	Dirección o Asesoría de dos pasantías o trabajos de grado: 2 Dirección o Asesoría de dos proyectos de Investigación en grado de maestría: 2 Dirección o Asesoría de una tesis doctoral: 1
	Generar la EDT	EDT
		Número de publicaciones indexadas: 1
	Seminario de Capacitación para el personal del programa satelital	Un (1) seminario certificado de la Capacitación
		Acta, Asistencia con firmas y certificados
		Número de boletines informativos: 1

OBJETIVOS	RESULTADOS	PRODUCTOS
3. Diseñar protocolos de articulación que personalicen la estabilidad y operación continua de los sistemas, para asegurar la integración efectiva y la continuidad operativa en proyectos espaciales, a partir de aspectos clave como tipos de implementación, enfoque, ciclo de vida e interdisciplinariedad.	Procedimiento de articulación entre las secciones de los subsistemas de Ingeniería	Número de Capítulos: 1
	Infraestructura de comunicaciones y toma de decisiones	Número de Capítulos: 1
		Número de publicaciones indexadas: 1
	Seminario de Capacitación para el personal del programa satelital	Un (1) seminario certificado de la Capacitación
		Acta, Asistencia con firmas y certificados
4. Establecer y evaluar procedimientos de implementación para dirigir la mejora continua en función de la implementación de una estrategia sistémica, a través del uso de KPIs, sistemas de monitoreo, auditorías periódicas y análisis de datos, permitiendo ajustes y mejoras continuas en los métodos.		Número de boletines informativos: 1
	Informe de la identificación de requerimientos del sistema Estructuras y mecanismos	Número de Capítulos: 2
	Informe de la identificación de ensayos del sistema Estructuras y mecanismos	Número de Capítulos: 2
	Informe de la evaluación de procedimientos de implementación	Número de Capítulos: 2
	Informe final con la estrategia sistémica implementada de al menos dos proyectos	Número de Capítulos: 2
		Número de informes técnicos finales: 2
	Celebración de jornadas de transferencia de resultados que permitan descubrir y reflexionar sobre las experiencias realizadas del programa satelital	Número de publicaciones indexadas: 1
		Un (1) seminario certificado de la Capacitación
		Acta, Asistencia con firmas y certificados
		Número de boletines informativos: 1

5.6 CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

La Tabla 25 presenta una planificación detallada de actividades y sus correspondientes períodos para el proyecto sistémico espacial en CTeI. Esta planificación abarca desde la metodología de trabajo inicial, que incluye la búsqueda documental y la investigación de modelos, hasta la validación final del sistema, que contempla la identificación de requerimientos y los ensayos de los subsistemas.

Tabla 25. Cronograma de actividades

	ACTIVIDAD	PERIODOS (Meses)											
		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
1.	METODOLOGÍA DE TRABAJO												
1.1	Búsqueda documental												
1.2	Investigación y documentación de modelos												
1.3	Socialización del Objetivo 1												
1.3.1	Publicación en revista indexada												
1.3.2	Apropiación Social del conocimiento en CTel												
1.3.3	Seminario de capacitación												
1.3.4	Generación de una Red de conocimiento												
1.3.5	Administración de la implementación propuesta												
2.	ESTRUCTURA DE LOS SISTEMAS												
2.1	Diseño de la arquitectura del SI												
2.1.1	Levantamiento de los proyectos del programa Espacial												
2.1.2	Planteamiento de los componentes												
2.1.3	Desarrollo de Perfiles, líneas de investigación y proyectos												
2.1.4	Generación de una matriz de trabajo												
2.2	Socialización del Objetivo 2												
2.2.1	Publicación en revista indexada												
2.2.2	Apropiación Social del conocimiento en CTel												
2.2.3	Seminario de capacitación												
3.	PROTOCOLOS DE ARTICULACIÓN												
3.1	Articulación entre las secciones de los sistemas de Ingeniería												
3.1.1	Levantamiento de líneas comunes entre proyectos												
3.1.2	Ajuste de perfiles y requerimientos												

	ACTIVIDAD	PERIODOS (Meses)											
		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
3.1.3	Constitución de la redundancia de los sistemas												
3.2	Infraestructura de comunicación-toma de decisiones												
3.2.1	Descripción de la jerarquía y gobernanza												
3.2.2	Planteamiento de la resiliencia												
3.2.3	Definición de los requisitos logísticos												
3.3	Socialización del Objetivo 3												
3.3.1	Publicación en revista indexada												
3.3.2	Apropiación Social del conocimiento en CTel												
3.3.3	Seminario de capacitación												
4.	VALIDACIÓN DEL SISTEMA												
4.1	Identificación de requerimientos del subsistema												
4.1.1	Revisión de fuerzas y restricciones												
4.1.2	Condiciones medioambientales												
4.1.3	Identificación de materiales a emplear												
4.2	Identificación de ensayos del subsistema de validación												
4.2.1	Establecer las pruebas												
4.2.2	Definir las pruebas												
4.2.3	Laboratorios a realizar las pruebas												
4.2.4	Estándar que se sigue												
4.3	Informe Final con la estrategia sistémica												
4.3.1	Compilación de los resultados												
4.3.2	Edición documental												
4.4	Socialización del Objetivo 4												
4.4.1	Publicación en revista indexada												
4.4.2	Apropiación Social del conocimiento en CTel												
4.4.3	Seminario de capacitación												

Cada fase del proyecto se distribuye cuidadosamente a lo largo de 24 meses, con actividades específicas como la socialización de objetivos, la elaboración de documentos y la realización de seminarios de capacitación. Este enfoque cronológico y estructurado no solo facilita el seguimiento exhaustivo del progreso, sino que también asegura una adecuada alineación con los objetivos establecidos y los plazos programados, promoviendo una gestión eficiente y efectiva.

6. CONCLUSIONES

Se propone implementar una estrategia sistémica para optimizar la eficiencia, efectividad y sostenibilidad de los proyectos espaciales en Colombia, contribuyendo al avance del sector aeroespacial y al desarrollo de capacidades tecnológicas en la región.

Los objetivos establecidos son los siguientes:

- **Objetivo General:** Se propone una estrategia sistémica para la implementación de la ingeniería de sistemas en un programa espacial, teniendo en cuenta los tipos de implementación, el enfoque, el ciclo de vida y la interdisciplinariedad, con el objetivo de optimizar la ejecución de proyectos de Ciencia, Tecnología e Innovación (CTeI) espaciales.
- **Objetivos Específicos:**
 1. **Metodología:** Se debe establecer una metodología para la identificación de sistemas, de acuerdo con los procesos y estructuras comunes, basándose en la ingeniería de sistemas. Esto facilitará el crecimiento del programa espacial a través de la estandarización de procesos y la colaboración con aliados internacionales.
 2. **Estructura de Sistemas:** Generar la estructura de los sistemas de ingeniería para los proyectos espaciales, asegurando que todos los aspectos del sistema sean considerados y gestionados de manera eficiente y efectiva. Esto se logrará mediante la implementación de metodologías y prácticas estandarizadas que faciliten la integración, verificación y validación de subsistemas, así como la gestión de riesgos y el cumplimiento de los requisitos.
 3. **Protocolos de Articulación:** Diseñar protocolos de articulación que personalicen la estabilidad y operación continua de los sistemas, asegurando la integración efectiva y la continuidad operativa en los proyectos espaciales, considerando aspectos clave como los tipos de implementación, el enfoque, el ciclo de vida y la interdisciplinariedad.
 4. **Mejora Continua:** Establecer y evaluar procedimientos de implementación para dirigir la mejora continua en función de la estrategia sistémica, utilizando KPIs, sistemas de monitoreo, auditorías periódicas y análisis de datos, lo que permitirá realizar ajustes y mejoras continuas en los métodos.

En conclusión, la propuesta de una estrategia sistémica para la implementación de la ingeniería de sistemas en el programa espacial colombiano es crucial para optimizar los proyectos de CTeI. Aunque se basa en metodologías robustas validadas por organismos internacionales, enfrenta desafíos significativos, especialmente debido a la falta de personal especializado en la Fuerza Aérea Colombiana, lo que podría

limitar la autonomía del programa. Es fundamental continuar adaptando los modelos metodológicos a las realidades locales y fortalecer la formación académica en el sector, lo que facilitará la transferencia de conocimientos y habilidades necesarias.

La gestión del cambio, mediante el modelo de Kotter, permitirá abordar las necesidades específicas del sector aeroespacial, promoviendo una cultura organizacional que fomente la innovación y el desarrollo sostenible. La colaboración interinstitucional y el fortalecimiento de la capacitación del personal son esenciales para asegurar el éxito de esta estrategia, garantizando un futuro prometedor para la industria espacial en Colombia.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AEM. (2016). Mejores prácticas para el diseño de Cubesats. Foro, Secretaría de Comunicaciones y Transportes -SCT, Agencia Espacial Mexicana -AEM, Jalisco 2016. Recuperado el 12 de Julio de 2021, de <https://docplayer.es/77363921-Mejores-practicas-para-el-diseno-de-cubesats.html>
- AEM. (2019). Secretaria de comunicacion y transportes. Obtenido de http://www.educacionespacial.aem.gob.mx/images/normateca/pdf/CURSO_ISE/Modulo_3.pdf
- EIA632A. (2021). Processes for Engineering a System. Information Report, SAE International. doi:<https://doi.org/10.4271/EIA632A>
- Cappelletti, C., Battistini, S., & Malphrus, B. K. (2021). Cubesat Handbook from mission desing to operations. London: Elsevier. Recuperado el 23 de Julio de 2021, de <https://www.elsevier.com/books-and-journals>
- CMMI Product Team. (2002). Capability Maturity Model. Integration (CMMI), Version 1.1, Carnegie Mellon University, Software Engineering Institute.
- Dallamuta, J. P., & Rocha de Oliveira, M. (2023). Space missions in South America: Profile and evolutionary perspective of their development. Acta Astronautica, 9-17. doi:<https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2023.02.008>
- Doran, T. (15 de MAY de 2006). IEEE 220: for practical systems engineering. Computer, 39(5), 92-94. doi:doi: 10.1109/MC.2006.164
- Duarte Muñoz, C. (02 de Abril de 2018). Hacia el Espacio. Recuperado el 22 de Agosto de 2021, de <http://haciaelespacio.aem.gob.mx/revistadigital/articul.php?interior=780>
- ECSS. (2017). Ingeniería Espacial - Requerimientos generales de Sistemas de ingeniería. Noordwijk, Holanda: ESA Requirements and Standards Division. doi:<https://ecss.nl/standard/ecss-e-st-10c-system-engineering-general-requirements/>
- Elm, J. P., Goldenson, D. R., El Emam, K., Donatelli, N., & Neisa, A. (2008). A Survey of Systems Engineering Effectiveness - Initial Results (with detailed survey response data). SPECIAL REPORT CMU/SEI-2008-SR-034, Software Engineering Institute -SEI; National Defense Industrial Association - NDIA;) Systems Engineering Effectiveness Committee (SEEC) , National Defense Industrial Association. Obtenido de <http://www.sei.cmu.edu/>

- ESA, ECSS-E-ST-10C. (2009). SESS - Systems Engineering Standards And Specifications. Norma, ECSS, Requirements & Standards Division, Noordwijk, The Netherlands. Obtenido de <http://everyspec.com/ESA/download.php?spec=ECSS-E-ST-10C.047801.pdf>
- ESA, TEC-SY/128/2013/SPD/RW. (2016). Tailored ECSS Engineering Standards for In-Orbit. Demonstration CubeSat Projects. ESA. TEB. Obtenido de https://copernicus-masters.com/wp-content/uploads/2017/03/IOD_CubeSat_ECSS_Eng_Tailoring_Iss1_Rev3.pdf
- Firesmith, D. (2009). The Method-Framework for Engineering System Architectures (MFESA). In System and Software Technology Conference (SSTC), 1, pág. 153. Pittsburgh, Pensilvania. Obtenido de https://resources.sei.cmu.edu/asset_files/Presentation/2009_017_001_23622.pdf
- IEEE P1220. (1994). Standard for system engineering-a commercial standard for improving competitiveness. Norma, IEEE, Fort Worth, TX, USA. doi:<https://doi.org/10.1109/DASC.1993.283580>
- INCOSE. (30 de julio de 2015). Introduction To Model-Based System Engineering (MBSE) and SysML. doi:<https://www.incose.org/docs/default-source/delaware-valley/mbse-overview-incose-30-july-2015.pdf>
- INCOSE. (2015). Systems Engineering Handbook (Cuarta ed.). (D. Walden, G. Roelder, K. Forsberg, D. Hamelin, & T. Shortell, Edits.) San Diego, California, EEUU: Wiley. Obtenido de <https://img1.wsimg.com/blobby/go/a430a7ae-a333-4c88-af76-fd5624bfdbdd/downloads/INCOSE%20Systems%20Engineering%20Handbook%204e%202015%2007.pdf?ver=1604878104477>
- JAXA. (2013). Research on the technology of space systems. Documento informativo, Japan Aerospace Exploration Agency -JAXA. Obtenido de <https://www.kenkai.jaxa.jp/eng/research/system/system.html>
- King, J. T., Kolbeck, J., Kang, J. S., Sanders, M., & Keidar, M. (2021). Performance analysis of nano-sat scale μ CAT electric propulsion for 3U CubeSat attitude control. (E. Ltda, Ed.) Acta Astronautica, 178, 722-732. doi:<https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.10.006>
- Kotter, J. P. (2007). Que Hacen Los Lideres. (G. Planeta, Ed.)
- NASA. (2007). Systems Engineering Handbook. Washington, D.C., Estados Unidos: National Aeronautics and Space Administration. doi:https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/nasa_systems_engineering_handbook.pdf
- NASA. (12 de Diciembre de 2019). Nasa. Recuperado el 30 de Agosto de 2021, de https://www.nasa.gov/seh/2-1_technical-processes
- Ortega, G. (14 de Octubre de 2009). <https://www.gr.ssr.upm.es/>. Recuperado el 22 de Agosto de 2021, de Grupo de Radiación: https://www.gr.ssr.upm.es/docencia/grado/csat/picosatelites/LN11_Sesion2_Analysis_of_Space_Missions_GOrtega.pdf
- Rincón U, S. R., Bastidas B, E. J., & Rodriguez A, C. A. (2024). Factibilidad del desarrollo del FACSAT-2 (Vol. I). Cali, Valle del Cauca, Colombia: FAC.
- Rincón-Urbina, S. R., Cardenas-García, J. M., Pirazán-Villanueva, K. N., Acero-Niño, I. F., Hurtado-Velasco, R. H., & Cortés-García, E. D. (2023). Diseño crítico del

- nanosatélite de la misión FACSAT-2 para la observación y análisis del territorio Colombiano. *RUI*, 22(3), 68-86.
- Robledo Asencio, J. C., Rincón Urbina, S. R., Cardenas Garcia, J. M., Mendez Gomez, J. E., & Salek Chaves, D. Z. (2023). System Engineering Approach for the Implementation Project of the Colombian Aerospace Force's (FAC). Assembly, Integration, and Testing (AIT) Laboratory. 14° WETE Workshop em Engenharia e Tecnologia Espaciais, (págs. 1-10). Brasil.
- Rodriguez A., C. A. (2019). Implementación de una estrategia sistémica de los proyectos del programa espacial de la FAC. Propuesta Postdoctoral, Centro de investigación en Estudios Aeroespaciales -CITAE, I+D+i, Cali.
- Rodríguez-Pirateque, G. W., Sofrony Esmeral, J., Cortés García, E. D., & Rueda, K. (19 de Septiembre de 2020). Diseño de misión, síntesis de factores operacionales y representaciones del segmento espacial, caso FACSAT y EMFF. *Ciencia y Poder Aéreo*, 15(2), 143-165. doi:<https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaereo.678>
- Sarafin, T. P., Doukas, P. G., McCandless, J. R., & Britton, W. R. (2007). Structures and Mechanisms. En J. R. Wertz, & W. J. Larson, *Space Mission Analysis and Design* (págs. 459–518).
- Sellers, J. J. (2007). Understanding space: an introduction to astronautics (Tercera ed.). (D. Kirkpatrick, Ed.) New York, New York, EEUU: McGraw-Hill.
- Selva, D., & Krejci, D. (2012). A survey and assessment of the capabilities of Cubesats for Earth observation. *Acta Astronautica*, 74, 50–68. doi:<https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2011.12.014>
- Sheard, S. A. (2000). Three Types of Systems Engineering Implementation. Proceedings of the Tenth International Symposium of the International Council on Systems Engineering (pág. 9). Minneapolis: INCOSE International Symposium. Obtenido de All three types. Figure 1 shows how the three types
- Shiotani, B. (2018). Project life-cycle and implementation for a class of small satellites. Florida, Estados Unidos: University of Florida. Recuperado el 31 de Agosto de 2021, de https://s3vi.ndc.nasa.gov/ssri-kb/static/resources/SHIOTANI_B.pdf
- Tubio Pardavila, R. (2012). Ingeniería de Sistemas basada en Estándares ECSS aplicada al diseño, fabricación, integración, validación y operación de pico, nano y microsátélites. Aplicación a la Constelación HUMSAT. Vigo, España: Universidad de Vigo. doi:<https://core.ac.uk/download/pdf/54205042.pdf>
- Wasson, C. S. (2012). Formulation and Development of the Wasson System Engineering Process Model. ASEE Southeast Section Conferen.
- Wertz, J. R., & Larson, W. J. (2007). *Space Mission Analysis and Design*. El segundo, California, Estados Unidos: Space Technology Library. Recuperado el 30 de Agosto de 2023

CAPÍTULO 4.

EMPRENDIMIENTO DE BASE TECNOLÓGICA EN EL ÁMBITO UNIVERSITARIO: IMPULSANDO LA INNOVACIÓN EMPRESARIAL

Alberto De Jesús Pastrana Palma

Universidad Autónoma de Querétaro, México

<http://orcid.org/0000-0002-0070-6017>

pastrana@uaq.mx

Raúl Arturo Alvarado López

Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías –

Universidad Autónoma de Querétaro, México

<https://orcid.org/0000-0002-2990-7963>

raalvarado@conahcyt.mx y raul.alvarado@uaq.mx

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, se ha puesto sobre el escenario internacional la necesidad de reorientar la razón de ser de las universidades, especialmente las públicas. Además de la enseñanza y la investigación, se propone incorporar una tercera misión, que hace referencia a la aplicabilidad y comercialización del conocimiento generado y acumulado en ellas. Según Sutz (2000) y Arocena y Sutz (2001), dicha misión debe fundamentarse en tres ejes medulares: 1) el emprendimiento, 2) la innovación y 3) el compromiso social.

De esta manera, surge el concepto de la universidad emprendedora, que, en términos generales, plantea la necesidad de poner en práctica esta tercera misión. Esto vincula necesariamente a la universidad con su entorno, convirtiéndola en un agente que genera, a la vez, valor económico y social (también denominado “derramas”), fundamentado en el uso intensivo del conocimiento generado y acumulado en su interior.

Para Corti y Riviezzo (2008), la universidad emprendedora debe basarse en un modelo de innovación interactivo, que parte de la identificación de los problemas que enfrenta la industria y los retos que afronta la sociedad, buscando soluciones a través de la ciencia y la tecnología. Al respecto, Clark (2004) señala que las universidades lograrán ser emprendedoras cuando no temen maximizar el potencial de comercialización y difusión de sus ideas para crear valor (económico y/o social), sin que se vean comprometidas sus actividades fundamentales de enseñanza e investigación, sus valores académicos-culturales y, sobre todo, su compromiso hacia la sociedad.

La formación de capital humano calificado y la generación de tecnología de frontera son la base de la innovación y la competitividad de cualquier nación, en donde las universidades juegan un papel fundamental en dicho proceso. Por tal razón, Etzkowitz et al. (2000) señalan que la universidad es un actor central dentro de cualquier sistema de innovación, ya que, además de formar profesionales, genera, almacena y distribuye conocimiento con un fuerte compromiso social. Por lo tanto, las empresas de base tecnológica que surgen desde el ámbito universitario son un elemento clave en la complementariedad entre la industria y la universidad, ya que se gestan gracias a grupos de investigación formales y a sus infraestructuras tecnológicas (laboratorios y otros espacios de docencia e investigación), atendiendo diversos retos o necesidades globales, pero sobre todo los desafíos regionales.

En el panorama empresarial actual, caracterizado por constantes cambios, el emprendimiento de base tecnológica desempeña un papel crucial en la creación y difusión de innovaciones disruptivas. En el contexto de las empresas universitarias, esta dinámica cobra aún más relevancia, ya que la intersección entre la academia y la empresa se convierte en un catalizador para el desarrollo tecnológico y la creación de valor económico y social. En este sentido, el objetivo de este capítulo es explorar algunas de las oportunidades y desafíos específicos que enfrentan las empresas universitarias al embarcarse en iniciativas tecnológicas, desde la identificación de ideas innovadoras hasta la implementación de modelos de negocio sostenibles. Para ello, desde una base teórica, se presentan algunos casos de éxito que pueden servir de referencia.

Este capítulo se divide en seis apartados: el primero corresponde a esta introducción, el segundo presenta la revisión de la literatura, el tercero corresponde a la metodología, el cuarto y quinto abordan el desarrollo y los resultados, respectivamente. Finalmente, en el sexto se presentan algunas conclusiones.

Palabras clave: Transferencia de Tecnología, Emprendimiento, Innovación, Universidad.

2. REVISIÓN DE LA LITERATURA

Retos de las universidades hacia el impulso de emprendimientos de base tecnológica

Para Fernández (2009), en el contexto de la globalización, una de las principales demandas sociales hacia la universidad está relacionada con la formación de personal competente para gestionar el conocimiento más avanzado en diversas profesiones y campos técnicos. Este personal debe contar con capacidades suficientes para participar en la generación de nuevo conocimiento y contribuir a los procesos de innovación mediante su difusión en los contextos económico y social. El objetivo de esta formación es contribuir al crecimiento y la competitividad de las economías nacionales y locales, favorecer la cohesión social, y colaborar en el fortalecimiento y perfeccionamiento de las organizaciones y marcos institucionales necesarios para la gobernabilidad democrática y la seguridad.

Este panorama lleva inevitablemente a que las universidades transiten hacia procesos de enseñanza fundamentados en un concepto amplio de formación, que incluya no solo capacidades cognitivas y funcionales, sino también valores, ética, responsabilidad y, sobre todo, la capacidad de reflexionar críticamente sobre la sociedad y su entorno. Además, las universidades se ven obligadas a establecer competencias que permitan generar esas “derramas” hacia la sociedad y/o la economía, con el fin de cumplir con la denominada tercera misión de la universidad.

La realidad es que las capacidades de investigación de las universidades son esenciales para afrontar los desafíos de nuestros días, dado que gran parte de las soluciones provienen de la ciencia, la tecnología y la innovación. Esto quedó especialmente demostrado durante la emergencia sanitaria mundial provocada por la COVID-19. Por lo tanto, las universidades tienen el potencial de desarrollar soluciones tecnológicas que impacten positivamente las grandes necesidades de la sociedad, siempre bajo un enfoque ético. En este contexto, el impulso hacia la creación de empresas de base tecnológica puede generar círculos virtuosos que beneficien a la sociedad en su conjunto. Algunas de las principales características y beneficios que pueden aportar las empresas universitarias de base tecnológica se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1. *Principales características de las empresas universitarias de base tecnológica*

Características	● Se crean a partir de tecnologías generadas en la universidad (intensivas en conocimiento). ● Son originadas en el entorno universitario. ● Constituyen un puente directo entre la capacidad innovadora y el mercado de bienes y servicios. ● Están fundadas con participación de personal universitario y/o con apoyo de la institución académica matriz. ● Mantienen, al menos en sus primeras etapas, relaciones estrechas con la institución académica de origen. ● Son flexibles, basadas en la innovación y capaces de adaptarse a los cambios. ● Son empresas en su mayoría pequeñas, con poco personal pero que ofrecen bienes y servicios de alto valor añadido.
-----------------	--

Fuente: Elaboración propia a partir de Ministerio de Educación y Ciencia, España (2008, p. 8).

Sin embargo, la realidad es que las instituciones educativas, especialmente las universidades, enfrentan varios retos al fomentar la generación de emprendimientos de base tecnológica. Algunos de estos desafíos incluyen:

- a. Cultura Institucional:** En muchos casos, las universidades mantienen una cultura arraigada en la investigación académica tradicional, lo que puede dificultar la adopción de una mentalidad emprendedora. Por ello, es necesario promover una cultura que impulse la innovación, el riesgo calculado y el espíritu empresarial entre toda la comunidad universitaria, particularmente en los profesores, investigadores y estudiantes.

- b. Transferencia de Tecnología:** La transferencia de tecnología desde la investigación académica al mercado comercial puede ser un proceso complejo y costoso. Las universidades deben establecer mecanismos eficientes para proteger la propiedad intelectual, negociar licencias y colaborar con empresas para llevar los resultados de la investigación al mercado.
- c. Financiamiento:** Los emprendimientos de base tecnológica requieren una inversión significativa en investigación y desarrollo, así como en actividades de comercialización, difusión y divulgación. Las universidades necesitan desarrollar estrategias para obtener financiamiento inicial, ya sea a través de fondos internos, subvenciones gubernamentales, inversores ángeles o capital de riesgo.
- d. Formación y Apoyo Empresarial:** Muchos estudiantes y profesores carecen de experiencia en el desarrollo y gestión de empresas. En este sentido, las universidades deben ofrecer programas de formación y apoyo empresarial que proporcionen las habilidades, capacidades y herramientas necesarias para convertir ideas tecnológicas en empresas viables.
- e. Colaboración Interdisciplinaria:** El desarrollo de tecnologías innovadoras a menudo requiere la colaboración entre múltiples disciplinas académicas y áreas de investigación. Las universidades deben fomentar la colaboración interdisciplinaria entre facultades, departamentos y centros de investigación para abordar desafíos complejos y aprovechar oportunidades emergentes.

Estos retos derivan de la necesidad de adaptarse a entornos cada vez más globalizados y competitivos. Tal como señala Fernández (2009), la globalización ha transformado las relaciones entre la universidad y la sociedad, dado que el poder intelectual universitario y los derechos asociados a éste se confrontan con el mercado y la necesidad de difundir los beneficios del conocimiento avanzado hacia toda la sociedad, en la que el sector productivo no es ajeno.

En este contexto, las universidades, a través de la profesionalización de la docencia, la internacionalización de la investigación, el intercambio académico, la gestión de la propiedad intelectual, y sobre todo mediante el impulso del emprendimiento, pueden afrontar los retos señalados y, a la vez, fomentar la innovación intensiva de base tecnológica.

Al respecto el Ministerio de Educación y Ciencia (MEC) de España (2008), señala que:

Es preciso reconocer la importancia que tiene la transferencia de conocimiento desde el mundo académico al sector productivo. Se hace cada vez más necesario acercar la investigación al conjunto de la sociedad y generar las condiciones necesarias para que de este acercamiento surjan instrumentos eficaces para lograr una verdadera economía basada en el conocimiento. La transferencia del conocimiento desde el ámbito público y académico hacia el tejido social, y particularmente hacia las estructuras productivas, se convierte en uno de los mecanismos más determinantes para fomentar la productividad de los países y con ello impulsar la generación de empleo y la cohesión social. (p. 5)

Sin lugar a dudas, la creación de empresas de base tecnológica en el ámbito universitario es uno de los mecanismos más eficaces para transferir los resultados de la investigación académica al sector productivo con un alto valor agregado.

Es importante señalar que la transición hacia una sociedad basada en el conocimiento requiere que el emprendimiento y el conocimiento sean reconocidos como fuerzas impulsoras de la innovación y el crecimiento económico. En este sentido, la universidad debe asumir su rol, reconociendo su potencial como organizadora, productora y difusora de conocimiento, y buscando su adaptación a entornos cada vez más competitivos (Guerrero y Urbano, 2012). Esto no implica abandonar sus funciones fundamentales de investigación y docencia, sino potenciar sus capacidades en estos ámbitos. A continuación, se presentan algunas de las principales funciones que tiene el impulso de empresas de base tecnológica desde las universidades, las cuales se detallan en la Tabla 2.

Tabla 2. Principales impactos de las empresas de base tecnológica desde las universidades

Su importancia	Contribuyen a:
	● Establecer y estrechar las relaciones universidad-empresa.
	● Impulsar la actividad económica y la generación de empleo cualificado.
	● Potenciar la transferencia de los resultados de la investigación y difundir de manera rápida nuevas tecnologías en el mercado.
	● Configurar un efecto de arrastre o «tractor» para otras iniciativas emprendedoras.
	● Ofrecer nuevas alternativas laborales.
	● Modernizar las estructuras del tejido productivo.

Fuente: Elaboración propia a partir de Ministerio de Educación y Ciencia, España (2008, p. 9).

Es necesario señalar que el impulso a los procesos de transferencia de conocimiento mediante la creación de empresas de base tecnológica en las universidades se ha planteado como una de las principales estrategias para fomentar la competitividad empresarial. Como lo señala el Ministerio de Educación y Ciencia de España (2008, p. 8): “El alineamiento del entorno académico y el mundo empresarial es fundamental para permitir un verdadero flujo de información de doble vía, ya que facilita la introducción de una cultura emprendedora en la universidad, así como de una cultura de innovación continua en la empresa”. Como se puede observar en la Figura 1, esto requiere no solo garantizar la generación de conocimiento de frontera, sino también contar con los mecanismos que aseguren su transferencia desde las universidades hacia el exterior. Esto implica, al mismo tiempo, la existencia de mecanismos de absorción por parte del mercado y la sociedad, lo que conlleva el impulso de políticas públicas, planes y programas que favorezcan la conformación y consolidación de dichas empresas, atendiendo a los problemas que enfrenta la industria y/o la sociedad.

Figura 1. Componentes de la Universidad Emprendedora

Fuente: Elaboración propia a partir de Audretsch, 2012, p. 318.

Así, el reto, además de garantizar una investigación básica pertinente y de transitar hacia la investigación aplicada desde el enfoque de la universidad emprendedora, es desarrollar los mecanismos necesarios para facilitar la difusión del conocimiento desde el núcleo de la ciencia, la tecnología y la investigación hacia su comercialización y/o aplicación en el contexto social y/o productivo.

Identificación de Ideas Innovadoras

Históricamente la universidad ha jugado un papel preponderante en el desarrollo de las sociedades modernas, como lo señala Kaplan (2000):

Es el resultado y parte del progreso general de la modernidad, que desde la Edad Media y durante varios siglos se despliega en Europa occidental en los contextos configurados por la emergencia y avance del Estado nacional, el capitalismo, la industrialización, los conflictos de clases, grupos e instituciones, los cambios culturales-ideológicos y políticos, la democratización, la internacionalización de la economía y el sistema político interestatal. (p. 102)

Al respecto, Herrera y Suárez (2021) señalan que las universidades forman parte de los sistemas de innovación y, por lo tanto, son piezas clave para el fortalecimiento de los territorios y sectores productivos más desfavorecidos. En especial, la universidad pública, en su esencia, contribuye de manera favorable a la erradicación de las desigualdades en las regiones en las que se encuentra. Sin embargo, entre los retos a los que se enfrenta se encuentra la difusión de su conocimiento y los beneficios hacia toda la sociedad, así como el impulso al crecimiento económico fundamentado en la transferencia del conocimiento y la tecnología.

En esta línea, Audretsch (2012) señala que la transición hacia una universidad emprendedora radica en la adaptación a los actuales requerimientos de las sociedades, con el desarrollo de nuevos campos académicos y áreas de investigación orientadas a la generación de conocimiento que resuelva problemas y desafíos específicos que enfrenta la sociedad, así como a aprovechar las oportunidades que ofrecen las nuevas tecnologías. Por lo tanto, la relevancia de la aplicabilidad se establece como el eje rector de los nuevos campos y áreas de conocimiento, enfocados en proporcionar soluciones y aplicaciones innovadoras a los principales problemas sociales o soluciones específicas requeridas por el mercado.

Algunas de las actividades e iniciativas que deben impulsarse para garantizar la identificación de ideas innovadoras y, de esta manera, transitar hacia una universidad emprendedora como factor clave en el sistema de innovación, incluyen al menos el desarrollo, validación tecnológica e implementación de modelos de negocio sostenibles, como se describe a continuación:

- **Desarrollo y Validación Tecnológica:** Una vez identificadas las ideas, es crucial llevar a cabo un proceso riguroso de desarrollo y validación tecnológica. Esto implica la investigación y el desarrollo de prototipos, pruebas de concepto y validación en entornos controlados. Las empresas universitarias pueden aprovechar los recursos y la infraestructura disponibles en el campus, así como establecer colaboraciones con empresas externas y centros de investigación para avanzar en el desarrollo de sus tecnologías. Por ejemplo, la Universidad de Massachusetts ha establecido una serie de centros de investigación y desarrollo tecnológico que colaboran estrechamente con la industria para llevar la innovación al mercado.
- **Implementación de Modelos de Negocio Sostenibles:** El éxito de los emprendimientos de base tecnológica depende en gran medida de la capacidad de las empresas para implementar modelos de negocio sostenibles que generen ingresos y escalabilidad a largo plazo. En este sentido, las empresas universitarias deben considerar aspectos como la definición de segmentos de mercado objetivo, la creación de propuestas de valor diferenciadas y la identificación de fuentes de financiamiento adecuadas, incluyendo subvenciones de investigación, inversión de capital de riesgo y colaboraciones con la industria.

Para lo anterior, un elemento central es garantizar la colaboración multidisciplinaria al interior de la universidad. Como señalan Mallén y Castillo (2022), en los nuevos entornos laborales y ante las tendencias emergentes del emprendimiento, la multidisciplinariedad en la educación universitaria ofrece una experiencia enriquecedora para los estudiantes, brindándoles nuevas habilidades y capacidades relevantes para el mundo real.

En particular, la universidad pública enfrenta enormes retos y transformaciones sociales, económicas, demográficas, políticas y tecnológicas, que impactan el modo de trabajar, de relacionarse, y de entender la docencia, la investigación y la vinculación. Esto ha motivado cambios radicales en la universidad actual. Hoy vivimos en un sistema híbrido, entre lo tradicional y lo innovador, arrastrando costumbres, atendiendo demandas actuales y planeando soluciones para problemas futuros. Se actúa con los

esquemas de la institución tradicional, pero al mismo tiempo se incorporan algunas soluciones a las exigencias presentes y futuras (Pastrana, Alvarado y Muñoz, 2022).

3. METODOLOGÍA

El abordaje metodológico es de carácter cualitativo, fundamentado en una investigación documental teórico-exploratorio basado en análisis de casos de estudio internacionales exitosos.

Para lo anterior, se realizó una revisión de literatura para identificar y validar conceptos relacionados con emprendimiento de base tecnológica, innovación y el papel de la universidad en los mencionados conceptos.

4. DESARROLLO

Innovación en las universidades y superación de desafíos comunes

Herrera y Suárez (2021) señalan que el concepto de innovación ha recibido múltiples definiciones, asociándose con novedad, cambio, proceso, conocimiento y generación de valor. Por ejemplo, al retomar la definición del Manual de Oslo (OCDE, 2005), desde una perspectiva amplia, la innovación se refiere a la introducción de un producto, proceso, método comercial u organizativo, ya sea nuevo o significativamente mejorado, para la empresa que lo adopta. En este contexto, la universidad desempeña un papel fundamental como agente central del sistema de innovación, ya que, dadas sus características y funciones, puede acelerar los procesos de innovación de manera más eficiente.

La importancia de la universidad radica en que esta se fundamenta en las necesidades de la sociedad, permitiéndole responder de manera adecuada a los requerimientos impuestos por las nuevas condiciones económicas, sociales, culturales y ambientales. Hoy en día, se reconoce a la universidad como un actor clave del cambio social, cuya función primordial es formar profesionales (ciudadanos) con capacidad crítica, capaces de actuar activamente sobre la sociedad para transformarla. Esta formación está basada en la investigación científica de vanguardia, con el fin de ofrecer soluciones a los problemas a nivel local, nacional e internacional (García et al., 2013).

Sin embargo, los desafíos son muchos, lo que obliga a las universidades a reestructurarse o adaptarse a los nuevos retos. En este sentido, Fernández (2009) señala que la globalización ha generado cambios importantes en el ámbito mundial de la Educación Superior, destacando algunos de los más relevantes en los siguientes puntos:

- (i) Los mercados locales se conectan entre sí a través de crecientes flujos de movilidad internacional de estudiantes;
- (ii) Aumenta el intercambio e interacción entre académicos e investigadores de diferentes partes del mundo, a través de redes globales cada vez más flexibles e imbricadas;

- (iii) Se internacionalizan las prácticas académicas a nivel institucional;
- (iv) Los programas de pre y posgrado buscan convergencias hacia una relativa estandarización curricular, estableciendo un sistema de créditos de aprendizaje fácilmente comparables, así como el reconocimiento mutuo de diplomas educacionales;
- (v) La colaboración entre universidades y empresas transnacionales comienza a ser analizada como expresión de un emergente capitalismo académico a nivel global;
- (vi) Los sistemas nacionales de aseguramiento de la calidad adoptan estándares comunes y crean redes internacionales para unificar criterios y favorecer la movilidad internacional de estudiantes y el reconocimiento de diplomas;
- (vii) Surgen bloques regionales (como el espacio europeo y el espacio iberoamericano).

Por tal razón, el surgimiento de la universidad emprendedora surge como una respuesta a los requerimientos de las actuales economías y los cambios sociales, lo cual ha derivado en la necesidad de crear nuevos campos interdisciplinarios y áreas de investigación dedicadas a proporcionar soluciones a problemas y desafíos sociales específicos. Esto se acompaña de una serie de mecanismos e instituciones dedicadas a facilitar la difusión del conocimiento desde la universidad hacia las empresas y la sociedad en su conjunto (Audretsch, 2012).

Los desafíos comunes que enfrentan las Instituciones de Educación Superior incluyen garantizar el desarrollo endógeno, que consiste en asegurar que el sistema productivo de los países crezca y se transforme utilizando el potencial de las capacidades locales. Para ello, es necesario conformar capacidades emprendedoras que favorezcan la creación y/o crecimiento de empresas, al mismo tiempo que se contribuye al bienestar social. Esto exige, de manera urgente, contar con un mayor número de emprendedores y grupos de investigación innovadores que permitan convertir el conocimiento en riqueza, generando valor para la sociedad en su conjunto (Azuaje, 2017), como se ha demostrado en algunos de los casos previamente abordados.

Si bien el emprendimiento de base tecnológica ofrece oportunidades emocionantes, también presenta una serie de desafíos únicos. Estos incluyen la obtención de financiamiento inicial, la protección de la propiedad intelectual y la gestión de la incertidumbre inherente al desarrollo tecnológico.

Es importante destacar que el impulso a las empresas universitarias de base tecnológica no solo se centra en el apoyo al emprendimiento, sino también en estructuras de gestión estratégicas que fomenten una cultura emprendedora dentro de la comunidad universitaria. Además, se debe involucrar a otros actores (públicos y privados) para fomentar interacciones de colaboración y cooperación que hagan posible el tránsito hacia una universidad emprendedora. Esto permitirá que la generación y explotación del conocimiento de frontera se materialice en actividades emprendedoras (Guerrero y Urbano, 2012). Algunos ejemplos exitosos de esta realidad se presentan en el siguiente apartado.

5. RESULTADOS

Emprendimiento de base tecnológica

Pastrana, Alvarado y Muñoz (2022) señalan que la globalización ha marcado una nueva etapa en la historia, generando transformaciones aceleradas y profundas, determinadas por la velocidad de la innovación tecnológica y, sobre todo, la creciente interconexión entre países y regiones. Este fenómeno ha derivado en la expansión del sistema capitalista a través del esfuerzo redoblado de las fuerzas productivas, difundiendo gradualmente su influencia alrededor del mundo, algo de lo cual la universidad no ha sido ajena.

Lo anterior se ha hecho aún más evidente con el surgimiento y despliegue de la revolución de las Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC), que ha provocado la reorganización del espacio mundial. Esto se debe a la integración de la producción y circulación de capitales, que se expanden cada día más rápidamente gracias a la ampliación de la red de telecomunicaciones (Dabat y Rivera, 2004). Esta transformación ha sido la base de los emprendimientos exitosos que han surgido en todo el mundo.

Valdivia, Coronado y Aguilera (2019) señalan que el emprendimiento en las universidades ha surgido por varios factores, entre los cuales se incluyen: la necesidad de adaptarse a las exigencias de un mundo globalizado y la continua innovación en todos los sectores económicos y sociales.

Es importante destacar que, debido a sus características, la universidad ofrece importantes posibilidades para el emprendimiento tecnológico, ya que surge de procesos de investigación, desarrollo e innovación (I+D+i). Por tal motivo, el entorno universitario brinda oportunidades de negocio basadas en un entorno científico, estando estrechamente vinculado con tecnologías propias de los emprendedores, quienes son los estudiantes e investigadores. Algunas de las empresas de base tecnológica más exitosas en el mundo, nacidas en el contexto de la actual revolución de las TIC, incluyen:

- (i) Google: Surgida de un proyecto de investigación académica en la Universidad de Stanford, Google se ha convertido en una de las empresas más grandes y exitosas del mundo, ofreciendo una amplia gama de servicios y productos tecnológicos y que se sigue reinventando.
- (ii) Amazon: Fundada por Jeff Bezos en 1994, Amazon comenzó como una librería en línea y se ha transformado en una empresa líder en comercio electrónico, servicios en la nube, inteligencia artificial y otros sectores tecnológicos.
- (iii) Facebook: Creada por Mark Zuckerberg mientras era estudiante en la Universidad de Harvard, Facebook ha revolucionado la forma en que las personas se conectan y comparten información en línea, convirtiéndose en una de las redes sociales más influyentes y utilizadas alrededor del mundo.

En Latinoamérica, también hay ejemplos destacados de empresas de base tecnológica exitosas, como:

- (i) MercadoLibre: Fundada en Argentina en 1999, MercadoLibre es la plataforma de comercio electrónico líder en América Latina, ofreciendo una amplia gama de productos y servicios en línea.

- (ii) Despegar.com: Esta empresa argentina es una de las agencias de viajes en línea más grandes de América Latina, ofreciendo reservas de vuelos, hoteles, paquetes turísticos y otros servicios relacionados con los viajes.
- (iii) Nubank: Con sede en Brasil, Nubank es una empresa *fintech* que ofrece servicios financieros digitales, incluyendo tarjetas de crédito, cuentas bancarias y préstamos, a través de una plataforma móvil innovadora.

Estos ejemplos muestran cómo algunas empresas de base tecnológica pueden surgir de entornos académicos y convertirse en líderes en sus respectivos sectores, demostrando el potencial de la innovación empresarial impulsada por la investigación y el conocimiento académico. Son un claro ejemplo de adaptación a los nuevos cambios, pero sobre todo, de cómo aprovechar las oportunidades que la globalización, fundamentada en las nuevas tecnologías, ofrece. El éxito no solo depende de la iniciativa de los emprendedores, sino también de las herramientas, capacidades, habilidades y entornos adecuados que las universidades les proporcionan.

Casos de éxito de empresas universitarias o spin-offs

Audretsch (2012) subraya el papel de la universidad en el impulso del emprendimiento, ya que es a partir de sus grupos de investigación, desarrollo tecnológico y comunidad estudiantil que se fomenta la creación de nuevos negocios y la comercialización del conocimiento y la tecnología en sectores o lugares donde antes no existían, o al menos se aumenta la cantidad de transferencia de tecnología y conocimiento especializado de la universidad a las empresas y otras organizaciones privadas, públicas o sin fines de lucro.

Como se ha mostrado a lo largo del capítulo, existen diversos retos y estrategias clave para superar los desafíos del emprendimiento universitario, junto con recomendaciones prácticas y herramientas que faciliten dicho proceso en beneficio no solo de los intereses de la universidad, sino también para ofrecer soluciones innovadoras a la industria y a la sociedad.

La identificación de ideas innovadoras, tanto por parte de los individuos como de las universidades, es un paso crucial en el proceso del emprendimiento de base tecnológica. En el entorno universitario, esta etapa se ve facilitada por la presencia de investigadores y académicos que están a la vanguardia del conocimiento en diversos campos. La colaboración interdisciplinaria y la interacción con la industria pueden servir como catalizadores para la generación de ideas innovadoras que aborden desafíos y oportunidades emergentes. Un ejemplo de ello es la Universidad de Stanford, conocida por su enfoque en la innovación y el emprendimiento, con numerosos casos de éxito como el de Google, que surgió de un proyecto de investigación universitaria.

Otro ejemplo es la empresa universitaria spin-off de la Universidad de Harvard, **Editas Medicine**, que ha desarrollado tecnologías de edición genética y ha establecido asociaciones estratégicas con empresas farmacéuticas para llevar sus terapias al mercado, atendiendo tanto una demanda social como generando beneficios económicos.

Asimismo, la empresa universitaria **Cambridge Silicon Radio (CSR)** de la Universidad de Cambridge, a pesar de enfrentar numerosos desafíos en su camino

hacia el éxito, logró superarlos mediante una combinación de innovación tecnológica, asociaciones estratégicas (innovación organizacional) y una gestión eficaz del riesgo ante los mercados tan competitivos en el ámbito regional y global.

Por lo tanto, es importante destacar que el papel de la universidad en el cumplimiento de su tercera misión va más allá de la transferencia de tecnología centrada en la generación y comercialización de patentes o spin-offs. Requiere proporcionar liderazgo a la sociedad, fundamentado en el conocimiento de frontera y en acciones expeditas y pertinentes hacia los retos que enfrenta la sociedad en las regiones donde se ubica. Esto requiere necesariamente, tanto al interior de la universidad como en el contexto nacional y local, la consolidación de acciones, programas, políticas públicas y marcos normativos que lo impulsen. Un ejemplo de esto es el caso de **3D Robotics**, que se aborda a continuación:

La Universidad de California en Berkeley es reconocida por su excelencia académica y su enfoque en la investigación e innovación. Con una amplia gama de departamentos académicos y centros de investigación, la universidad fomenta un ambiente propicio para la colaboración interdisciplinaria y el desarrollo de tecnologías innovadoras.

Orígenes de 3D Robotics: 3D Robotics es una empresa de tecnología aeroespacial y drones que se originó como un proyecto de investigación en el Laboratorio de Investigación de Robótica de Vuelo de la Universidad de California en Berkeley. Fundada en 2009 por Chris Anderson, exeditor en jefe de la revista *Wired*, y Jordi Muñoz, un estudiante mexicano autodidacta, la empresa surgió de la colaboración entre investigadores de la universidad y entusiastas de la robótica.

Apoyo de la Universidad: La Universidad de California en Berkeley proporcionó un entorno propicio para el desarrollo inicial del proyecto al ofrecer recursos y apoyo en varias áreas clave:

1. **Investigación y Desarrollo:** El Laboratorio de Investigación de Robótica de Vuelo proporcionó un entorno de investigación colaborativo donde los estudiantes y profesores pudieron trabajar en el desarrollo de tecnologías de drones innovadoras.
2. **Asesoramiento Académico:** Los fundadores de 3D Robotics recibieron asesoramiento y orientación de profesores y expertos en la universidad, lo que les permitió aprovechar el conocimiento y la experiencia académica para desarrollar sus productos y estrategias comerciales.
3. **Recursos Financieros:** Aunque 3D Robotics inicialmente se financió de manera independiente con fondos personales, la Universidad de California en Berkeley también ofreció oportunidades de financiamiento a través de subvenciones de investigación y programas de apoyo a empresas emergentes.
4. **Red de Contactos:** La universidad proporcionó acceso a una amplia red de contactos en la industria y el mundo académico, lo que permitió a 3D Robotics establecer colaboraciones estratégicas y asociaciones con otras empresas y organizaciones.

Crecimiento y Éxito: Después de su fundación, 3D Robotics experimentó un rápido crecimiento y se convirtió en uno de los principales actores en el mercado de drones comerciales y de consumo. La empresa desarrolló una variedad de productos

innovadores, incluyendo plataformas de drones de código abierto, controladores de vuelo y software de planificación de misiones.

Legado y Lecciones Aprendidas: El caso de 3D Robotics destaca el potencial de colaboración entre la academia y la industria para impulsar la innovación y el emprendimiento. La Universidad de California en Berkeley proporcionó el entorno y el apoyo necesario para que el proyecto surgiera como una empresa líder en su campo, demostrando el impacto positivo que puede tener la investigación académica en la creación de empresas innovadoras y exitosas.

Este caso es un ejemplo claro de que las nuevas empresas surgidas desde las universidades son una poderosa herramienta que resulta en el incremento de la productividad y la generación de empleo, fundamentados en el uso del conocimiento de frontera. En este sentido, Calle y Tenesaca (2023) destacan que el impulso a las empresas universitarias de base tecnológica es el resultado de la identificación de oportunidades y de comprender cómo las universidades y el conocimiento generado en ellas pueden incentivar a los estudiantes a buscar alternativas de negocio que no solo satisfagan sus necesidades, sino también las de su entorno. Esto requiere acciones tanto al interior como al exterior de la universidad (para generar las condiciones adecuadas).

La razón de ser de la universidad va más allá de la generación y acumulación de conocimiento. Una de sus funciones centrales, determinada por su tercera misión, es la difusión y diseminación de dicho conocimiento, fundamentado en el desarrollo de proyectos de investigación enfocados en resolver necesidades reales de la sociedad y la industria, para que los resultados sean susceptibles de ser transferidos y aplicados. Así, las universidades son los actores encargados de generar, transmitir e impulsar el capital cognitivo, es decir, el conocimiento, mediante el cual se fundamenta la actividad emprendedora (Pastrana, Alvarado, Muñoz, 2022).

6. CONCLUSIONES

Para Lall (1987), la importancia de los mecanismos de transferencia del conocimiento y la tecnología radica en que esta práctica enfatiza el esfuerzo tecnológico natural de las organizaciones para manejar nuevas tecnologías, adaptarlas a las condiciones locales (físicas o de mercado), mejorarlas, difundirlas dentro de la economía, explotarlas y diversificarlas, garantizando así una posición en el mercado. En este contexto, la universidad, como agente del sistema de innovación, dada sus características y actividades, puede ser un organismo determinante en dicho esfuerzo.

Se destaca que la transferencia de tecnología desde las universidades puede convertirse en un instrumento esencial para el desarrollo y crecimiento económico de las regiones en las que se ubican. Esto, sin embargo, requiere necesariamente el impulso de una cultura emprendedora entre los alumnos y el profesorado, que se fundamenta en el proceso educativo, la formación de nuevas competencias, la cultura de protección de la propiedad intelectual y su explotación (mediante contratos, licencias, etc.), la creación de empresas de base tecnológica, así como el establecimiento de mecanismos de transferencia de conocimiento tácito mediante servicios intensivos en conocimiento.

Por tal razón, Audretsch (2012) reconoce que el papel de la universidad ha evolucionado en concordancia con las fuerzas económicas subyacentes que configuran el

crecimiento y el desempeño económicos. Por lo tanto, el surgimiento de la universidad empresarial responde a la necesidad de crear nuevos campos interdisciplinarios y áreas de investigación dedicadas a brindar soluciones a problemas y desafíos sociales específicos que enfrentan las sociedades modernas. Su objetivo no es solo promover la transferencia de conocimiento y tecnología o aumentar el número de nuevas empresas, sino también garantizar que las personas aprovechen las oportunidades que brindan las nuevas condiciones económicas.

En este sentido, el presente capítulo busca inspirar a académicos, estudiantes y profesionales a integrar el emprendimiento de base tecnológica como un elemento central en el ADN de las empresas universitarias. Al fomentar una cultura emprendedora en entornos universitarios, podemos contribuir al avance tecnológico, la transferencia de conocimientos y la creación de impacto en la sociedad. El emprendimiento de base tecnológica en el ámbito universitario no solo impulsa la innovación empresarial, sino que también ofrece oportunidades para el crecimiento económico, la creación de empleo y la mejora de la calidad de vida.

Con los casos aquí presentados, se busca subrayar la necesidad de crear una mayor conciencia sobre la importancia del impulso a las empresas de base tecnológica desde las universidades, fundamentado en modelos de buenas prácticas, en particular aquellas relacionadas con el papel de la interdisciplinariedad en la promoción del espíritu empresarial basado en las nuevas tecnologías y los nuevos requerimientos del mercado. Además, como señalan Gibb y Hannon (2006), es importante desarrollar la práctica de la universidad empresarial que incorpore la aceptación de su papel en el desarrollo regional, la responsabilidad ética y la valorización del conocimiento sin alejarse de sus funciones y responsabilidades como institución de aprendizaje e investigación.

Finalmente, como lo señala Audretsch (2012), la universidad, bajo el enfoque de su tercera misión, tiene el mandato de facilitar la comercialización de la investigación universitaria y generar empresas universitarias, startups, etc., sin olvidar que el papel de la universidad en la sociedad es considerablemente más amplio, ya que su compromiso con la sociedad se fundamenta en proporcionar conocimientos de frontera, pensamiento crítico y liderazgo, y de esta manera fundamentar su actividad empresarial en la responsabilidad social y medioambiental.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arocena, R. y Sutz, J. (2001). *La Universidad Latinoamericana del Futuro Tendencias – Escenarios-Alternativas*. México: Colección UDUAL.
- Audretsch, D. (2014). From the entrepreneurial university to the university for the entrepreneurial society. *The Journal of Technology Transfer*, Springer, 39(3), 313 - 321. DOI: 10.1007/s10961-012-9288-1
- Azuaje, V. (2017, 25-27 de octubre). *El emprendimiento en las Universidades. Retos para las Ciencias Administrativas* [ponencia]. Jornadas de Investigación en Educación Superior, Montevideo, Uruguay. <https://www.cse.udelar.edu.uy/wp-content/uploads/sites/5/2018/03/CO10-AZUAJE.pdf>

- Calle, M. y Tenesaca, J. (2023). Identificación de oportunidades y su impacto en las intenciones de emprendimiento. *Ciencias Administrativas*, (22), 1-12. <https://www.redalyc.org/journal/5116/511674246008/html/>
- Clark, B. (2004). *Sustaining Change in Universities*, Society for Research into Higher Education, Open University Press, Londres.
- Corti, E. y Riviezzo, A. (2008). Hacia la universidad emprendedora un análisis del compromiso de las universidades italianas en el desarrollo económico y social. *Economía Industrial* (368), 113-124. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2671600>
- Dabat, A. y Rivera, M. (2004). Nuevo ciclo industrial mundial e inserción internacional de países en desarrollo. En A. Dabat, M. Rivera, y J. Wilkie (coord.). *Globalización y cambio tecnológico. México en el nuevo ciclo industrial mundial*, (pp. 75-132). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Etzkowitz, H., Webster, A. Gebhardt, C. y Cantisano, B. (2000), The Future of the University and the University of the Future: Evolution of Ivory Tower to Entrepreneurial Paradigm, *Research Policy*, 29 (2), pp. 313-330.
- Fernández, E. (2009). El sistema-mundo del capitalismo académico: procesos de consolidación de la universidad emprendedora. *Archivos Analíticos de Políticas Educativas*, 17(21), 1-43. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=275019727020>
- García, J., Gualdrón, C. y Bolívar, R. (2013). Diseño de un modelo de transferencia Universidad-Empresa, para la I+D generado por grupos de investigación de la Universidad de Pamplona. *Revista Escuela de Administración de Negocios*, (74), 106-119. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=20628498007>
- Gibb, A. & Hannon, P. (2006). Towards the Entrepreneurial University? *International Journal of Entrepreneurship Education*, 4, 73-110. https://www.researchgate.net/publication/285630640_Towards_the_entrepreneurial_university
- Guerrero, M. y Urbano, D. (2012). Transferencia de conocimiento y tecnología. Mejores prácticas en las universidades emprendedoras españolas. *Gestión y Política Pública*, XXI(1), 107-139. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-10792012000100004&script=sci_abstract
- Herrera, F. y Suárez, J. (2021). Rol de las universidades en el Sistema Nacional de Innovación mexicano. *Revista Venezolana de Gerencia*, 26(93), 139 – 151. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=29066223010>
- Kaplan, M. (2000). La universidad pública: esencia, misión y crisis. *Revista Mexicana de Ciencias Políticas y Sociales*. XLIV(178), 101 - 133. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=42117805>
- Lall, S. (1987). *Learning to Industrialize. The Acquisition of Technological Capability by India*. Macmillan Press.
- Mallén, J., y Castillo, L. (2022). Multidisciplinariedad en el entorno universitario: Caminar en la innovación educativa. *Zincografía* 6(12), 94-111. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2448-84372022000200094
- Ministerio de Educación y Ciencia (MEC) (2008). *La creación de empresas de base tecnológica en el ámbito universitario a partir de la reforma de la LOU*. Everis, Madrid. https://www.ucm.es/data/cont/media/www/pag-9500/creacion_ebts_lou_2008.pdf
- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos [OCDE]. (2005). Manual de Oslo: Guía para la recogida e interpretación de datos sobre innovación (3ª ed.). España: EUROSTAT y OECD, <https://doi.org/10.1787/9789264065659-es>
- Pastrana, A. Alvarado, R., y Muñoz, E. (2022). *Globalización y la tercera misión de la universidad*, Pearson Education, México.

- Sutz J., (2000). The university-industry-government relations in Latin America. *Research Policy* 29(2), 279 - 290. [https://doi.org/10.1016/S0048-7333\(99\)00066-9](https://doi.org/10.1016/S0048-7333(99)00066-9)
- Valdivia, M., Coronado, G. y Aguilera, A. (2019). Emprendimiento en las universidades públicas mexicanas: Estudio bibliométrico. *Revista Venezolana de Gerencia* 2, 431-455. <https://www.redalyc.org/journal/290/29063446024/html/>

CAPÍTULO 5.

MEDICIÓN DE CAPACIDADES DE PROSPECCIÓN DE LA INDUSTRIA AEROESPACIAL EN COLOMBIA

Melissa Penagos Oquendo

Universidad Pontificia Bolivariana

<https://orcid.org/0009-0009-5552-4905>

mpenagos20@outlook.es

Teniente Coronel (RA) Jimmy Anderson Florez

Instituto Metropolitano de Medellín - ITM

<https://orcid.org/0000-0002-0426-1000>

jimmyflorez@itm.edu.co

Jhon Freddy Escobar

Universidad Pontificia Bolivariana

Jhon.escobar@upb.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

La innovación tecnológica es un pilar clave para la evolución del sector aeroespacial, especialmente en un entorno caracterizado por la alta complejidad tecnológica y rigurosos estándares de seguridad y calidad. La prospectiva, que emplea métodos para anticipar y proyectar escenarios futuros, es esencial en este contexto, ya que permite a las organizaciones adaptarse a los cambios y maximizar oportunidades. En particular, facilita la identificación de tecnologías disruptivas, como la inteligencia artificial y los materiales avanzados, que son cruciales para mantener la competitividad en la industria, especialmente en el sector aeroespacial.

El sector aeroespacial en Colombia está en crecimiento, lo que se evidencia en colaboraciones estratégicas, como la alianza entre Boeing y el Clúster Aeroespacial de Colombia (CAESCOL), y el fortalecimiento de la I+D+i en la Fuerza Aérea Colombiana. Además, políticas como el CONPES 4129, centradas en la reindustrialización y la sinergia entre sectores, refuerzan el compromiso del país con el desarrollo aeroespacial. Estos esfuerzos están alineados con el Plan Estratégico Aeronáutico 2030 de la Aeronáutica Civil, que busca internacionalizar las capacidades colombianas y posicionarlas en el mercado global.

Este capítulo propone un enfoque para evaluar las capacidades prospectivas en la industria aeroespacial colombiana, concentrándose en tres dimensiones clave:

anticipar, aprender y ejecutar. Utilizando técnicas como la exploración tecnológica y la dinámica de sistemas, se analizaron los datos recolectados mediante un Modelo de Ecuaciones Estructurales (MEE). Los resultados destacan la relevancia de estas capacidades prospectivas como herramientas fundamentales para la innovación estratégica y sostenible en tiempos de incertidumbre.

Las conclusiones subrayan que la prospectiva no solo ayuda a anticipar cambios en la tecnología y las regulaciones, sino que también facilita una mejor adaptación a las preferencias de los consumidores, así como a las tendencias geopolíticas y ambientales. Este capítulo resalta la importancia de integrar la prospectiva en la toma de decisiones estratégicas en el sector aeronáutico, garantizando así un desarrollo alineado con las demandas futuras del mercado global.

Palabras clave: Prospectiva, industria aeronáutica, gestión tecnológica aeronáutica, metodología prospectiva, capacidades empresariales, ecuaciones estructurales.

2. REVISIÓN DE LA LITERATURA

La anticipación, descrita por Pierre Massé como una “indisciplina intelectual” y por Gaston Berger como la capacidad de “ver de lejos, largo y profundo”, subraya la importancia de tener una visión global y a largo plazo para orientar la acción. Este enfoque permite a las organizaciones adelantarse a los cambios futuros y gestionar proactivamente las oportunidades y desafíos emergentes a través de la planeación. Según Godet (2007), Ackoff define la planeación como el proceso de concebir un futuro deseado y los medios para alcanzarlo. Mintzberg (1994) señala que la planeación estratégica no siempre implica un proceso formal, lo que permite a las organizaciones adaptar sus estrategias a medida que evolucionan las circunstancias.

Por su parte, la prospectiva tecnológica, según la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) y citada por Rodríguez Cortezo (2001), busca prever el futuro de la ciencia, la tecnología, la economía y la sociedad a largo plazo, con el fin de identificar tecnologías emergentes de alto potencial. Slaughter (1997) define la prospectiva estratégica como la generación y mantenimiento de una visión de futuro de alta calidad, cuya aplicación se lleva a cabo en la organización. Leonard-Barton (1992), citado por Teece et al. (1997), describe las capacidades dinámicas como la habilidad de una empresa para integrar, construir y reconfigurar competencias frente a entornos cambiantes, lo que le permite innovar y obtener ventajas competitivas. Kumar et al. (2017) definen las capacidades de prospección como la habilidad para anticipar, visualizar y planificar futuros alternativos y trabajar para su realización.

Esta investigación se basa en una exhaustiva revisión de literatura especializada, que aborda diversas corrientes teóricas y estudios aplicados, permitiendo comprender mejor las capacidades y comportamientos de las empresas dentro de contextos cooperativos y competitivos. Al analizar las investigaciones sobre las Capacidades de Prospección (en adelante CP), se identificaron 870 artículos mediante la búsqueda en Web of Science y Scopus. A través de la herramienta Tree of Science, fue posible sintetizar la literatura especializada en 60 artículos distribuidos en tres grandes componentes (Figura 1): i) la raíz, donde se encuentran las investigaciones que constituyen las bases del conocimiento explorado; ii) el tronco, que refleja los artículos de investigación

aplicada sobre las CP; y finalmente, iii) las hojas, que permiten conocer los últimos artículos relevantes sobre las tendencias y avances en la temática.

Figura 1. *Distribución de artículos sobre Capacidades de Prospección*



Fuente: (Core of Science, 2021).

Raíces (Investigaciones Básicas)

1. Teoría Evolutiva: Nelson y Winter (1982) exploran las capacidades y comportamientos de las empresas en entornos cooperativos, estableciendo una base para el entendimiento de la adaptación empresarial.
2. Capacidades Dinámicas y Visión Basada en los Recursos: Wernerfelt (1984) argumenta la importancia de analizar las empresas desde la perspectiva de sus recursos, más que de sus productos, introduciendo un enfoque que es ampliado por Teece et al. (1997), quienes vinculan las capacidades dinámicas con la gestión estratégica, enfocándose en los procesos distintivos de las empresas y sus trayectorias evolutivas.
3. Desarrollo y Aplicación de la Prospectiva Estratégica: Slaughter (1997) aborda las metodologías de la prospectiva estratégica en función de las necesidades de cada empresa, vinculándolas con el aprendizaje organizacional y la gestión de la incertidumbre.
4. Prospectiva Corporativa y Desempeño Empresarial: Rohrbeck y Kum (2018) presentan un modelo para evaluar la preparación futura de las empresas mediante el análisis de la prospectiva corporativa y la madurez de sus prácticas relacionadas.

Tronco (Investigaciones de Aplicación)

1. Cultura de Prospección: Godet y Durance (2011) explican cómo las organizaciones pueden desarrollar y promover una cultura de prospección en su entorno.
2. Capacidades de Prospección a través de Escenarios: Rhisiart et al. (2015) estudian el desarrollo de capacidades de prospección mediante el aprendizaje organizacional derivado de procesos de escenarios.
3. Prospectiva Corporativa e Innovación: Yoon et al. (2018) destacan la relevancia de la prospectiva empresarial en la gestión de la innovación, proponiendo un modelo basado en la visión de recursos y capacidades dinámicas.
4. Capacidades Dinámicas e Incertidumbre Ambiental: Haarhaus y Liening (2020) investigan cómo la prospectiva estratégica afecta la flexibilidad estratégica y

la racionalidad en la toma de decisiones bajo distintos grados de incertidumbre ambiental.

Hojas (Artículos Recientes)

- 1. Innovación Dinámica: Shang et al. (2010) proponen un modelo para acelerar las capacidades empresariales en la construcción de innovación en ambientes dinámicos.
- 2. Prospectiva Corporativa en la Industria Bancaria Iraní: Joneidi Jafari y NiliPourTabataba'i (2017) examinan el impacto de la prospectiva corporativa en la innovación y el desempeño organizacional en el sector bancario iraní.
- 3. Prospectiva Estratégica en Organizaciones Públicas: Ali Almansoori y Asmai (2021) miden la importancia de factores de prospectiva estratégica que influyen en las capacidades dinámicas de las organizaciones públicas.
- 4. Mediación de Prospectiva Estratégica y Capacidad Dinámica: Almansoori et al. (2022) desarrollan un modelo de mediación que estudia cómo la prospectiva estratégica influye en la capacidad dinámica.
- 5. Madurez en Prospectiva en PYMEs de Polonia: Kononiuk (2022) analiza los determinantes de la madurez en prospectiva en pequeñas y medianas empresas en Polonia.

Al profundizar en la literatura especializada, se resaltan los siguientes artículos según su clasificación bajo la metodología del árbol de la ciencia (Tree of Science) mencionado solo los últimos documentos de cada sección (Tabla 1):

Tabla 1. *Clasificación y aportes de la literatura especializada priorizada*

CLASIFICACIÓN		RAIZ
Autor/es	Título	Aporte a las CP
(Coates, 2010)	El futuro de la prospectiva: Una perspectiva estadounidense	Este artículo presenta las características clave de la prospectiva estratégica y su enfoque, tal como se practica en todo el mundo, es la flexibilidad ecléctica en métodos y técnicas.
(Havas et al., 2010)	El impacto de la prospectiva en la formulación de políticas de innovación: experiencias recientes y perspectivas futuras	Los autores consideran futuros alternativos de varios campos de CyT o sistemas socioeconómicos al reunir las perspectivas de varios grupos de partes interesadas y, por lo tanto, ayuda a los procesos de toma de decisiones en diferentes niveles. De igual manera, describen la evolución de diferentes fundamentos de política desde la década de 1960, desarrollan un marco para clasificar los impactos de varios tipos de análisis prospectivos y revisa los resultados de la evaluación de varios programas nacionales de prospectiva dentro del mismo marco.

CLASIFICACIÓN		RAIZ
Autor/es	Título	Aporte a las CP
(Calof et al., 2012)	Hacia una prospectiva impactante: puntos de vista de consultores prospectivos y académicos	El autor ofrece sugerencias sobre los factores que pueden ayudar a los creadores de políticas, académicos, consultores y otras personas involucradas en los proyectos de Evaluación de Tecnologías Orientadas al Futuro (ETOF), a producir contribuciones útiles y significativas a los procesos de toma de decisiones.
(Rohrbeck, 2012)	Exploración de la creación de valor a partir de actividades de prospectiva corporativa	El documento analiza la creación de valor a partir de la investigación de futuros corporativos y, sirve de guía para una investigación empírica en la que se observa la creación de valor, los métodos y prácticas. El documento concluye con la recomendación de adoptar una perspectiva de capacidades dinámicas en futuras investigaciones sobre prospectiva empresarial
(Vecchiato, 2012)	Incertidumbre ambiental, prospectiva y toma de decisiones estratégicas: un estudio integrado	Expone un análisis de las principales características de incertidumbre del entorno (complejidad y dinamismo) que constituyen los enfoques de las empresas en Prospección Estratégica y gestión de la incertidumbre.
(Rohrbeck & Schwarz, 2013)	La contribución de valor de la prospectiva estratégica: perspectivas de un estudio empírico de grandes empresas europeas	El documento se centra en explorar la creación de valor potencial y empíricamente observable de las actividades de prospectiva estratégica en las empresas. Los autores validan que es posible capturar valor a través de (1) una capacidad mejorada para percibir el cambio, (2) una capacidad mejorada para interpretar y responder al cambio, (3) influenciar a otros actores, (4) a través de una capacidad mejorada para el aprendizaje organizacional
(Rohrbeck & Kum, 2018)	Prospectiva corporativa y su impacto en el desempeño de la empresa: un análisis longitudinal	Los autores desarrollaron un modelo que mide la preparación futura (PF) de una empresa evaluando la necesidad de prospectiva corporativa (PC) y comparándola con la madurez de sus prácticas de PC. Los resultados indicaron la preparación futura como un predictor relevante para convertirse en un actor destacado en la industria, para lograr una rentabilidad superior y para obtener un crecimiento de capitalización de mercado superior.
CLASIFICACIÓN		TRONCO
(Rohrbeck, 2010)	Aprovechar una red de expertos para obtener una ventaja competitiva: búsqueda de tecnología en la industria de las TIC	Contribuyó en 2010 a la base metodológica de la prospectiva corporativa, a la literatura de gestión tecnológica y a la comprensión sobre cómo las empresas pueden aumentar sus capacidades de innovación abierta al ampliar el relacionamiento con su entorno y las prácticas de construcción de capacidades de prospección
(Durance & Godet, 2010)	Construcción de escenarios: usos y abusos	Los autores buscan dar respuesta a las preguntas: ¿qué es un escenario?, ¿cómo juzgar la calidad de un escenario? Y ¿qué estrategias para qué escenarios?

CLASIFICACIÓN		RAIZ
Autor/es	Título	Aporte a las CP
(Godet & Durance, 2011)	La prospectiva estratégica	Da a conocer cómo una organización es capaz de desarrollar y difundir en su entorno una cultura de previsión, resistencia, curiosidad e innovación a fin de construir un mundo más sostenible
(Schoen et al., 2011)	Adaptando la prospectiva a campos específicos	El documento aborda los desarrollos recientes en la teoría y la práctica de prospectiva que permiten implementar un marco metodológico híbrido en el que diferentes enfoques sirven para diferentes propósitos en fases específicas con el fin de adaptar la prospectiva a una amplia gama de contextos y objetivos diferentes.
(Sarpong & O'Regan, 2014)	Las dimensiones organizacionales de la prospectiva estratégica en entornos de alta velocidad	Los autores se enfocan en mostrar los vínculos conceptuales entre los procesos organizacionales y la prospectiva estratégica como una capacidad organizacional distribuida en entornos de alta velocidad.
(Paliokaitė et al., 2014)	Conceptualización de la prospectiva estratégica: un marco integrado	El documento propone un marco integrador para generar una imagen más completa de la prospectiva estratégica como una capacidad organizacional en entornos de alta velocidad.

CLASIFICACIÓN		HOJAS
Autor/es	Título	Aporte a las CP
(Milshina & Vishnevskiy, 2018)	Potenciales de la prospectiva colaborativa para las pymes	Los investigadores proponen la prospectiva colaborativa para superar los obstáculos de las pymes y la región en su conjunto
(Y. Lee & Kreiser, 2018)	Orientación empresarial y ambidestreza: revisión de literatura, desafíos y agenda para futuras investigaciones	En este capítulo (del libro “Los retos del emprendimiento corporativo en la Era Disruptiva”), los autores examinan el efecto principal de la orientación emprendedora (EO), la postura empresarial estratégica de una empresa, para equilibrar la exploración y la explotación en forma de ambidestreza organizacional. Las empresas con recursos limitados se enfrentan al imperativo de realizar actividades innovadoras, sobrevivir en entornos hostiles y competir con empresas más grandes y ricas en recursos.
(Pulsiri Nonthapat & Vatananan-Thesenvitz, 2018)	Una revisión sistemática de la literatura sobre capacidades dinámicas, prospectiva estratégica y aprendizaje organizacional	La revisión sistemática de la literatura (SLR) presentada en este artículo analiza las relaciones entre las capacidades dinámicas, la prospectiva estratégica y el aprendizaje organizacional. El propósito del SLR sobre capacidades dinámicas (DC), prospectiva estratégica (SF) y aprendizaje organizacional (OL) es avanzar en la perspectiva académica sobre capacidades dinámicas mediante el análisis de cómo SF y OL se integran en el marco de DC.
(Dadkhah et al., 2018)	Prospectiva corporativa: desarrollo de un modelo de proceso	El artículo contribuye a la facilitación de análisis de escenarios futuros y desarrolla una estrategia mediante la incorporación de metodologías de prospección, donde la planeación estratégica incluye un plan de recuperación ante cambios discontinuos y así disminuir la incertidumbre

CLASIFICACIÓN		HOJAS
Autor/es	Título	Aporte a las CP
(Cheah et al., 2019)	Reinventando los sistemas de productos y servicios: el caso de Singapur	El documento analiza un estudio prospectivo realizado en la agencia nacional de I+D de Singapur para ayudar a los responsables de la toma de decisiones en ciencia y tecnología a identificar áreas clave de capacidad de inversión en I+D para apoyar el crecimiento de la industria manufacturera en el país y la región.
(Mafimisebi et al., 2020)	Emparejamientos de organización y diseño de productos: una revisión de las capacidades de innovación de productos, la conceptualización y las direcciones futuras	Según la visión de las empresas basada en los recursos y la teoría de la orientación al mercado, este artículo presenta una visión complementaria de la influencia de las capacidades de innovación de productos (CIP) en los emparejamientos de diseño de productos y organización. Explorando la influencia de tres factores complementarios; la orientación al mercado, la forma organizacional y las decisiones estratégicas gerenciales, como determinantes esenciales para el surgimiento de pares arquitectónicos,
(Ali Almansoori & Asmai, 2021)	Medición de la importancia de los factores de prospectiva estratégica que afectan las capacidades dinámicas de las organizaciones públicas	Este artículo presenta un estudio para determinar la importancia de los factores de prospectiva estratégica que afectan las capacidades dinámicas de una organización. La revisión de la literatura encontró que 19 factores que se agrupan en cinco dominios de prospectiva estratégica: exploración del entorno; planificación de escenarios; creación de conocimiento; cultura y organización formal.
(Magruk, 2021)	Análisis de incertidumbres y niveles de conocimiento relación con características de las tecnologías emergentes: contexto de la investigación prospectiva para la 4IR	El texto intenta responder a la pregunta ¿Qué niveles de prospección y conocimiento en el contexto del desarrollo de las tecnologías emergentes (¿en relación con sus características en la Industria 4.0?) deben tenerse en cuenta durante el análisis de las incertidumbres en el sentido de la investigación prospectiva basada en diferentes opciones anticipadas?
(Schoemaker & Day, 2021)	Preparando Organizaciones para Mayores Turbulencias	Partiendo de que las empresas vigilantes prevén las amenazas inminentes y las oportunidades nacies antes que sus rivales, el documento describe cuatro factores que caracterizan a las organizaciones vigilantes de las vulnerables y, pueden a la vez utilizarse para diseñar una hoja de ruta (roadmap) como preparación a los posibles escenarios futuros.
(Izadi et al., 2022)	Prospectiva: un nuevo enfoque basado en el mapa cognitivo del número Z	Los autores proporcionan un marco para la prospectiva con un enfoque principal en el papel de un enfoque cognitivo y su combinación con el concepto de mapa cognitivo difuso en entornos de incertidumbre y ambigüedad. El marco propuesto consta de las 3 fases: pre-prospectiva, prospectiva y post-prospectiva.
(Almansoori et al., 2022)	Modelo de medición de prospectiva estratégica que influye en la capacidad dinámica	Los autores desarrollaron un modelo de mediación que consta de cinco construcciones exógenas, a saber, exploración del entorno; planificación de escenarios; creación de conocimiento; cultura y organización formal, una construcción endógena de capacidades dinámicas y una construcción mediadora de capacidad de aprendizaje organizacional.

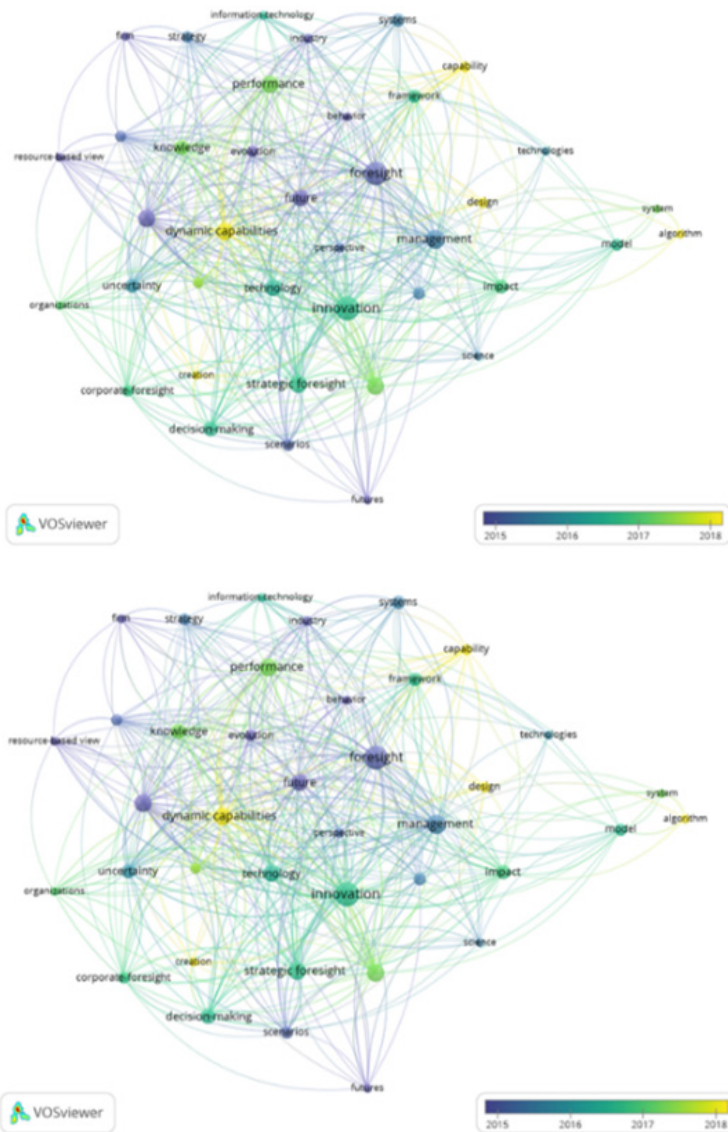
CLASIFICACIÓN		HOJAS
Autor/es	Título	Aporte a las CP
(Kononiuk, 2022)	Determinantes de la madurez en prospectiva en las pymes de Polonia	Basado en datos de Polonia, este artículo examina los principales factores que determinan la preparación de las pequeñas y medianas empresas (pymes) para navegar por una variedad de caminos hacia el futuro (madurez prospectiva). Este estudio integra conceptos de madurez prospectiva, capacidades dinámicas y prospectiva corporativa. Se basa en una muestra de más de 500 pymes manufactureras polacas que es representativa en términos de tamaño, tipo, sector y geografía de actividades. Utilizando una herramienta de evaluación de 28 criterios, se encontró que el nivel de madurez prospectiva de una empresa depende con mayor frecuencia del tamaño, tipo y cobertura geográfica de los mercados. Además, al involucrar a las partes interesadas en el desarrollo de estrategias corporativas, escanear el entorno micro y macro de la empresa utilizando una variedad de fuentes de información, mejorar las habilidades para trabajar con herramientas de prospección y fomentar otras capacidades dinámicas permite obtener ventajas competitivas duraderas en un entorno cambiante e impredecible panorama empresarial.

Fuente: Elaboración propia.

Las Figuras 2 y 3 ilustran las palabras clave más representativas y los países con mayores avances en investigación sobre las Capacidades de Prospección (CP) por año. Las variables más relevantes son las palabras “innovación”, “capacidades dinámicas” y “prospectiva”. Se evidencia que las CP empresariales están influenciadas por las capacidades dinámicas, que, a su vez, repercuten en la toma de decisiones y, por ende, en el desarrollo sostenible de las organizaciones en entornos de alta incertidumbre, tal como se describe en la literatura especializada. Además, se observa que los países con mayor investigación en prospectiva estratégica son Estados Unidos, Reino Unido, Alemania y Rusia.

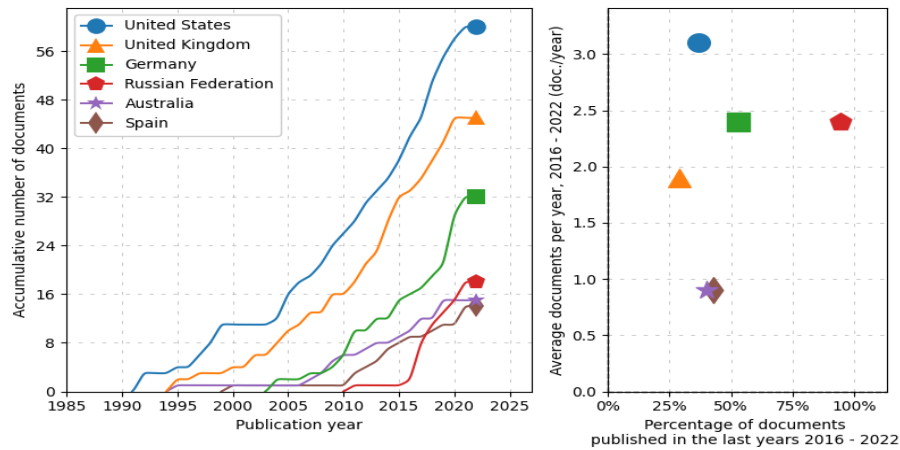
En la industria aeroespacial, existe una estructura piramidal compuesta por varios niveles. En el nivel más bajo se encuentran las PYMES subcontratistas (base), que se encargan de procesos de fabricación, desarrollo de software y oferta de servicios. En el nivel intermedio están los fabricantes medianos, que proporcionan elementos estructurales y componentes, así como sus contratistas de subsistemas y suministros principales. En el nivel superior (punta), se encuentran las empresas integradoras de aeronaves, motores y componentes mayores.

Figura 2. Variables representativas



La siguiente gráfica (Figura 2) ilustra la cadena de proveedores de la industria aeroespacial y su clasificación, lo que permite visualizar la alta exigencia del sector.

Figura 3. Países con mayores avances investigativos en CP



Fuente: Análisis bibliográfico (Web of Science).

Para comprender el contexto nacional, se parte de los resultados del segundo trimestre del Plan de Acción 2021, elaborado a partir del Plan Estratégico Aeronáutico 2030 (Aerocivil, 2021), donde la cadena de suministro de la industria aeronáutica colombiana ocupa la tercera categoría más baja, luego de conectividad y competitividad.

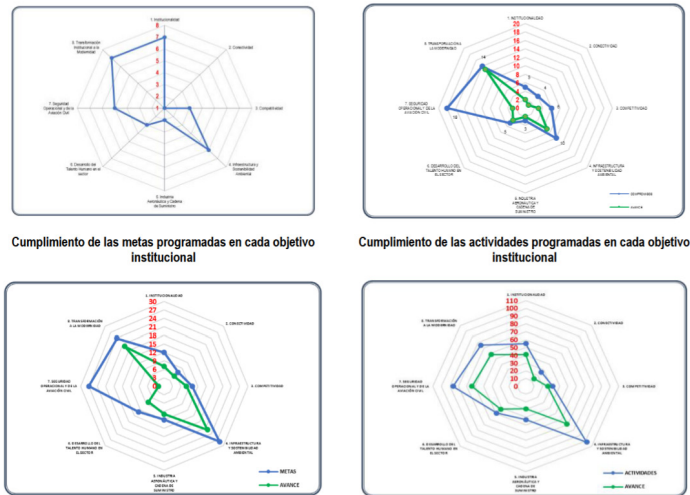
Figura 4. Clasificación de la cadena de suministro su clasificación



Fuente: Aeropartes Boeing, 2023.

Se evidencia también el bajo resultado respecto al cumplimiento de los objetivos institucionales, compromisos, metas y actividades establecidas en el plan.

Figura 5. Cumplimiento de los objetivos institucionales, compromisos, metas y actividades Plan de Acción 2021



Fuente: (Aerocivil, 2021).

Para el sector transporte, según Carlos et al. (2021) en *Fortalecimiento de la industria aeronáutica colombiana enfrentando la nueva realidad de la post-pandemia*, se ha discutido la falta de liderazgo gubernamental en proyectos aeronáuticos y la necesidad de políticas públicas que promuevan la financiación para crear una entidad que integre industria, academia y Estado. Esta entidad sería clave para el desarrollo del sector aeronáutico colombiano.

El nuevo CONPES “Política Nacional de Reindustrialización” (DNP, n.d.; CONPES 4129, 2023) planea inversiones superiores a los \$7,8 billones, destacando el impulso a combustibles sostenibles para la aviación y el desarrollo de tecnologías duales con el apoyo del sector defensa. Esto incluye la cooperación internacional para desarrollar partes de aeronaves no tripuladas. ProColombia (2021) resalta el potencial de Colombia en la fabricación de autopartes y servicios aeronáuticos certificados bajo la norma AS 9100, así como su ventaja geográfica para el transporte aéreo. Iniciativas como el Clúster Aeroespacial Colombiano (CAESCOL) y otros clústeres regionales fomentan la cohesión empresarial en el sector.

Se enfatiza la necesidad de abordar ineficiencias, como la digitalización y la sostenibilidad, y de adaptarse a las exigencias ambientales mediante la electrificación de aviones y el uso de hidrógeno como combustible limpio.

El documento subraya la importancia de que el sector aeronáutico colombiano identifique sus brechas de mercado y aproveche oportunidades estratégicas, destacando la relevancia de las certificaciones para garantizar la confiabilidad y seguridad en el marco de las demandas actuales y futuras del mercado.

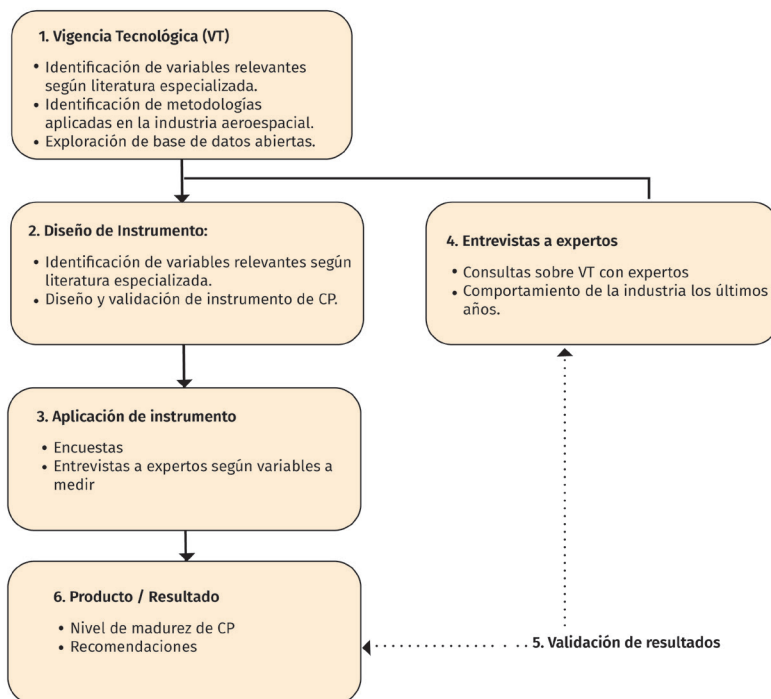
3. METODOLOGÍA

La presente investigación tiene como objetivo medir la madurez de las Capacidades de Prospección (CP) en la industria aeroespacial colombiana. Este enfoque busca fortalecer la capacidad del sector para anticipar y responder a fluctuaciones en el entorno, contribuyendo al desarrollo sostenible y competitivo del Clúster Aeroespacial Colombiano (CAESCOL). La metodología está estructurada en cuatro fases principales:

- **Fase Exploratoria:** En esta etapa se realiza un análisis exhaustivo de la literatura existente y vigilancia tecnológica para identificar las variables más representativas y metodologías utilizadas en la medición de CP. Este proceso incluye:
 - Búsquedas en bases de datos científicas y académicas utilizando palabras clave como “Capacidades de Prospección”, “Industria Aeroespacial” y “Planeación Estratégica”.
 - Revisión de estudios relevantes (Godet, Almansoori, Rohrbeck, entre otros) para definir el problema de investigación y los avances teóricos aplicables al sector aeroespacial.
 - Validación de resultados preliminares mediante consultas a expertos del sector, permitiendo precisar el enfoque del instrumento.
- **Análisis y Comprensión del Sector:** Esta fase profundiza en el entendimiento de la industria aeroespacial colombiana mediante,
 - **Entrevistas a expertos:** Se realizaron entrevistas con actores clave del sector, como representantes de empresas, universidades y organismos gubernamentales, para caracterizar el panorama de las CP.
 - **Caracterización del CAESCOL:** Se analizaron datos de 17 empresas y 14 entidades relacionadas, identificando fortalezas y debilidades en sus capacidades.
 - **Definición del instrumento:** Se diseñó un instrumento basado en variables identificadas en la literatura y validado con expertos, permitiendo medir la madurez de las CP y evaluar su eficiencia en las empresas del sector.
- **Aplicación del Instrumento:** El instrumento diseñado se aplicó a empresas del CAESCOL siguiendo los siguientes pasos:
 - **Contacto inicial:** Comunicación con empresas a través de correos, llamadas y entrevistas (presenciales y virtuales).
 - **Recolección de datos:** Uso del instrumento para medir las CP en función de las variables previamente definidas.
 - **Validación preliminar:** Los datos obtenidos fueron revisados y ajustados con base en retroalimentación de los participantes.

- **Análisis de Datos:** Los datos recolectados fueron procesados utilizando enfoques cualitativos y cuantitativos para garantizar precisión y exactitud:
- **Relacionamiento de variables:** Se empleó el modelo SEM (Structural Equation Modeling) para evaluar la influencia de las variables sobre las CP y su entorno.
- **Análisis comparativo y analítico (Figura 6):** Se analizaron bases de datos históricas y actuales para evaluar la evolución de las CP y su impacto en las empresas del clúster.

Figura 6. Proceso de recolección de datos



Fuente: Elaboración propia.

Métodos de obtención de datos

Vigilancia Tecnológica (VT): Se realizó una búsqueda en bases de datos científicas y académicas para conocer los avances teóricos y tecnológicos en Capacidades de Prospección (CP) aplicados a la industria aeroespacial. Se utilizaron palabras clave como “Capacidades de Prospección”, “Industria Aeroespacial”, “Planeación Estratégica” e “Incertidumbre”. Este proceso permitió evidenciar el problema de investigación,

identificar nuevas oportunidades y definir un instrumento adecuado para la industria. Los resultados fueron verificados con expertos del sector, precisando datos del mercado y su entorno. La revisión incluyó trabajos de Godet (2007), Almansoori & Asmai (2021) y Almansoori et al. (2022).

Análisis y Selección: Las variables y métricas revisadas en la literatura especializada se utilizaron para fortalecer el instrumento de medición y su utilidad en la industria aeroespacial. Además, se realizaron entrevistas a expertos con el fin de validar los hallazgos y profundizar en los conocimientos técnicos y socioeconómicos del sector.

Aplicación del Instrumento: El instrumento se aplicó en el conjunto de empresas seleccionadas que pertenecen al Clúster Aeroespacial Colombiano y se ejecutó de la siguiente manera:

1. Contacto inicial y entrevista a expertos
2. Caracterización de las empresas con las variables definidas.

Los medios de comunicación con las empresas seleccionadas fueron: correo electrónico, llamadas telefónicas y entrevistas (presenciales y/o virtuales), con el objetivo de medir las CP en la industria aeroespacial.

Métodos de manejo de datos

Una vez obtenidos los datos, estos fueron analizados desde diferentes enfoques para lograr precisión y exactitud:

- **Relacionamiento de datos y sus variables:** Los datos y las variables a los que pertenecen fueron analizados a través del modelo SEM con el fin de identificar la influencia de estos en las CP y su entorno.
- **Análisis cualitativo y cuantitativo:** Las bases de datos históricas y actuales (caracterización) fueron comparadas y analizadas mediante diferentes tipos de estadística según los datos obtenidos.

Procedimientos metodológicos: La presente investigación llevará a cabo los procedimientos metodológicos en 3 momentos: Vigilancia Tecnológica (teórico), aplicación del instrumento (práctico) y análisis de datos (analítica).

4. DESARROLLO

Identificación de los Diferentes Conceptos de las Capacidades de Prospección

Al revisar y analizar la literatura especializada mencionada en el presente documento, se identificó que el concepto específico de las Capacidades de Prospección (CP) es poco utilizado, dado que algunos investigadores las consideran como una capacidad

dinámica (Ramírez et al., 2013; Rohrbeck y Gemünden, 2011) y habilitadora de la agilidad estratégica dentro de las empresas (Rhisiart et al., 2015).

Por su parte, Dadkhah et al. (2018) indican que las CP son la habilidad de identificar e interpretar los cambios en el entorno, mejorar los procesos de gestión estratégica, aumentar las capacidades de innovación y mejorar el aprendizaje organizacional, así como la implementación de decisiones estratégicas.

La medición de las CP en las empresas ha sido analizada desde los siguientes diferentes ángulos y dimensiones:

- A partir de la estructura organizacional, coordinación, sistemas de control, procesos de decisión y desempeño del sistema de prospección (Kumar et al., 2017).
- Rohrbeck a través del documento “*Strategic Foresight in multinational enterprises – a case of study on the Deutsche Telekom Laboratories*”, presenta un modelo con un enfoque estructurado y cultural en el cual indica que las dimensiones clave de las CP son: i) uso de la información, ii) método de sofisticación, iii) personas y redes, iv) organización y, v) cultura. (Rohrbeck et al., 2007).
- Desde las CP individuales, (Kumar et al., 2017), se encuentran 3 aspectos relevantes: i) adquisición de la información, profundidad temporal y análisis de información; donde, el tiempo durante el cual se busca y se utiliza la información para el análisis, constituye a su vez los dos últimos factores.
- A partir del aprendizaje organizacional y las capacidades dinámicas, Ali Almansoori & Asmai (2021) expone un instrumento (encuesta) con una lista de 19 factores relacionados con la prospectiva estratégica comprimidos en: personal (edad, nivel educativo y experiencia laboral) y dominio en prospectiva estratégica (análisis del entorno, planeación de escenarios, creación de conocimiento, cultura y organización formal).

Diseño del Instrumento para Medir las Capacidades de Prospección de las Empresas del Sector Aeroespacial

El texto analiza el uso de la prospectiva estratégica en empresas, basado en la teoría de Michel Godet, quien identifica tres dimensiones clave: anticipación, apropiación y acción. Estas dimensiones conforman el “triángulo griego” de Godet. Además, se menciona un modelo para medir la prospectiva estratégica, que impacta la capacidad dinámica de una organización, dividido en tres dimensiones: exógeno, endógeno y mediador.

El componente exógeno, centrado en la prospectiva estratégica, incluye cinco variables: análisis del entorno, planeación de escenarios, creación de conocimiento, cultura y organización formal. El componente endógeno se enfoca en las capacidades dinámicas de la organización, mientras que el mediador abarca la capacidad de aprendizaje organizacional.

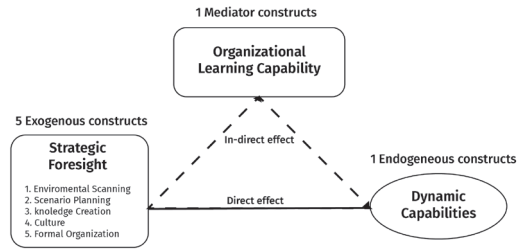
Se propone un diagrama causal para identificar variables relevantes en la industria aeroespacial colombiana, siguiendo las tres dimensiones de Godet, que se refuerzan mutuamente (Figura 7 y 8).

Figura 7. Triángulo Griego



Fuente: (Godet, 2007).

Figura 8. Modelo de medición de prospectiva estratégica que influye en la capacidad dinámica



Fuente: (Almansoori et al., 2022).

Profundización en el Modelo Causal

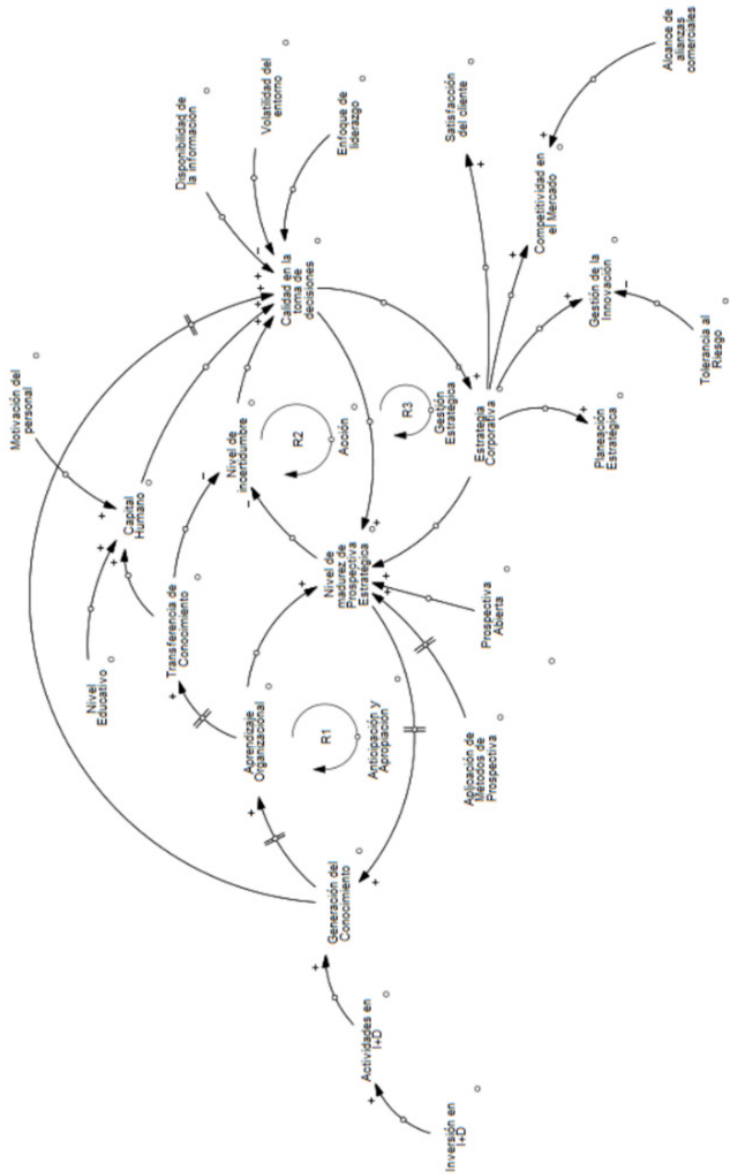
Se inicia con el ciclo de “anticipación y apropiación” (R1), que ilustra cómo, cuando aumenta la inversión en I+D, se incrementan las actividades en I+D. Esto, a su vez, potencia la gestión del conocimiento, el aprendizaje organizacional (con ciertos retrasos) y el nivel de madurez de la prospectiva estratégica, lo que finalmente incrementa la gestión del conocimiento.

En el siguiente ciclo, denominado “Acción”, se observa que, al aumentar el nivel de madurez de la prospectiva estratégica, disminuye el nivel de incertidumbre, lo que mejora la calidad de la toma de decisiones. Esta mejora en la toma de decisiones, a su vez, incrementa el nivel de madurez de la prospectiva corporativa. A través del ciclo de “Gestión Estratégica”, se demuestra que el aumento en el nivel de madurez de la prospectiva estratégica reduce la incertidumbre y mejora la calidad en la toma de decisiones. Esto, a su vez, contribuye a la estrategia corporativa, lo que, en última instancia, eleva el nivel de madurez de la prospectiva estratégica.

Una vez analizados los ciclos (R1, R2 y R3), se aprecia que, si aumenta la gestión del conocimiento: i) incrementa el aprendizaje organizacional, lo que a su vez favorece la transferencia de conocimiento, contribuyendo al aumento del capital humano. Este último aporta a la mejora en la calidad de la toma de decisiones; ii) también incrementa directamente la calidad en la toma de decisiones.

Finalmente, se observa que las variables más influenciadas en igual medida son el nivel de madurez de la prospectiva estratégica y la calidad en la toma de decisiones (ambas influenciadas por cuatro variables). Mientras tanto, la variable más influyente es la estrategia corporativa.

Figura 9. Modelo de diagrama causal de las capacidades de prospección estratégica



Fuente: Elaboración propia a través de la herramienta Vensim.

Una vez identificadas las variables más relevantes, se diseñó el instrumento para medir las capacidades de prospección estratégica en la industria aeroespacial colombiana.

En la siguiente Tabla 2 se presentan las preguntas formuladas a una muestra representativa de las empresas y entidades que conforman el Clúster Aeroespacial Colombiano (CAESCOL). Las preguntas se evaluaron utilizando una escala Likert de 1 a 5, donde 1 corresponde al nivel más bajo y 5 al nivel más alto de madurez.

Tabla 2. Instrumento (encuesta) para medir las capacidades de proyección estratégica

DIMENSIÓN	PREGUNTA	1	2	3	4	5
Caracterización empresarial	Nombre de la empresa	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	Selecciona el rango de empleados que compone la empresa en la cual te encuentras	1 - 10	11 - 50	51 - 150	151 - 300	Más de 300
	Indica el nivel educativo de los empleados según el cargo o rol dentro de la empresa: Operario/a (Nivel 1)	Analfabeta	Bachillerato	Técnico	Pregrado	Posgrado
	Indica el nivel educativo de los empleados según el cargo o rol dentro de la empresa: Coordinador/a (Nivel 2)	Analfabeta	Bachillerato	Técnico	Pregrado	Posgrado
	Indica el nivel educativo de los empleados según el cargo o rol dentro de la empresa: Jefe (Nivel 3)	Analfabeta	Bachillerato	Técnico	Pregrado	Posgrado
	Indica el nivel educativo de los empleados según el cargo o rol dentro de la empresa: Gerente (Nivel 4)	Analfabeta	Bachillerato	Técnico	Pregrado	Posgrado
	Indica el nivel educativo de los empleados según el cargo o rol dentro de la empresa: Director/a (Nivel 5)	Analfabeta	Bachillerato	Técnico	Pregrado	Posgrado
	De 1 a 5, ¿Con qué frecuencia realizan procesos de prospectiva estratégica?	Nunca	Más de un año	Anual	Semestral	Trimestral
	De 1 a 5, ¿Cuál es el nivel de inversión en prospectiva estratégica en la empresa?	Ninguna (o pesos)	1.5 MM a 10 MM	11 MM a 20 MM	21 MM a 50 MM	Muy Alta (Más de 100 millones de pesos)
	Por favor indica, ¿Qué métodos utilizan en el proceso de prospectiva?	Ninguno	No sé	Cualitativos	Cuantitativos	Cualitativos y Cuantitativos

DIMENSIÓN	PREGUNTA				
	1	2	3	4	5
Anticipación	En el proceso de prospectiva estratégica, ¿Cuáles de las siguientes metodologías observan y perciben lo que está pasando?	Vigilancia Tecnológica	Inteligencia Com- petitiva	Delphi	Contextua- lización del futuro cer- cano
	Al momento de realizar el análisis de prospectiva estratégica, ¿Cuáles de los siguientes métodos suelen implemen- tar?	Ninguno	No sé	Problemas emergentes	Tendencias
	Al momento de interpretar lo que realmente está pasando en el entorno, ¿Cuáles de los siguientes métodos sue- len implementar?	Ninguno	No sé	Pensamiento sistémico	Análisis causal
	Al momento de realizar un análisis prospectivo sobre lo que podría pasar, ¿Cuáles de los siguientes métodos sue- len implementar?	Ninguno/ No sé	Análisis de esce- narios	Backcasting/ Roadmap	Modelación y Simulación
	Nota: las 4 preguntas anteriores son de múltiple selección, por tanto, se valoraron según el tipo del método de prospectiva, su com- plejidad y el número de métodos utilizados				
Apropiación	Al obtener los resultados de la pros- pectiva estratégica, qué acciones eje- cutan:	Ninguna	Presentar informe y archivarlo	Comunicar datos repre- sentativos ante la Junta Directiva	Diseñar estrategias con los actores rela- cionados (stakehol- ders)
	De 1 a 5, indica el horizonte de tiempo que suelen considerar en la prospecti- va estratégica	No realizan prospectiva	1 a 3 años	3 a 5 años	5 a 10 años
	De 1 a 5, ¿Cuál es el nivel de conoci- miento técnico del personal que realiza prospectiva estratégica en la compa- ña?	Analfabeta	Bachillerato	Técnico/ Tecnólogo	Posgrado

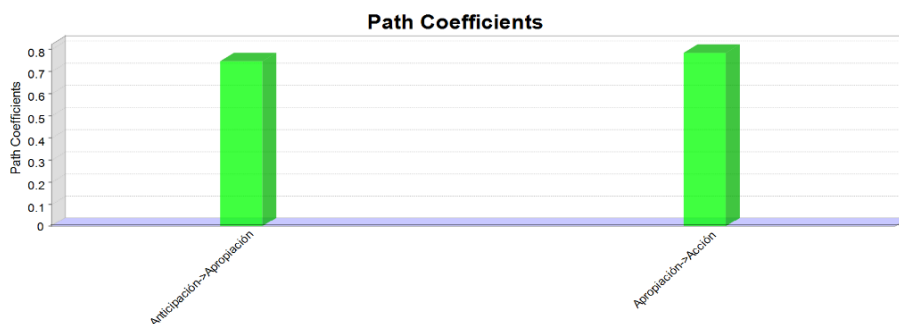
DIMENSIÓN	PREGUNTA	1	2	3	4	5
Apropiación	De 1 a 5, ¿Con qué frecuencia realizan prospectiva estratégica con diferentes actores de la compañía de forma colaborativa?	Nunca	Esporádico	Anual	Semestral	Trimestralmente
	De 1 a 5, ¿Con qué frecuencia la información se comparte libremente entre funciones y niveles jerárquicos?	Nunca	Anual	Semestral	Mensual	Diario
	De 1 a 5, ¿Con qué frecuencia transforman la información actual en nuevo conocimiento?	Nunca	Anual	Semestral	Mensual	Diario
	De 1 a 5, ¿Con qué frecuencia utilizan la información y el conocimiento para la toma de decisiones?	Nunca	Anual	Semestral	Mensual	Diario
	De 1 a 5, ¿Cuántos incentivos de aprendizaje continuo ofrece la empresa?	Ninguno	1	2	4	Más de 5
Acción	De 1 a 5, ¿Cuál consideras que es el nivel de Gestión de innovación de la empresa?	Nulo	Baja	Media	Alta	Muy Alta
	De 1 a 5, ¿Con qué frecuencia realizan Gestión de Control y Calidad?	Nunca	Anual	Semestral	Mensual	Diario
	De 1 a 5, ¿Cuántas alianzas estratégicas tiene la empresa?	Ninguna	1	3	4	Más de 5
	De 1 a 5, ¿Cuál ha sido el nivel de participación de la empresa en proyectos de Co-creación o colaboración de I+D en los últimos 3 años?	Nulo	Bajo	Medio	Alto	Muy Alto
	Indique el rango de empleados que se encuentran en el Departamento o Área de I+D	0	1 – 3	4 – 7	8 – 10	Más de 10
	De 1 a 5, ¿Cuál es el nivel de propensión o inclinación al riesgo de la empresa en actividades de I+D?	Nulo	Bajo	Medio	Alto	Muy Alto
	Fuente: Elaboración propia.					

5. DESARROLLO

Para la validación y el análisis de los resultados, se llevó a cabo un análisis descriptivo. La encuesta fue enviada a las 17 empresas del Clúster Aeroespacial Colombiano (CAESCOL) con el apoyo de expertos de la industria y mediante medios electrónicos. Se obtuvieron datos de 31 empresas, que incluyeron tanto las del clúster como otras relevantes para la industria aeroespacial. La información fue proporcionada por ejecutivos como CEO, directores, vicepresidentes, gerentes, líderes de innovación, consultores y docentes universitarios.

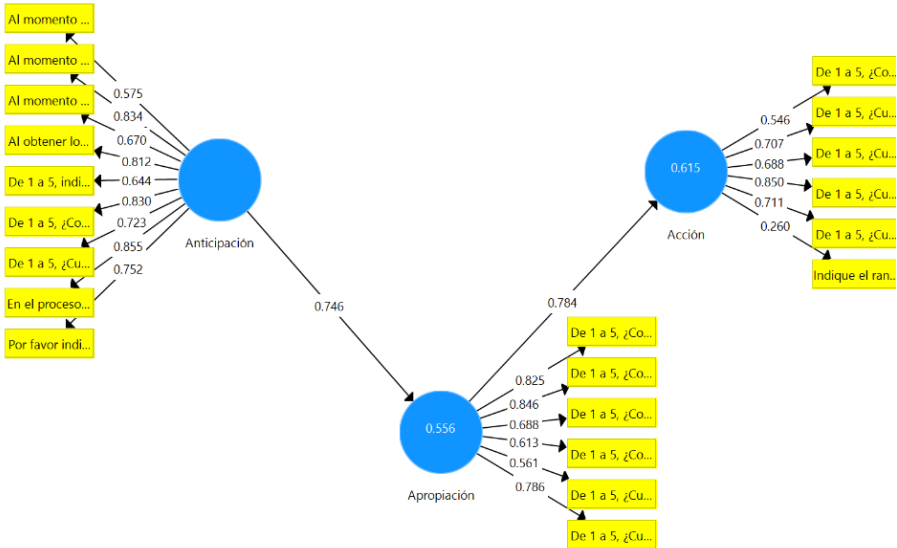
Los datos fueron analizados utilizando el Modelo Estructural (SEM) para validar estadísticamente las preguntas de cada dimensión (anticipación, apropiación y acción) y sus relaciones. Para ello, se utilizó el software Smart PLS, que confirmó, mediante el coeficiente de Path, que las relaciones entre las dimensiones del triángulo griego son positivas: anticipación y apropiación (0.746), y apropiación y acción (0.784).

Figura 10. *Coficiente de Path de las dimensiones Elaboración propia a través del programa Smart PLS*



Mediante el cálculo del algoritmo PLS, se evidencia en la siguiente gráfica que la mayoría de las preguntas relacionadas con cada dimensión del triángulo griego son válidas (con valores superiores a 0.5). Sin embargo, solo una pregunta tuvo una valoración inferior a 0.5, la cual corresponde al componente acción: “Indique el rango de empleados que se encuentran en el Departamento o Área de I+D”.

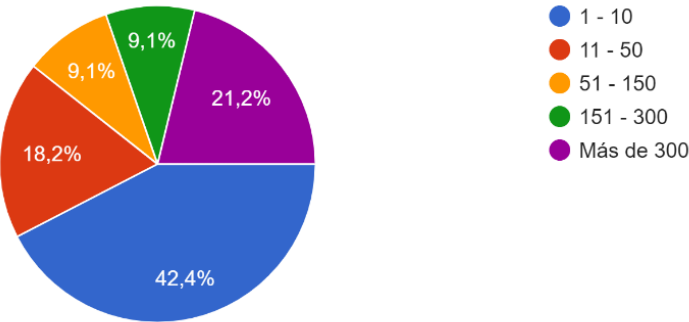
Figura 11. Modelo SEM. Elaboración propia a través del programa Smart PLS



a. Caracterización de una muestra de empresas del sector aeroespacial

A partir de los datos obtenidos de 31 empresas, expertos de la industria e instituciones, se observa (Figura 12) que las organizaciones encuestadas tienen una composición de entre 1 y 10 empleados (42.4%), seguidas de empresas con más de 300 empleados (21.2%) y aquellas con entre 11 y 50 empleados (18.2%). Esta información permite inferir que la mayoría de las organizaciones encuestadas de la industria aeroespacial son pequeñas y medianas empresas, ya que el 69% de los datos corresponden a empresas con entre 1 y 150 empleados.

Figura 12. N° de empleados que componen la empresa

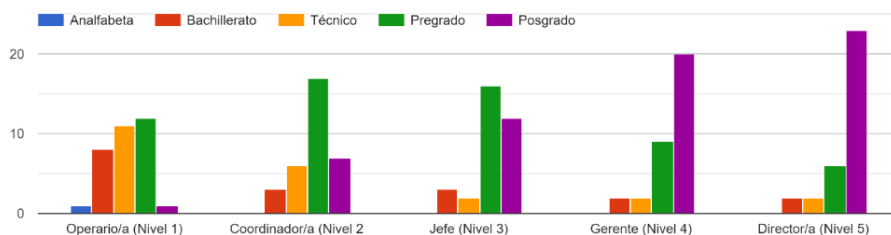


Fuente: Elaboración propia a partir de datos obtenidos.

La siguiente gráfica indica que gran parte de los empleados en los primeros tres niveles jerárquicos (operario, coordinador y jefe) tienen un nivel educativo universitario (pregrado), mientras que, en los dos últimos niveles jerárquicos, el nivel educativo predominante es el de posgrado. No obstante, se evidencia que la industria cuenta con empleados de nivel básico en todos los cinco niveles jerárquicos de la empresa.

Figura 13. Nivel educativo de los empleados según el cargo o rol dentro de la empresa

Indica el nivel educativo de los empleados según el cargo o rol dentro de la empresa

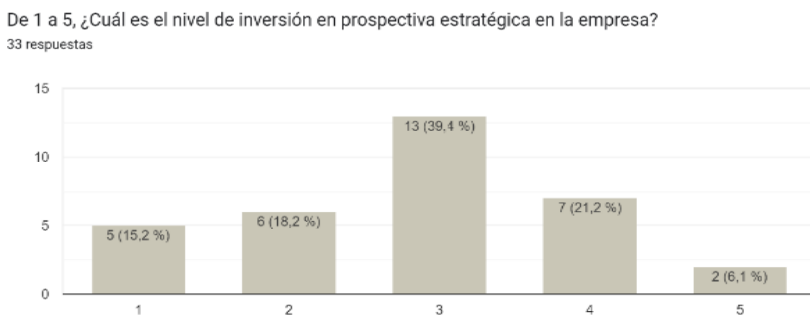


Fuente: Elaboración propia a partir de datos obtenidos.

Las Figuras 12 y 13 facilitan la comprensión del contexto laboral colombiano, en particular en la industria aeroespacial. Como se mencionó anteriormente, la mayoría de las empresas son pequeñas y medianas (69%), y el capital humano enfrenta grandes retos debido a los bajos niveles educativos en todos los niveles jerárquicos.

Además, se infiere que la industria aeroespacial colombiana es emergente, dado que el número de empresas en este sector sigue siendo bajo, lo que implica grandes desafíos tanto en la creación y sofisticación de servicios y productos como en el nivel de habilidades y conocimientos del capital humano.

Desde la dimensión de anticipación, se observó que la mayoría de las empresas (60.6%) realizan procesos de prospectiva estratégica: un 27.3% cada año y un 33.3% semestralmente. Sin embargo, un 24.3% indicó que nunca han realizado procesos de prospectiva estratégica (9.1%), mientras que otras mencionaron que los procesos realizados tienen una frecuencia superior a un año (15.2%).

Figura 14. Frecuencia en que realizan procesos de prospectiva estratégica**Figura 15.** Nivel de inversión en prospectiva estratégica en la empresa

Se observa que el 39.4% de las empresas tienen un nivel de inversión medio-bajo (entre 11 millones COP y 20 millones COP), seguido por un 21.2% que invierte entre 21 millones COP y 50 millones COP.

En cuanto a los métodos de prospectiva, la mayoría de las empresas indicó que utilizan métodos cualitativos y cuantitativos (63.6%), seguidos de los métodos cualitativos (18.2%). De igual manera, las metodologías más utilizadas para:

- Observar y percibir el entorno son: inteligencia competitiva, vigilancia tecnológica, contextualización del futuro cercano y, entrevistas.
- Interpretar lo que está pasando en el entorno son: análisis causal y pensamiento sistémico
- Realizar análisis de prospectiva estratégica son: tendencias, análisis de impacto cruzado e identificación de problemas emergentes.
- Realizar análisis prospectivo sobre lo que podría pasar: análisis de escenarios, *roadmap* y modelación & simulación.

Se observa también que gran parte de los encuestados indicó que, al obtener los resultados de prospectiva estratégica, las acciones que más ejecutan son: diseñar estrategias con los actores relacionados (42.4 %), seguido de la comunicación de los datos representativos ante la junta directiva (30.3 %) y analizar la información por departamento o áreas relacionadas (12.1%).

El horizonte de tiempo que consideran al realizar prospectiva estratégica es entre 3 a 5 años (33.3 %), más de 10 años (24.2 %) y entre 5 a 10 años (15.2 %).

La mayoría de las empresas del estudio muestra altos niveles de conocimiento en metodologías de prospectiva estratégica, tanto cualitativas como cuantitativas, y ejecutan acciones estratégicas basadas en estos conocimientos que generan valor. Establecen horizontes de tiempo cercanos, lo cual es crucial debido al dinamismo del mercado global y la industria aeroespacial. Sin embargo, se identificaron áreas de mejora, como la frecuencia de la prospectiva estratégica: el 60.6% de las empresas la realiza semestral o anualmente, cuando lo ideal sería trimestral debido a la creciente volatilidad del entorno. Desde la perspectiva de la apropiación, se observa que:

- El 48.5 % del capital humano tiene nivel educativo de pregrado, seguido de posgrado (24.2%) y técnico o tecnólogo (21.2 %).
- El 42.4 % de las empresas realizan procesos de prospectiva estratégica de forma colaborativa anualmente, y el 24.2 % semestralmente.
- La información dentro de las compañías se actualiza cada semestre o cada mes (33.3 %).
- El 39.4 % de las entidades transforman la información en nuevo conocimiento mensualmente, y el 33.3 % lo hace semestralmente.
- El 51.5 % de las empresas utilizan la información y conocimiento para tomar decisiones mensualmente, y el 27.3 % lo hace semestralmente.
- El 54.6 % de las empresas ofrecen 1 a 2 incentivos de aprendizaje continuo a sus empleados.

Desde la dimensión de apropiación, se evidencia una alta brecha en el uso y transferencia de la información en las empresas, dado que el uso de los datos se realiza semestral o mensualmente. Sin embargo, la información en tiempo real es cada vez más relevante, ya que los datos interconectados promueven la productividad, reducen tiempos y costos en tareas operativas, y permiten tomar decisiones con menor riesgo al basarse en datos.

Asimismo, desde la perspectiva del capital humano, las empresas y demás entidades del sector enfrentan grandes retos en términos de conocimiento, ya que gran parte de su personal tiene un nivel educativo de pregrado, mientras que el entorno cada vez demanda estar más a la vanguardia y generando nuevo conocimiento.

Finalmente, desde la dimensión de la acción, se encontró que:

- El 48.5% de las entidades encuestadas respondieron que cuentan con un nivel medio en la gestión de la innovación, seguido del 27.3% con un nivel de gestión alto.

- Las empresas suelen realizar diariamente (30.3%) o semestralmente (27.3%) gestión de control y calidad.
- El 30.3% de las entidades indicó que cuentan con 4 alianzas estratégicas y un 27.3% cuentan con más de 5 alianzas.
- En los últimos 3 años, el nivel de participación de la empresa en proyectos de Co-creación y creación ha sido medio (30.3%) y alto (27.3%).
- La mayoría de las empresas tienen un nivel medio (45.5%) de propensión al riesgo en actividades de I+D, seguido de un 21.2% con un nivel bajo o alto de propensión al riesgo.

A partir de los datos anteriores de la dimensión de acción, se infiere que gran parte de las empresas (75.8%) realizan esfuerzos para innovar a partir de los resultados obtenidos en la prospectiva estratégica.

Por otro lado, se evidencia una relación positiva entre las alianzas estratégicas y la participación en proyectos de co-creación, lo que sugiere que existe una alta probabilidad de generar valor e innovar mediante alianzas estratégicas en la industria aeroespacial.

No obstante, también se encontró que la mayoría de las empresas (66.7%) tienen una cultura de propensión al riesgo media (45.5%) y baja (21.2%) en relación con las actividades de I+D. Esto ralentiza, en muchas ocasiones, la toma de decisiones estratégicas en I+D y afecta la preparación oportuna para enfrentar los desafíos que el mercado demandará en el futuro, tanto cercano como lejano.

6. CONCLUSIONES

Las capacidades de prospección (CP) se consideran una capacidad dinámica (Ramírez et al., 2013; Rohrbeck y Gemünden, 2011) que habilita la agilidad estratégica en las empresas (Rhisiart et al., 2015). Estas capacidades permiten identificar e interpretar cambios en el entorno, mejorar la gestión estratégica, aumentar la innovación y el aprendizaje organizacional, y tomar decisiones estratégicas (Dadkhah et al., 2018). Al desarrollar y mejorar las capacidades de prospectiva estratégica, las empresas pueden planificar de manera más clara y precisa. Para lograr esto en un entorno dinámico, se recomienda realizar la prospectiva y la planeación estratégica de forma trimestral.

Se concluye que las CP empresariales están influenciadas por capacidades dinámicas, impactando la toma de decisiones y el desarrollo sostenible en entornos de alta incertidumbre. El análisis estadístico a través del Modelo Estructural (SEM) confirma que las dimensiones del triángulo griego (anticipación, apropiación y acción) están positivamente relacionadas.

Las variables evaluadas en escala Likert de 1 a 5 que permiten medir las capacidades de prospección en la industria aeroespacial colombiana son: anticipación, apropiación y acción.

- **Anticipación:** Comprende los procesos de prospectiva estratégica (PE)
 - Frecuencia en que se realizan los procesos de PE.
 - Nivel de inversión en PE.
 - Métodos utilizados en PE.
 - Metodologías de PE al:
 - Observar y percibir lo que sucede en el entorno.
 - Analizar e interpretar el momento actual.
 - Analizar e interpretar futuros posibles (lo que podría pasar).
 - Acciones de ejecución luego de realizar PE.
 - Horizonte de tiempo al momento de realizar PE.
- **Apropiación:** Abarca el aprendizaje organizacional (tanto individual como colectivo) y la gestión del conocimiento
 - Nivel de conocimiento técnico del personal que realiza PE.
 - Frecuencia en que realizan PE con diferentes actores de la compañía.
 - Frecuencia de transferencia de la información entre funciones y niveles jerárquicos.
 - Frecuencia de transformación de la información actual en nuevo conocimiento.
 - Frecuencia de uso de la información y el conocimiento para la toma de decisiones.
 - Número de incentivos de aprendizaje continuo que ofrece la empresa.
- **Acción:** incluye la gestión de la innovación que a su vez comprende la gestión y control de calidad, las alianzas estratégicas, la Co-creación y la propensión al riesgo para la toma de decisiones
 - Nivel de Gestión de innovación de la empresa.
 - Frecuencia en que se realiza la Gestión de Control y Calidad.
 - Número de alianzas estratégicas que tiene la empresa.
 - Nivel de participación de la empresa en proyectos de Co-creación o colaboración de I+D en los últimos 3 años
 - Nivel de propensión o inclinación al riesgo de la empresa en actividades de I+D

El instrumento propuesto para medir las capacidades de prospección (CP) en la industria aeroespacial ha sido validado a través del Modelo Estructural (SEM). Este análisis estadístico muestra una relación positiva entre las dimensiones del triángulo griego: anticipación y apropiación (0.746), y apropiación y acción (0.784), confirmando su validez.

Los resultados indican que el nivel de madurez de las empresas colombianas del sector aeroespacial para anticiparse a los cambios del entorno es medio-bajo. La mayoría de las empresas son pequeñas y medianas (69 %) y enfrentan retos en la creación y sofisticación de productos y servicios, así como en la capacitación del capital humano, donde el 48.5% tiene un nivel educativo de pregrado.

En la dimensión de anticipación, la mayoría de las empresas realiza ejercicios de prospectiva estratégica semestral o anualmente (60.6 %), lo cual no es suficiente en un entorno volátil. Además, la inversión en estos procesos es media-baja (entre 11 y 50 millones de pesos), lo que limita su efectividad. En la dimensión de apropiación, se evidencian brechas significativas en la gestión del conocimiento, con transferencia y uso de datos semestral o mensualmente, a pesar de los recursos disponibles para hacerlo en tiempo real. En la dimensión de acción, la cultura de propensión al riesgo es media (45.5 %) y baja (21.2 %) en relación con I+D, lo cual puede ralentizar la toma de decisiones estratégicas y afectar la preparación para futuros desafíos.

Adicionalmente, el Plan de Acción 2021, basado en el Plan Estratégico Aeronáutico 2030, destaca la necesidad de políticas públicas que faciliten la financiación para una entidad que reúna industria, academia y estado, consolidando una hoja de ruta para el desarrollo aeronáutico colombiano.

Se observa también una relación positiva entre las alianzas estratégicas y la participación en proyectos de Co-Creación, sugiriendo que estas alianzas pueden generar valor e innovación.

Se recomienda a las empresas replantear su cultura organizacional respecto a la propensión al riesgo, ya que una baja propensión puede ralentizar la toma de decisiones estratégicas en I+D y afectar la capacidad para enfrentar futuros desafíos.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Accenture. (2021). *Accenture Commercial Aerospace Insight Report Prepare for takeoff Commercial Aerospace Insight Report*.
- Adrián, L., Rosas, S., & Metodológico Resumen, A. (2013). El Path Analysis: conceptos básicos y ejemplos de aplicación. *Revista Argentina de Ciencias Del Comportamiento*, 5, 52–66. www.psych.unc.edu.ar/racc
- Aerocivil. (2021). *Plan de Acción, II Trimestre 2021*.
- Ali Almansoori, B. S., & Asmai, S. A. (2021). Gauging the Importance of Strategic Foresight Factors Affecting Public Organisational Dynamic Capabilities. *International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology*, 12(5). <https://doi.org/10.30880/ijscet.2021.12.05.035>
- Almansoori, B. S. A., Asmail, S. A., & Kamalrudin, M. (2022). Mediation Model of Strategic Foresight Influencing Dynamic Capability. *International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology*, 13(2 Special Issue), 120–133. <https://doi.org/10.30880/ijscet.2022.13.02.011>
- Amlt, R., & Schoemaker, P. J. H. (1993). STRATEGICASSETSANDORGANIZATIONAL RENT. In *Strategic Management Journal* (Vol. 14).

- Andriopoulos, C., & Gotsi, M. (2006). Probing the future: Mobilising foresight in multiple-product innovation firms. *Futures*, 38(1), 50–66. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2005.04.003>
- Barney, J. (1991). Firm Resources and Sustained Competitive Advantage. *Journal of Management*, 17(1), 99–120. <https://doi.org/10.1177/014920639101700108>
- Calof, J., Miller, R., & Jackson, M. (2012). Towards impactful foresight: Viewpoints from foresight consultants and academics. *Foresight*, 14(1), 82–97. <https://doi.org/10.1108/14636681211210387>
- Carlos, J., Mejía, R., Enrique, F., Echeverry, U., Mendoza, S. P., Ivan, J., Sepúlveda, G., & Sosa, F. P. (2021). *NOTA DE ESTUDIO Asunto: Industria Aeronáutica y Cadena de Suministro FORTALECIMIENTO DE LA INDUSTRIA AERONÁUTICA COLOMBIANA ENFRENTANDO LA NUEVA REALIDAD DE LA POST-PANDEMIA*.
- Cheah, S. L. Y., Yang, Y., & Saritas, O. (2019). Reinventing product-service systems: the case of Singapore. *Foresight*, 21(3), 332–361. <https://doi.org/10.1108/FS-12-2018-0107>
- Coates, J. F. (2010). The future of foresight-A US perspective. *Technological Forecasting and Social Change*, 77(9), 1428–1437. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2010.07.009>
- Cohen, W. M., & Levinthal, D. A. (1990). Absorptive Capacity: A New Perspective on Learning and Innovation. In *Source: Administrative Science Quarterly* (Vol. 35, Issue 1).
- Core of Science. (2021, October 4). *Tree Of Science*. Tree Of Science.
- Cuhls, K. (2003). From forecasting to foresight processes - New participative foresight activities in Germany. In *Journal of Forecasting* (Vol. 22, Issue 2, pp. 93–111). John Wiley and Sons Ltd. <https://doi.org/10.1002/for.848>
- da Costa, O., Warnke, P., Cagnin, C., & Scapolo, F. (2008). The impact of foresight on policy-making: Insights from the FORLEARN mutual learning process. *Technology Analysis and Strategic Management*, 20(3), 369–387. <https://doi.org/10.1080/09537320802000146>
- Dadkhah, S., Bayat, R., Fazli, S., Tork, E. K., & Ebrahimi, A. (2018). Corporate foresight: developing a process model. *European Journal of Futures Research*, 6(1). <https://doi.org/10.1186/s40309-018-0147-7>
- Daft, R. L., & Weick, K. E. (1984). *Academy of Management Review* (Vol. 9, Issue 2).
- Dierickx, I., & Cool, K. (1989). Asset Stock Accumulation and Sustainability of Competitive Advantage. *Management Science*, 35(12), 1504–1511. <https://doi.org/10.1287/mnsc.35.12.1504>
- Durance, P., & Godet, M. (2010). Scenario building: Uses and abuses. *Technological Forecasting and Social Change*, 77(9), 1488–1492. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2010.06.007>
- Edith Penrose. (1995). *The Theory of the Growth of the Firm* (Oxford).
- Eisenhardt, K. M., & Martin, J. A. (2000). DYNAMIC CAPABILITIES: WHAT ARE THEY? In *Strategic Management Journal Strat. Mgmt. J* (Vol. 21).

- Ena, O. v., Chulok, A. A., & Shashnov, S. A. (2017). Networking for sustainable Foresight: A Russian study. *Technological Forecasting and Social Change*, 119, 268–279. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2016.05.014>
- Escobar, J. F., Anderson, J., Zuluaga, F., Castañeda, D., Londono, A. A., Alfonso, G., & Martínez, G. (2022). Science , Technology , And Innovation Capabilities As Main Determinants Of Economic Performance In Aerospace Companies. *Journal of Language and Linguistic Studies*, 18(4), 1065–1083. <http://jlls.org/index.php/jlls/article/view/5098/1763>
- Florez, J. (2021). Towards a competitive ST system in the defense sector. *Ingeniería Solidaria*, 17(2), 1–28. <https://doi.org/10.16925/2357-6014.2021.02.06>
- Gammeltoft, P., & Hobdari, B. (2017). Emerging market multinationals, international knowledge flows and innovation. In *Int. J. Technology Management* (Vol. 74).
- Giraldo, G., Anderson, J., Valencia, L., & Escobar, J. (2023). Research, Development and Innovation Management Process to Generate Aerospace Defence Technologies. *International Journal of Innovation, Management and Technology*, 14(4), 128–137. <https://doi.org/10.18178/ijimt.2023.14.4.949>
- Giraldo Martinez, G. A., Flórez Zuluaga, J. A., Morante Granobles, D. F., & Escobar Soto, J. F. (2023). Economic Effects of Investment in Defense Research and Development and its Impact on Productivity in Developed Countries. *Revista Facultad de Ciencias Económicas*, 31(1), 13–29. <https://doi.org/10.18359/rfce.6223>
- Godet, M. (2007). *Prospectiva Estratégica: problemas y métodos*. <http://www.lapropective.fr/>
- Godet, M., & Durance, P. (2011). *La prospectiva estratégica*.
- Haarhaus, T., & Liening, A. (2020). Building dynamic capabilities to cope with environmental uncertainty: The role of strategic foresight. *Technological Forecasting and Social Change*, 155. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120033>
- Havas, A., Schartinger, D., & Weber, M. (2010). The impact of foresight on innovation policy-making: Recent experiences and future perspectives. *Research Evaluation*, 19(2), 91–104. <https://doi.org/10.3152/095820210X510133>
- Izadi, M., Seiti, H., & Jafarian, M. (2022). Foresight: a new approach based on the Z-number cognitive map. *European Journal of Futures Research*, 10(1). <https://doi.org/10.1186/s40309-022-00188-5>
- Joneidi Jafari, M., & NiliPourTabataba'i, S. A. (2017). Corporate foresight and its effect on innovation, strategic decision making and organizational performance (case study: Iranian banking industry). *Foresight*, 19(6), 559–576. <https://doi.org/10.1108/FS-07-2017-0035>
- Kogut, B., & Zander, U. (1992). Knowledge of the firm. Combinative capabilities, and the replication of technology. In *Knowledge in Organisations* (pp. 17–36). Taylor and Francis. <https://doi.org/10.1287/orsc.3.3.383>
- Kononiuk, A. (2022). Determinants of Foresight Maturity in SME Enterprises of Poland. *Foresight and STI Governance*, 16(1), 69–81. <https://doi.org/10.17323/2500-2597.2022.1.69.81>

- Kumar, K., Balarman, & R.P. Sundarraj. (2017). *Individual Foresight Capability in Organizations: Role of Information Acquisition*.
- Lee, C., Lee, K., & Pennings, J. M. (2001). Internal capabilities, external networks, and performance: A study on technology-based ventures. *Strategic Management Journal*, 22(6–7), 615–640. <https://doi.org/10.1002/smj.181>
- Lee, Y., & Kreiser, P. M. (2018). Entrepreneurial orientation and ambidexterity: Literature review, challenges, and agenda for future research. In *Advances in the Study of Entrepreneurship, Innovation, and Economic Growth* (Vol. 28, pp. 37–62). Emerald Group Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1108/S1048-473620180000028002>
- Maertins, A. (2016). From the Perspective of Capability: Identifying Six Roles for a Successful Strategic Foresight Process. *Strategic Change*, 25(3), 223–237. <https://doi.org/10.1002/jsc.2057>
- Mafimisebi, O. P., Obembe, D., & Aluko, O. (2020). Organization and product design pairings: A review of product innovation capabilities, conceptualization, and future directions. *Strategic Change*, 29(1), 13–24. <https://doi.org/10.1002/jsc.2306>
- Magruk, A. (2021). Analysis of uncertainties and levels of foreknowledge in relation to major features of emerging technologies —the context of foresight research for the fourth industrial revolution. *Sustainability (Switzerland)*, 13(17). <https://doi.org/10.3390/su13179890>
- March, J. G. (1991). Exploration and Exploitation in Organizational Learning. *Organization Science*, 2(1), 71–87. <https://doi.org/10.1287/orsc.2.1.71>
- Martin, B. R. (1995). Foresight in Science and Technology. *Technology Analysis & Strategic Management*, 7(2), 139–168. <https://doi.org/10.1080/09537329508524202>
- Mikalef, P., Pateli, A., & Research, C. (2017). *A strategic alignment model for IT flexibility and dynamic capabilities: Toward an assessment tool*. <https://www.researchgate.net/publication/316608612>
- Milshina, Y., & Vishnevskiy, K. (2018). Potentials of collaborative foresight for SMEs. *Technology Analysis and Strategic Management*, 30(6), 701–717. <https://doi.org/10.1080/09537325.2017.1406906>
- Nelson, R. R., & Winter, S. G. (1982). *An Evolutionary Theory of Economic Change*.
- Paliokaite, A., & Pačesa, N. (2015). The relationship between organisational foresight and organisational ambidexterity. *Technological Forecasting and Social Change*, 101, 165–181. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2014.03.004>
- Paliokaitė, A., Pačesa, N., & Sarpong, D. (2014). Conceptualizing Strategic Foresight: An Integrated Framework. *Strategic Change*, 23(3–4), 161–169. <https://doi.org/10.1002/jsc.1968>
- Popper, R. (2008). How are foresight methods selected? *Foresight*, 10(6), 62–89. <https://doi.org/10.1108/14636680810918586>
- ProColombia. (2021, November). *Aeronáutica. ¿Por Qué Invertir En El Sector Aeronáutico En Colombia?*

- Pulsiri Nonthapat, & Vatananan-Thesenvitz, R. (2018). *A Systematic Literature Review of Dynamic Capabilities, Strategic Foresight and Organizational Learning*.
- Rhisiart, M., Miller, R., & Brooks, S. (2015). Learning to use the future: Developing foresight capabilities through scenario processes. *Technological Forecasting and Social Change*, 101, 124–133. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2014.10.015>
- Rodríguez Cortezo, J. (2001). *Introducción a la Prospectiva: metodologías, fases y explotación de resultados*.
- Rohrbeck, R. (2010). *Harnessing a network of experts for competitive advantage: technology scouting in the ICT industry*.
- Rohrbeck, R. (2012). Exploring value creation from corporate-foresight activities. *Futures*, 44(5), 440–452. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2012.03.006>
- Rohrbeck, R., Arnold, H. M., Heuer, J., Arnold, H. M., & Heuer, J. (2007). *Strategic Foresight in multinational enterprises-a case study on the Deutsche Telekom Laboratories*.
- Rohrbeck, R., & Kum, M. E. (2018). Corporate foresight and its impact on firm performance: A longitudinal analysis. *Technological Forecasting and Social Change*, 129, 105–116. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2017.12.013>
- Rohrbeck, R., & Schwarz, J. O. (2013). The value contribution of strategic foresight: Insights from an empirical study of large European companies. *Technological Forecasting and Social Change*, 80(8), 1593–1606. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2013.01.004>
- Sarpong, D., & O'Regan, N. (2014). The Organizing Dimensions of Strategic Foresight in High-Velocity Environments. *Strategic Change*, 23(3–4), 125–132. <https://doi.org/10.1002/jsc.1965>
- Schoemaker, P. J. H., & Day, G. (2021). Preparing Organizations for Greater Turbulence. *California Management Review*, 63(4), 66–88. <https://doi.org/10.1177/00081256211022039>
- Schoen, A., Könnölä, T., Warnke, P., Barré, R., & Kuhlmann, S. (2011). Tailoring Foresight to field specificities. *Futures*, 43(3), 232–242. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2010.11.002>
- Shang, S. S. C., Wu, S.-H., & Yao, C.-Y. (2010). A dynamic innovation model for managing capabilities of continuous innovation) “A dynamic innovation model for managing capabilities of continuous innovation” A dynamic innovation model for managing capabilities. In *Int. J. Technology Management* (Vol. 51, Issue 4).
- Slaughter, R. A. (1997). *Developing and Applying Strategic Foresight*.
- Teece, D. J. (2007). Explicating dynamic capabilities: The nature and microfoundations of (sustainable) enterprise performance. *Strategic Management Journal*, 28(13), 1319–1350. <https://doi.org/10.1002/smj.640>
- Teece, D. J., Pisano, G., & Shuen, A. (1997). Dynamic capabilities and strategic management. *Strategic Management Journal*, 18(7), 509–533. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0266\(199708\)18:7<509::AID-SMJ882>3.0.CO;2-Z](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0266(199708)18:7<509::AID-SMJ882>3.0.CO;2-Z)

- Tripsas, M., & Gavetti, G. (2000). CAPABILITIES, COGNITION, AND INERTIA: EVIDENCE FROM DIGITAL IMAGING. In *Strategic Management Journal Strat. Mgmt. J* (Vol. 21).
- Vecchiato, R. (2012). Environmental uncertainty, foresight and strategic decision making: An integrated study. *Technological Forecasting and Social Change*, 79(3), 436–447. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2011.07.010>
- Vecchiato, R. (2015). Creating value through foresight: First mover advantages and strategic agility. *Technological Forecasting and Social Change*, 101, 25–36. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2014.08.016>
- Voros, J. (2003). A generic foresight process framework. In *Foresight* (Vol. 5, Issue 3, pp. 10–21). Emerald Group Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1108/14636680310698379>
- Weigand, K., Flanagan, T., Dye, K., & Jones, P. (2014). Collaborative foresight: Complementing long-horizon strategic planning. *Technological Forecasting and Social Change*, 85, 134–152. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2013.08.016>
- Wernerfelt, B. (1984). A Resource-based View of the Firm. In *Strategic Management Journal* (Vol. 5).
- Yoon, J., Kim, Y., Vonortas, N. S., & Han, S. W. (2018). Corporate foresight and innovation: the effects of integrative capabilities and organisational learning. *Technology Analysis and Strategic Management*, 30(6), 633–645. <https://doi.org/10.1080/09537325.2017.1395407>
- Zeng, M. A., Koller, H., & Jahn, R. (2019). Open radar groups: The integration of online communities into open foresight processes. *Technological Forecasting and Social Change*, 138, 204–217. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.08.022>
- Zuluaga, J. A. F., Escobar, J. F., Martínez, G. A. G., D'Aleman, J. C., & Vallejo, A. O. (2024). Model for measuring technological maturity for critical sector industries. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 10(1). <https://doi.org/10.1016/j.joitmc.2023.100194>

CAPÍTULO 6.

VUELO HACIA EL FUTURO: ESTRATEGIAS Y DESAFÍOS DE IMPLEMENTACIÓN DE TECNOLOGÍAS 4.0 EN LA GESTIÓN AÉREA MILITAR DE MÉXICO Y COLOMBIA

Luis Rodrigo Valencia Pérez

<https://orcid.org/0000-0002-1590-5000>

royvalper@hotmail.com

Gibrán Aguilar Rangel

<https://orcid.org/0000-0002-5865-2875>

agangel@live.com

Francisco Flores Agüero

<https://orcid.org/0000-0002-6708-8401>

francisco.flores@uaq.mx

/ Universidad Autónoma de Querétaro

1. INTRODUCCIÓN

La transformación digital ha emergido como un factor crucial en la evolución de la gestión aérea militar, redefiniendo prácticas y desafíos operativos. En este contexto, la implementación de Tecnologías 4.0 ha sido un catalizador fundamental para potenciar la eficiencia y la seguridad en las operaciones militares aéreas, especialmente en naciones como México y Colombia. Este capítulo analiza detalladamente las estrategias y desafíos asociados con la adopción de Tecnologías 4.0 en la gestión aérea militar de estos países.

La importancia estratégica de este tema se destaca al considerar la creciente complejidad de los escenarios operativos y la necesidad de mantener la superioridad en el ámbito aeroespacial. Para comprender plenamente este fenómeno, es esencial contextualizar la transformación digital en el marco específico de la gestión aérea militar.

Al inicio de esta exploración, se plantean los objetivos que guiarán el análisis detallado. Este capítulo tiene como objetivo principal arrojar luz sobre las estrategias efectivas y los desafíos inherentes a la incorporación de Tecnologías 4.0 en la gestión aérea militar de México y Colombia.

El análisis se llevará a cabo considerando las experiencias de naciones líderes en esta transición, extrayendo lecciones aprendidas que se puedan aplicar de manera efectiva en el contexto específico de estas dos naciones latinoamericanas.

Contextualización de la Gestión Aérea Militar

La transformación digital ha emergido como un factor crucial en la evolución de la gestión aérea militar, redefiniendo prácticas y desafíos operativos. En este contexto, la implementación de Tecnologías 4.0 ha sido un catalizador fundamental para potenciar la eficiencia y la seguridad en las operaciones militares aéreas, especialmente en naciones como México y Colombia. Este capítulo analiza detalladamente las estrategias y desafíos asociados con la adopción de Tecnologías 4.0 en la gestión aérea militar de estos países.

La importancia estratégica de este tema se destaca al considerar la creciente complejidad de los escenarios operativos y la necesidad de mantener la superioridad en el ámbito aeroespacial. Para comprender plenamente este fenómeno, es esencial contextualizar la transformación digital en el marco específico de la gestión aérea militar.

Al inicio de esta exploración, se plantean los objetivos que guiarán el análisis detallado. Este capítulo tiene como objetivo principal arrojar luz sobre las estrategias efectivas y los desafíos inherentes a la incorporación de Tecnologías 4.0 en la gestión aérea militar de México y Colombia.

El análisis se llevará a cabo considerando las experiencias de naciones líderes en esta transición, extrayendo lecciones aprendidas que se puedan aplicar de manera efectiva en el contexto específico de estas dos naciones latinoamericanas.

Figura 1. *Tecnologías aeroespaciales*



Fuente: Fuerza Aérea Mexicana E.A. 401.

En Colombia, el documento ‘Plan Estratégico Institucional Fuerza Aérea Colombiana 2010-2030’ (FAC, 2011) destaca la intención de fortalecer la capacidad operativa mediante la modernización y la incorporación de Tecnologías 4.0. La adopción de sistemas de información avanzados y la formación del personal en el manejo de tecnologías emergentes son aspectos destacados en los esfuerzos de Colombia por mantenerse a la vanguardia en la gestión aérea militar.

Ambos países enfrentan desafíos comunes, como la adaptación de la fuerza laboral y la integración de sistemas tecnológicos avanzados en estructuras operativas existentes. Sin embargo, el compromiso visible con la modernización sugiere una respuesta proactiva a estos desafíos.

Justificación de la Implementación de Tecnologías 4.0 en la Gestión Aérea Militar de México

La incorporación de Tecnologías 4.0 en la gestión aérea militar de México se fundamenta en una necesidad imperante de mejorar la eficiencia operativa y la toma de decisiones estratégicas en un entorno dinámico y desafiante. Esta justificación se apoya en la visión delineada en el ‘Plan de Desarrollo Institucional de la Fuerza Aérea Mexicana’ (Secretaría de la Defensa Nacional, 2019), que destaca la importancia de adoptar tecnologías avanzadas para fortalecer las capacidades operativas.

En México, la gestión aérea militar enfrenta desafíos complejos, como la diversidad de amenazas y la necesidad de mantener una respuesta rápida y efectiva. La implementación de Tecnologías 4.0 se percibe como una estrategia integral para abordar estos desafíos. La digitalización de procesos, la integración de sistemas de información avanzados y el uso de análisis predictivo se destacan como medidas cruciales para optimizar la eficiencia operativa y mejorar la toma de decisiones en tiempo real.

En Colombia, la ‘Visión 2010-2030’ (Fuerza Aérea Colombiana, 2011) también subraya la necesidad de adoptar Tecnologías 4.0 como parte integral de su enfoque hacia la modernización. La justificación radica en la capacidad de estas tecnologías para proporcionar una ventaja estratégica, mejorando la conciencia situacional, la interoperabilidad y la capacidad de adaptación a escenarios operativos cambiantes.

Ambos países reconocen que la implementación de Tecnologías 4.0 en la gestión aérea militar es esencial para mantener la superioridad en un entorno geopolítico y tecnológico en constante evolución. La justificación no solo se centra en la mejora de la eficiencia operativa, sino también en la necesidad de estar preparados para enfrentar amenazas emergentes y garantizar la seguridad nacional.

Objetivos del Capítulo

El presente capítulo tiene como propósito delinear de manera clara y precisa los objetivos fundamentales que guiarán el análisis detallado de la implementación de Tecnologías 4.0 en la gestión aérea militar de México y Colombia, dentro del contexto del libro ‘Vuelo hacia el Futuro: Estrategias y Desafíos de Implementación

de Tecnologías 4.0 en la Gestión Aérea Militar de México y Colombia'. Estos objetivos se alinean con la búsqueda de soluciones innovadoras y estrategias efectivas para los desafíos específicos que enfrentan ambas naciones en este ámbito crítico.

1. Evaluar el Estado Actual de la Implementación en México y Colombia:

- Examinar de manera detallada las iniciativas y proyectos implementados hasta la fecha en México y Colombia para la integración de Tecnologías 4.0 en la gestión aérea militar.
- Contrastar los avances alcanzados en ambos países, identificando similitudes y diferencias en sus enfoques.

2. Analizar los Desafíos y Oportunidades Actuales:

- Identificar y analizar los desafíos específicos surgidos durante la implementación de Tecnologías 4.0 en la gestión aérea militar de México y Colombia.
- Explorar las oportunidades emergentes que estas tecnologías presentan en el ámbito militar, considerando aspectos estratégicos y operativos.

3. Comparar Experiencias Internacionales Relevantes:

- Analizar experiencias internacionales destacadas en la implementación de Tecnologías 4.0 en la gestión aérea militar, proporcionando un marco comparativo para México y Colombia.
- Extraer lecciones aprendidas y buenas prácticas de casos internacionales relevantes.

4. Proponer Estrategias Adaptadas a Realidades Regionales:

- Desarrollar estrategias específicas adaptadas al contexto político, económico y logístico de México y Colombia para superar los desafíos identificados.
- Enfatizar la necesidad de estrategias flexibles que consideren las particularidades de cada país.

5. Anticipar Tendencias y Futuras Innovaciones:

- Explorar y anticipar las tendencias futuras en Tecnologías 4.0 y su posible impacto en la gestión aérea militar.
- Considerar la adaptabilidad a los cambios tecnológicos y la preparación para la integración de innovaciones emergentes.

2. PANORAMA TECNOLÓGICO EN LA GESTIÓN AÉREA MILITAR

La gestión tecnológica e innovación desempeñan un papel fundamental en la evolución de la aviación militar. Este capítulo se sumerge en el panorama tecnológico actual, explora la evolución histórica de las tecnologías en la aviación militar, describe las tecnologías 4.0 más relevantes y analiza su potencial impacto en la eficiencia operativa.

2.1 Evolución Histórica de las Tecnologías en la Aviación Militar

La historia de la aviación militar está intrínsecamente ligada a la evolución de las tecnologías. Desde los primeros días de la aviación militar en la Primera Guerra Mundial hasta la era contemporánea, las tecnologías han experimentado un desarrollo vertiginoso. Se han logrado avances en sistemas de propulsión, navegación, comunicación y armamento. La adopción de aviones de combate, aviones no tripulados y sistemas de defensa antiaérea ha redefinido las capacidades y estrategias militares. Esta evolución histórica proporciona una base sólida para comprender el estado actual de la gestión tecnológica en la aviación militar (Smith, 2018).

La historia de la aviación militar en México y Colombia refleja una evolución constante y significativa en términos de tecnologías aplicadas. Desde los primeros vuelos de aeronaves militares hasta la era actual de aviones de combate altamente avanzados, la tecnología ha sido un factor clave en la transformación de las capacidades y estrategias de defensa en ambos países. Este ensayo examina la evolución histórica de las tecnologías en la aviación militar, destacando ejemplos y casos de éxito en México y Colombia.

En México, la aviación militar ha experimentado un cambio notable desde sus primeros días. La Fuerza Aérea Mexicana (FAM) ha adoptado una serie de tecnologías que van desde aviones de hélice hasta sistemas de propulsión a chorro. Un ejemplo destacado es la introducción del avión de combate F-5 Tiger II en la década de 1980, que representó un salto significativo en términos de capacidades operativas. Este avión incorporó tecnologías avanzadas para su tiempo, incluidos sistemas de radar modernos y capacidades de combate aire-aire. La FAM ha continuado modernizando su flota, incorporando aviones de última generación y sistemas de aviónica avanzados para mantenerse a la vanguardia en términos de capacidad operativa (Gómez, 2017).

Por su parte, Colombia ha enfrentado desafíos particulares en su historia de aviación militar, especialmente relacionados con la lucha contra el narcotráfico y grupos insurgentes. La Fuerza Aeroespacial Colombiana (FAC) ha desempeñado un papel crucial en estas operaciones, adoptando tecnologías especializadas para mejorar la vigilancia, el reconocimiento y la respuesta rápida. Un caso emblemático es el uso de aviones de inteligencia y vigilancia como el Embraer EMB 314 Super Tucano, adaptado para misiones de ataque ligero y contrainsurgencia. La FAC ha integrado sistemas avanzados de comunicación y vigilancia en estas aeronaves, mejorando su capacidad para responder de manera efectiva a las amenazas en entornos complejos (Vargas, 2020).

La introducción de tecnologías 4.0 en la aviación militar de México y Colombia ha marcado un hito en la eficiencia operativa y la toma de decisiones estratégicas. La implementación de sistemas de información en tiempo real, el análisis de big data y la conectividad avanzada ha permitido una mayor coordinación y eficacia en las operaciones aéreas. Ambos países han incorporado sistemas de gestión logística y mantenimiento predictivo para optimizar el rendimiento de sus flotas, mejorando la disponibilidad de aeronaves y reduciendo los tiempos de inactividad (Secretaría de la Defensa Nacional, 2021; Ministerio de Defensa Nacional de Colombia, 2019).

En resumen, la evolución histórica de las tecnologías en la aviación militar de México y Colombia no solo destaca la adopción de avances tecnológicos en la gestión operativa, sino también la capacidad de adaptación a desafíos específicos. Los casos de éxito mencionados reflejan la importancia de la innovación continua para mantener la superioridad operativa en un entorno geopolítico y de seguridad en constante cambio.

2.2 Descripción de Tecnologías 4.0 Relevantes

En la era actual, la aviación militar está inmersa en la revolución de las Tecnologías 4.0. Sistemas de inteligencia artificial, internet de las cosas (IoT), análisis de big data y ciberseguridad son solo algunas de las tecnologías clave que están transformando la gestión aérea militar. La interconexión de plataformas y la capacidad de recopilar y analizar grandes cantidades de datos en tiempo real están redefiniendo la toma de decisiones estratégicas. La aplicación de tecnologías 4.0 no solo mejora la eficiencia operativa, sino que también plantea nuevos desafíos en términos de seguridad y adaptabilidad (Jones et al., 2020).

La tecnología 4.0 ha revolucionado la aviación militar, permitiendo a las fuerzas armadas mejorar su capacidad operativa y alcanzar objetivos estratégicos. Algunas de las tecnologías 4.0 más relevantes en la aviación militar son:

1. **Sistemas de información:** Los sistemas de información son una herramienta clave para la gestión de la información en la aviación militar. Estos sistemas permiten la recopilación, almacenamiento, procesamiento y distribución de información en tiempo real, lo que mejora la toma de decisiones y la eficiencia operativa (TE Connectivity, 2018).
2. **Robótica:** La robótica es una tecnología 4.0 que ha mejorado la seguridad y la eficiencia en las operaciones de la aviación militar. Los robots realizan tareas peligrosas o repetitivas, lo que reduce el riesgo para el personal militar y aumenta la eficiencia operativa (Air Force Technology, 2021).
3. **Inteligencia artificial:** La inteligencia artificial es una tecnología 4.0 que ha permitido a la aviación militar mejorar la precisión y la eficiencia en las operaciones. Los sistemas de inteligencia artificial pueden analizar grandes cantidades de datos en tiempo real, lo que mejora la toma de decisiones y la eficiencia operativa (Defense News, 2019).
4. **Impresión 3D:** La impresión 3D es una tecnología 4.0 que ha permitido a la aviación militar mejorar la eficiencia en la producción de piezas y componentes. La impresión 3D permite la producción de piezas y componentes de manera rápida y eficiente, lo que reduce los costos y el tiempo de producción (Defense News, 2019).

La transformación digital ha irrumpido en todos los sectores, y la aviación militar no es la excepción. La adopción de Tecnologías 4.0 ha redefinido las capacidades y operaciones en este ámbito, marcando una nueva era de eficiencia operativa y toma de decisiones estratégicas. Este ensayo explora algunas de las tecnologías 4.0 más relevantes en la aviación militar, destacando su impacto y potencial.

En primer lugar, la inteligencia artificial (IA) se ha convertido en un pilar esencial en la aviación militar. Los sistemas autónomos de aprendizaje automático analizan datos a gran escala y realizan tareas complejas, desde la planificación de misiones hasta la interpretación de información de inteligencia. La capacidad de la IA para adaptarse y mejorar con el tiempo brinda a las fuerzas aéreas una ventaja estratégica significativa (Johnson et al., 2022).

Otra tecnología clave es el Internet de las cosas (IoT). La interconexión de dispositivos permite la recopilación de datos en tiempo real, mejorando la monitorización y el mantenimiento de aeronaves. Los sensores integrados en motores, sistemas de comunicación y componentes críticos facilitan la detección temprana de posibles

fallas, reduciendo los tiempos de inactividad y optimizando la disponibilidad de la flota (Smith & Williams, 2019).

El análisis de big data ha emergido como un facilitador crucial para la toma de decisiones informadas. La cantidad masiva de datos generados por sensores, satélites y sistemas de comunicación se puede analizar para identificar patrones, prever necesidades de mantenimiento y evaluar el rendimiento de las operaciones. Esto proporciona una base sólida para la planificación estratégica y táctica (Martínez & Rodríguez, 2021).

En el ámbito de la ciberseguridad, la tecnología 4.0 ha introducido medidas avanzadas para proteger las operaciones aéreas. Los sistemas de defensa cibernética detectan y neutralizan amenazas en tiempo real, salvaguardando la integridad de las comunicaciones y garantizando la seguridad de los sistemas de mando y control (Chen et al., 2020).

El uso de tecnologías 4.0 en la aviación militar no solo se limita a plataformas aéreas, sino que también abarca la gestión logística y la cadena de suministro. Los sistemas de gestión avanzados, respaldados por blockchain, facilitan el seguimiento de repuestos, combustible y equipo, mejorando la eficiencia y reduciendo costos operativos (González, 2018).

La integración de tecnologías 4.0 en la aviación militar ha generado una revolución en la eficiencia operativa. Desde la inteligencia artificial hasta la ciberseguridad, estas innovaciones han posicionado a las fuerzas aéreas en la vanguardia de la tecnología. La continua evolución en este ámbito promete un futuro donde las operaciones militares aéreas sean más efectivas, adaptativas y seguras.

2.3 Impacto Potencial en la Eficiencia Operativa

La adopción de tecnologías 4.0 tiene un impacto significativo en la eficiencia operativa de la gestión aérea militar. La capacidad de anticipar y responder a situaciones en tiempo real, gracias a la analítica avanzada, optimiza la planificación de misiones y la asignación de recursos. Además, la automatización de tareas rutinarias libera recursos humanos para tareas estratégicas y decisiones de alto nivel. Sin embargo, el aumento de la dependencia de la tecnología también plantea desafíos en términos de ciberseguridad y la necesidad de mantener la capacitación actualizada para los operadores (Brown & Miller, 2019).

La eficiencia operativa en la aviación militar ha sido un objetivo constante, y la adopción de tecnologías innovadoras está generando un impacto significativo en este aspecto. Este estudio se enfoca en evaluar el impacto potencial de la eficiencia operativa de la aviación militar, centrándose en las prácticas y avances tecnológicos de México y Colombia.

- **Optimización de Operaciones de Mantenimiento**

La implementación de tecnologías avanzadas de monitoreo y diagnóstico en la aviación militar de México ha optimizado sustancialmente las operaciones de mantenimiento. Los sensores integrados en aeronaves recopilan datos en tiempo real sobre el rendimiento de los sistemas y componentes, lo que facilita la detección temprana de posibles fallas. Esto ha reducido los tiempos de inactividad y aumentado la disponibilidad operativa de la flota (Secretaría de la Defensa Nacional, 2021). En Colombia, la Fuerza Aérea ha obtenido

resultados similares al incorporar sistemas de mantenimiento predictivo basados en el análisis de big data, mejorando la eficiencia en la gestión de activos aéreos (Ministerio de Defensa Nacional de Colombia, 2019).

- **Optimización de la Cadena de Suministro**

La eficiencia operativa en la aviación militar también ha mejorado gracias a avances en la gestión logística y la cadena de suministro. México ha adoptado sistemas de gestión avanzados respaldados por tecnologías 4.0, como blockchain, para el seguimiento de repuestos y equipos. Esto ha permitido una distribución más eficiente de recursos y una reducción de costos operativos (González, 2018). En Colombia, la implementación de sistemas similares ha fortalecido la capacidad de la Fuerza Aérea para mantener una cadena de suministro ágil y adaptativa (Ministerio de Defensa Nacional de Colombia, 2019).

- **Toma de Decisiones Estratégicas Informadas**

La analítica avanzada y el análisis de big data han revolucionado la toma de decisiones estratégicas en ambas fuerzas aéreas. La capacidad de procesar grandes volúmenes de datos en tiempo real ha mejorado la comprensión del entorno operativo, permitiendo una planificación más precisa y respuestas rápidas a situaciones cambiantes (Martínez & Rodríguez, 2021). En México, la Secretaría de la Defensa Nacional implementó sistemas de análisis de datos para optimizar la planificación de misiones y la asignación de recursos (Secretaría de la Defensa Nacional, 2021).

- **Mejoras en la Seguridad Cibernética**

El incremento en la dependencia de sistemas digitales ha resaltado la importancia de la seguridad cibernética en la aviación militar. La adopción de tecnologías 4.0 ha impulsado el desarrollo de medidas avanzadas para proteger las operaciones aéreas contra amenazas cibernéticas. La capacidad de detectar y neutralizar ataques en tiempo real ha fortalecido la integridad de los sistemas críticos (Chen et al., 2020).

3. MARCO TEÓRICO DE LA GESTIÓN TECNOLÓGICA

La gestión tecnológica se ha consolidado como un campo multidisciplinario que aborda la dirección estratégica y operativa de la tecnología en las organizaciones. Su esencia implica la planificación, implementación y control de recursos tecnológicos para mejorar la competitividad y el desempeño empresarial (Freeman & Soete, 1997). Este marco teórico aborda los aspectos clave de la gestión tecnológica, destacando sus componentes fundamentales y su importancia en el contexto actual.

Concepto de Gestión Tecnológica

La gestión tecnológica comprende un conjunto de procesos destinados a la creación, desarrollo, adquisición, difusión y aplicación de tecnologías en las organizaciones (Dodgson, Gann, & Salter, 2008). Este enfoque integral reconoce que la tecnología no solo consiste en productos tangibles, sino también en conocimientos, procesos y habilidades que impulsan la innovación y el progreso organizacional.

Componentes de la Gestión Tecnológica

- **Estrategia Tecnológica:** Define la dirección a seguir en términos de tecnología, alineando los objetivos organizacionales con las oportunidades y desafíos del entorno tecnológico (Tidd & Bessant, 2018). Esta estrategia guía la toma de decisiones relacionadas con la inversión en I+D, la colaboración con socios tecnológicos y la protección de la propiedad intelectual.
- **Adquisición y Desarrollo Tecnológico:** Implica la identificación, evaluación y selección de tecnologías relevantes para la organización, así como el desarrollo interno o la adquisición externa de capacidades tecnológicas (Rothwell, 1994). Este proceso incluye gestionar la innovación abierta, las alianzas estratégicas y el ciclo de vida tecnológico.
- **Gestión del Conocimiento Tecnológico:** Comprende la captura, almacenamiento, transferencia y aplicación efectiva del conocimiento tecnológico dentro de la organización (Nonaka & Takeuchi, 1995). Esto abarca la creación de una cultura de aprendizaje organizacional, el fomento de comunidades de práctica y el uso de herramientas de gestión del conocimiento.
- **Gestión de Proyectos y Procesos Tecnológicos:** Se refiere a la planificación, ejecución y control de proyectos de I+D, así como a la optimización de los procesos de innovación y desarrollo tecnológico (Patanakul & Milosevic, 2015). Esto implica aplicar metodologías como el enfoque de etapas y gestionar los riesgos tecnológicos.

Importancia de la Gestión Tecnológica

La Gestión Tecnológica es crucial para la competitividad y sostenibilidad de las organizaciones en un entorno caracterizado por la rápida evolución tecnológica y la globalización (Utterback, 1994). Permite a las empresas anticiparse a los cambios del mercado, aprovechar nuevas oportunidades y mantenerse a la vanguardia de su industria.

4. EXPERIENCIAS INTERNACIONALES EN LA IMPLEMENTACIÓN DE TECNOLOGÍAS 4.0 EN LA GESTIÓN AÉREA MILITAR

En el campo del desarrollo tecnológico, uno de los mayores impulsores ha sido el sector militar. Desde los inicios de las grandes civilizaciones, los conflictos bélicos y el deseo de superar al adversario mediante tecnologías más avanzadas han sido constantes. Desde el uso de metales, la aplicación de la pólvora, el diseño de barcos y aviones más sofisticados, la creación de las primeras computadoras, el internet y la energía nuclear, cada uno de estos avances comenzó con fines militares y, con el tiempo, se derivó hacia usos civiles. Aunque no siempre los avances tecnológicos provienen del sector militar, su contribución a lo largo de la historia es innegable.

El periodo de la llamada Guerra Fría impulsó numerosos descubrimientos y avances tecnológicos, ya que las dos superpotencias de esa época (Estados Unidos y la Unión Soviética) competían por demostrar su superioridad sin recurrir a un conflicto armado directo.

En la actualidad, el desarrollo tecnológico ha permitido abaratar la producción de tecnología, lo que ha facilitado el acceso a los avances más recientes para un mayor número de países, promoviendo la innovación y la adaptación tecnológica, y democratizando el acceso, hasta cierto punto. Sin embargo, países como Estados Unidos e Inglaterra siguen siendo líderes en el desarrollo de tecnología y armamento. Nuevos competidores, como China, han desplazado a la extinta Unión Soviética como el mayor rival de Estados Unidos en términos de desarrollo económico y tecnológico, mientras que India ha logrado avances significativos en tecnologías intangibles.

En la siguiente subsección, se discutirán algunos de los avances más notables relacionados con la industria militar. Cabe aclarar que muchos de los avances desarrollados por el sector militar suelen estar clasificados.

● Estudio de Casos de Países Referentes

La industria 4.0, al ser un conjunto de tecnologías que pueden implementarse de manera individual, presenta distintos niveles de accesibilidad y un rango de aplicación más amplio. A continuación, se presentan ejemplos específicos de su implementación en países con un desarrollo militar considerable.

Figura 2. *La industria 4.0 en aplicaciones militares*



Fuente: Elaboración propia.

Otras realidades

Es común que la referencia cuando se menciona la realidad virtual o la realidad aumentada (que se usan como sinónimos, aunque no lo son) sea principalmente su uso en videojuegos o en entretenimiento en general. Sin embargo, la industria militar fue pionera en adoptar estas tecnologías (Steven, Hauw, Keane, & Gunawan, 2023) para diversas aplicaciones, principalmente en el área de atención médica. A medida que la tecnología avanzó, se comenzó a utilizar en la simulación para entrenamiento, como una evolución de los simuladores de vuelo, por ejemplo.

En este punto, vale la pena hacer un breve paréntesis para diferenciar entre los diferentes sistemas. Los simuladores utilizan pantallas (pueden ser pequeñas o grandes) y pueden o no incluir elementos motrices, como controles, asientos, etc. La realidad virtual, por su parte, utiliza visores y/u otros elementos que bloquean los sentidos de los estímulos externos, creando, hasta cierto punto, una realidad alterna. La realidad aumentada permite percibir el mundo exterior con la inclusión de elementos virtuales, generalmente mediante el uso de un dispositivo con cámara. Finalmente, la realidad mixta combina tanto el mundo virtual como el real (Kaplan et al., 2021).

Las aplicaciones de estas tecnologías en el ámbito militar son clave para lanzar entrenamientos a gran escala, a un costo mucho más reducido, con el beneficio adicional de minimizar los riesgos de lesiones para el personal. Entre los beneficios analizados, se destaca la posibilidad de agregar niveles de estrés que, de otra manera, no podrían lograrse sin arriesgar a terceros. Esto ha llevado a una mejora en la resiliencia mental (McGregor, Bonnis, Stanfield, & Stanfield, 2017).

Aunque ha habido detractores sobre la efectividad de este tipo de entrenamientos en comparación con un entrenamiento tradicional, la evidencia apunta a que son igual de efectivos o incluso más que un entrenamiento en condiciones reales (Kaplan et al., 2021). Problemas como la falta de estímulo táctil también se están abordando con el fin de ofrecer retroalimentación física a los usuarios que permita activar la memoria muscular (Wei, Zhou, & Nahavandi, 2019).

Todos estos procesos de entrenamiento tienen un punto en común: la recopilación de datos, lo que nos lleva al siguiente punto.

Datos, datos y más datos

El término Big Data, como su nombre en inglés indica, se refiere al trabajo con todos los datos que se generan y recopilan constantemente (Lu, 2017). Cada acción que realizamos genera datos, los cuales, si se recopilan, almacenan e interpretan adecuadamente, pueden ser de gran ayuda para procesos posteriores. En el caso específico de los entrenamientos militares, la recopilación de datos sobre cómo se comporta el sujeto durante los entrenamientos puede llevar a mejoras en las tácticas de combate. Un centro de investigación en Canadá desarrolló un sistema para capturar y analizar estos datos de combate en tiempo real (McGregor et al., 2017), y en Taiwán, otro equipo realizó un trabajo similar en épocas cercanas (Fan & Wen, 2019). Es decir, la inquietud de cómo capturar y analizar esos datos lo antes posible está presente en diversas partes del mundo debido a su utilidad percibida. El trabajo con los datos recopilados puede llevar a algo más que mejoras en estrategias

o entrenamientos; uno de los objetivos principales es proporcionar las instrucciones necesarias para que una máquina pueda manejarse de forma independiente o casi independiente.

Más robots, menos fallas

El término dron está íntimamente asociado con la automatización, como si se tratara de un robot completamente autónomo que decidiera por sí mismo qué hacer, dónde atacar y qué objetivos seguir. La realidad es que aún no se ha logrado ese grado de automatización, y está en debate si se quiere dar ese nivel de autonomía en equipos de guerra. Aún así, es un hecho que los robots y drones son necesarios en muchas situaciones en las que el espacio, las condiciones o la naturaleza de la misión no permiten que los soldados actúen en el campo.

Una de las aproximaciones que se han trabajado en este tema es el uso de la realidad virtual para el manejo de robots, lo que otorga un mayor grado de control sobre los controles tradicionales (Kot & Novák, 2018). Esto, además de mejorar el control de la unidad, permite abaratar costos y reducir espacios, lo cual podría llevar esta tecnología a países con menor presupuesto de defensa.

En el tema de los drones, retomamos la recopilación de datos, y en esta área se ha dado importancia al factor humano: es decir, a quien maneja el dron a distancia (Jackman, 2023). Obtener suficientes datos sobre su estado mental, qué tanto efecto tiene el dirigir el dron y ser testigo de los efectos posteriores puede llevar a un mejor desempeño del personal en un futuro cercano.

La base del manejo tanto de robots como de drones, así como los datos generados, está relacionada con el siguiente foco de interés: la computación en la nube.

La llamada computación en la nube, o *cloud computing*, es esencial para que todo lo anterior funcione, ya que se requiere una gran cantidad de datos almacenados y accesibles en cualquier momento. La idea de la computación en la nube es precisamente esto: desde una ubicación central, permitir el almacenamiento, distribución y acceso a los datos (Nagajyothi & Malathi, 2016). El problema radica en la seguridad, y cuando se trata de temas militares, esto se vuelve aún más preocupante. Por eso, algunos gobiernos han adoptado una postura más controladora en cuanto al desarrollo de software, determinando qué programas tienen acceso a ciertos datos y qué pueden o no hacer (Codur & Dogru, 2012).

Lecciones Aprendidas y Mejores Prácticas

Al revisar la aplicación de tecnologías en el ámbito militar, queda claro que no es necesario implementar todas para lograr un desarrollo relevante. Tecnologías como la realidad virtual, por ejemplo, resultan más sencillas de aplicar y con una implementación práctica a menor plazo. Otras tecnologías, como los robots autónomos, resultan altamente costosas, ya que implican la compra de todo el equipo y su mantenimiento, generalmente a compañías extranjeras.

Un tema que surge constantemente es el uso de tecnología en el área de atención médica para los cuerpos militares, específicamente en lo que respecta a la salud mental. Aunque el objetivo de la industria 4.0 es la eventual autonomía de los equipos, aún estamos lejos de esa meta, y por más avanzada que sea una tecnología, sigue teniendo detrás un ser humano, quien podría ser el eslabón débil en términos de seguridad o riesgos.

Algo que también destaca es cómo distintos países tienden a realizar la misma investigación en periodos similares. Esto parece una falta de cooperación, un proceso que podría mejorarse mediante grupos de investigación transdisciplinarios a nivel internacional.

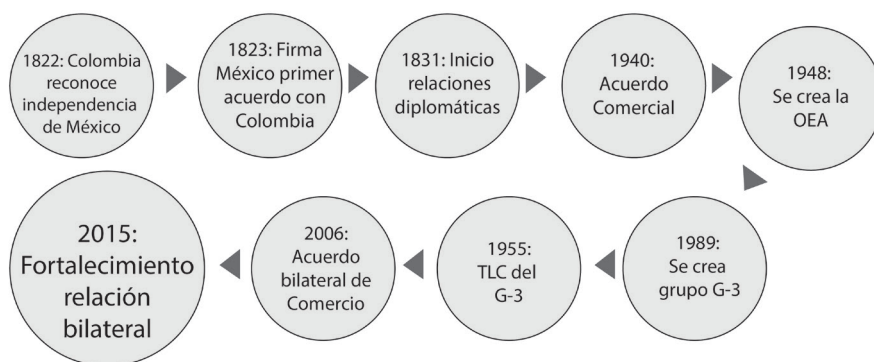
5. DESAFÍOS ESPECÍFICOS EN LA IMPLEMENTACIÓN EN MÉXICO Y COLOMBIA

Análisis del Contexto Político y Económico

La relación entre México y Colombia se remonta a la creación de ambos países, siendo Colombia el primer país en reconocer a México como nación independiente. La relación evolucionó desde lo político hasta lo económico, y actualmente ambos países son de los principales socios comerciales respectivamente (Morales, 2017). Aunque México mantiene un superávit con Colombia, también existe una mayor inversión por parte de empresas mexicanas en Colombia, lo que beneficia a ambos países.

A continuación, se presenta un gráfico con algunos de los momentos clave en la relación política y económica desde la fundación de ambos países.

Figura 3. Contexto político/económico México-Colombia



Fuente: Elaboración propia con información de Morales V. (2017).

G-3 se refiere a México, Colombia y Venezuela; sin embargo, en 2006, Venezuela salió del tratado de libre comercio, lo que convirtió el acuerdo en un acuerdo bilateral, destacando la fortaleza de la relación entre México y Colombia.

Barreras Culturales y Organizacionales

México y Colombia se encuentran en situaciones similares en cuanto al nivel de dependencia tecnológica. Aunque existen iniciativas en cada uno de estos países para integrar la industria 4.0 a nivel nacional (Villarreal, Garza, Montemayor, & Taboada, 2016; Hurtado, Ch, & Londo, 2020), existen problemas más profundos que pueden obstaculizar el avance.

Con los tratados de libre comercio, la apertura a los mercados internacionales permitió adquirir tecnología a un menor costo. Si bien esto fue de gran utilidad para el desarrollo, también redujo la urgencia de desarrollar tecnología propia, ya que normalmente resulta más barato adquirir tecnología ya desarrollada y probada. Sin embargo, a largo plazo, esta dependencia podría llevar a quedar atrás en ciertos avances.

Dado que el presente trabajo se centra en la industria militar, cabe mencionar una barrera adicional: la confianza del público en los respectivos ejércitos nacionales.

El ejército colombiano ha iniciado en los últimos años una transformación en cuanto a su misión y la percepción pública derivada de los acuerdos con las Fuerzas Armadas Revolucionarias de Colombia (FARC) (González & Betancourt Montoya, 2018). Por su parte, el ejército mexicano se encuentra en un periodo de incremento de funciones, al mismo tiempo que busca redimir su imagen ante escándalos pasados (Benítez Manaut et al., 2021).

Desafíos Logísticos y de Infraestructura

Cada país enfrenta retos distintos en términos de logística e infraestructura. Ambos países poseen una fuerte capacidad logística, ya que son centros de exportación e importación en sus respectivas regiones. México tendría una ligera ventaja debido a su cercanía con Estados Unidos. En cuanto a infraestructura, México tiene una base sólida, especialmente en la industria manufacturera, lo que a su vez puede ser una desventaja.

Un estudio de 2018, aún vigente, clasificó a los países en cuatro categorías: líderes, de alto potencial, nacientes y legado (Kearney, 2018). Colombia fue colocada en la categoría de “naciente” y México en la de “legado”. Un país legado es aquel que tiene una infraestructura robusta, pero, por esta razón, le resulta difícil adaptarse rápidamente al futuro, ya que modificar esta infraestructura es un proceso lento. En cambio, resulta más fácil comenzar con una base más ligera, como es el caso de los países en la categoría “naciente”.

6. ESTRATEGIAS PARA LA IMPLEMENTACIÓN EXITOSA DE TECNOLOGÍAS 4.0

Desarrollo de Capacidades Internas

En las secciones anteriores de este trabajo, se destacó un aspecto clave para lograr una implementación exitosa de la industria 4.0 en los respectivos países: la reducción

de la dependencia tecnológica. Esto no implica la necesidad de reinventar tecnologías ya existentes y accesibles, sino más bien de anticiparse al futuro y comprender hacia dónde se dirige la tecnología actual. El objetivo es adelantarse a estos cambios y, a partir de la tecnología disponible, fomentar desarrollos innovadores que promuevan gradualmente una mayor independencia tecnológica.

Para llevar a cabo esto, es fundamental seleccionar las tecnologías con las que se comenzarán los proyectos, así como impulsar los centros que pueden contribuir al éxito de los mismos. Los proyectos de realidad virtual, computación en la nube y Big Data suelen tener un costo menor y una mayor viabilidad, en comparación con la construcción de drones o robots autónomos. No se implica que no se deba aspirar a estos objetivos, pero alcanzar el nivel de los países líderes llevará mucho tiempo, en contraste con proyectos de menor inversión inicial que podrían ser viables en menos tiempo.

Alianzas Estratégicas con la Industria Tecnológica

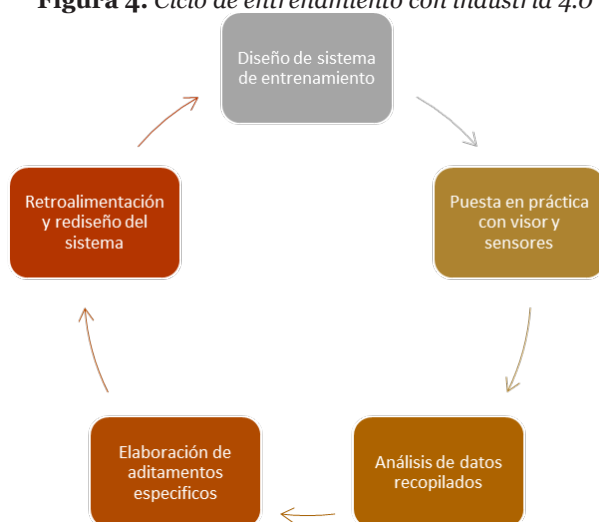
Retomando uno de los puntos mencionados anteriormente, la cooperación y colaboración entre diferentes actores será clave para reducir tiempos, abaratar costos y fomentar un ambiente de innovación. Se debe buscar un equilibrio entre los sectores público y privado, así como la cooperación internacional, ya que cada uno tiene un ritmo distinto. El sector público puede delegar tareas urgentes o aquellas donde el tiempo es un factor clave a la iniciativa privada. Por su parte, la iniciativa privada no cuenta con el alcance en recopilación de datos y otorgamiento de permisos que posee el sector público.

Integración de Tecnologías 4.0 en la Formación y Entrenamiento del Personal

Al compilar ideas sobre cómo otros países están utilizando la tecnología de la industria 4.0 para la formación y entrenamiento de personal, especialmente en países sin los niveles de inversión militar de las grandes potencias, surge la siguiente propuesta.

A través del uso de sensores, junto con manufactura aditiva, realidad virtual y captación de datos, se podría crear un sistema de entrenamiento capaz de recopilar datos en tiempo real sobre diversos aspectos. Por un lado, se registrarían los movimientos del individuo, así como su ritmo cardíaco, frecuencia respiratoria, niveles de estrés, entre otros, con el fin de retroalimentar el sistema de entrenamiento, identificando lo que funciona, lo que no, y los problemas que surgen. La manufactura aditiva serviría para crear piezas específicas para cada usuario que se integren con sensores y respuestas hápticas.

La idea sería que, con cada prueba del sistema de entrenamiento, la retroalimentación permitiera mejorar la versión siguiente. La manufactura aditiva facilitaría la modificación de las piezas para adaptarlas mejor al usuario, mientras que los escenarios de realidad virtual permitirían la adaptación en tiempo real, lo que ahorraría tiempo y esfuerzo en el diseño de nuevos escenarios.

Figura 4. Ciclo de entrenamiento con industria 4.0

Fuente: Elaboración propia.

7. IMPLICACIONES ÉTICAS Y DE SEGURIDAD EN LA GESTIÓN AÉREA MILITAR 4.0

Consideraciones Éticas en el Uso de Tecnologías Avanzadas

La integración de tecnologías avanzadas en la vida cotidiana ha generado una revolución sin precedentes en la forma en que interactuamos con el mundo y entre nosotros. Desde la inteligencia artificial que potencia nuestras decisiones hasta los avances en la ingeniería genética que prometen remodelar el curso de la vida humana, el potencial de estas tecnologías es vasto. Sin embargo, este potencial viene acompañado de una gama igualmente amplia de consideraciones éticas que desafían nuestras normas morales tradicionales y exigen un escrutinio riguroso. En este contexto, la ética juega un papel crucial en la cuarta revolución industrial, ya que debe guiar el desarrollo de estas tecnologías para asegurar que contribuyan al bienestar humano y la protección del medio ambiente, como lo plantean diversas plataformas del Foro Económico Mundial (Jia, 2020).

Las tecnologías existentes se encuentran en diversas etapas de desarrollo y adopción en la sociedad. Algunas ya han dado lugar a dispositivos concretos y aplicaciones que son utilizadas por una gran variedad de personas en diferentes contextos. Para estas tecnologías, el análisis ético tiene la ventaja de que muchos de los problemas éticos ya han sido identificados en la sociedad (Brey, 2012). Por ejemplo, los problemas éticos relacionados con Internet son identificados no solo por los académicos, sino también por los usuarios y otros interesados que se enfrentan a ellos mientras utilizan o deliberan sobre la tecnología. Por otro lado, existen tecnologías emergentes que aún están en una etapa temprana de desarrollo y que no han producido muchas aplicaciones ni consecuencias sociales. Estas tecnologías, todavía en gran medida en la fase de

investigación y desarrollo (I+D), están en una etapa en la que se investigan técnicas básicas o se han producido prototipos de laboratorio, sin haber generado productos utilizados de forma generalizada (Vargas-Elizondo, 2020). En este caso, los problemas éticos relacionados con su uso en la sociedad no pueden preverse de manera confiable, ya que su impacto en la sociedad aún está en un futuro incierto, lo que genera dudas sobre cómo abordarlos (Moor, 2005).

Para abordar los problemas éticos de la tecnología avanzada en el contexto de la industria 4.0, es necesario analizar dos perspectivas generales. La primera, conocida como “externalista”, pone énfasis en el impacto de la tecnología en la sociedad, cómo este mundo ha cambiado impulsado en gran parte por la tecnología, y cómo la materia, la energía y la información se transforman operativamente para obtener una variedad de productos tecnológicos. La segunda perspectiva, denominada “internalista”, se enfoca en el desarrollo tecnológico organizado en pasos y bucles, especificando los recursos humanos involucrados, las etapas en las que se desarrollará el producto, cómo se tomarán las decisiones y cómo se mantendrá la integridad del diseño a lo largo del proceso (Vargas-Elizondo, 2020).

Moll (2022) identifica tres dominios dentro de la industria 4.0: lo físico, lo digital y lo biológico. Lo físico abarca las tendencias en vehículos autónomos, nanotecnología, nuevos materiales, robots avanzados e impresión 3D. Lo digital incluye avances en comunicaciones satelitales, tecnología 5G, computación cuántica, Inteligencia Artificial y tecnologías relacionadas como el Internet de las Cosas, Blockchain y nuevas modalidades de comercio electrónico. En el ámbito biológico se incluyen la secuenciación genética, la edición genética, las células madre y la genética sintética. Un aspecto distintivo de esta cuarta revolución industrial es la integración de estos sistemas, lo que genera un proceso de desarrollo tecnológico más rico, diverso e intenso. No se trata solo de máquinas y sistemas inteligentes y conectados, sino también de avances en campos como la nanotecnología, las energías renovables y la computación cuántica. La fusión de estos avances en los dominios físico, digital y biológico es lo que hace que la cuarta revolución industrial sea fundamentalmente diferente de las anteriores (Philbeck & Davis, 2018).

La interacción de estos dominios en la Industria 4.0 plantea situaciones en las que las decisiones y acciones pueden tener efectos que van más allá de las fronteras tradicionales (Postelnicu & Câlea, 2019). Con sistemas cada vez más complejos, es esencial que haya transparencia en la Inteligencia Artificial y los procesos automatizados para que los usuarios y reguladores puedan comprender y confiar en ellos. También es crucial garantizar que los beneficios de la Industria 4.0 se distribuyan de manera justa, lo que incluye el acceso a la tecnología, la capacitación y el desarrollo de habilidades en todos los sectores de la sociedad (Xu et al., 2018).

La ética de las tecnologías avanzadas enfrenta un problema epistemológico, relacionado con la incertidumbre acerca de los futuros dispositivos, aplicaciones, usos y consecuencias sociales. La pregunta central es cómo abordar este problema de manera responsable. Por un lado, es necesario evitar que los académicos se pierdan en especulaciones infundadas sobre los problemas éticos futuros que, en muchos casos, se basan en proyecciones erróneas sobre cómo evolucionará la tecnología. Por otro lado, también es importante que los académicos no sientan que no pueden hacer evaluaciones sobre las tecnologías avanzadas debido a la incertidumbre sobre los dispositivos y usos que se derivarán de ellas (Sollié, 2007). En este contexto, la pregunta es: ¿cómo se

pueden hacer evaluaciones confiables sobre las tecnologías emergentes, basadas en un conocimiento razonablemente fiable del futuro?

Para responder a esta pregunta, se puede retomar el trabajo de Ladrière (1977) en su libro *The Challenge Presented to Cultures by Science and Technology*, que fue uno de los primeros en discutir el impacto de la ciencia y la tecnología en la ética y la cultura. Ladrière identifica cuatro formas en las que la ciencia y la tecnología han tenido un impacto positivo en la ética: a) ampliando el alcance de la ética, b) creando nuevos problemas éticos, c) sugiriendo nuevos valores éticos, y d) proponiendo nuevas formas de determinar normas.

- **Ampliando el alcance de la ética:**

Un ejemplo para analizar este punto es el *Internet de las Cosas* (IoT, por sus siglas en inglés). El IoT amplía el alcance de la ética en varios aspectos fundamentales, creando nuevos desafíos y preguntas que trascienden las consideraciones éticas tradicionales. Al conectar objetos cotidianos a Internet y permitirles recopilar, enviar y recibir datos, el IoT introduce complejidades en áreas como la privacidad, la seguridad, la autonomía y la responsabilidad (Allhoff & Henschke, 2018). Con dispositivos IoT recopilando una gran cantidad de datos personales, surge la preocupación sobre quién tiene acceso a estos datos y cómo se utilizan. La ética debe abordar las cuestiones de consentimiento informado y control del usuario sobre sus propios datos.

- **Creando nuevos problemas éticos:**

Para Ladrière, la ciencia y la tecnología buscan objetivos fundamentales diferentes a los de la cultura y la ética. Mientras que la ciencia y la tecnología se orientan a lograr la universalidad, precisión, racionalidad, estandarización, conocimiento probado e intervención, las culturas tienden a proporcionar un significado a la vida y tienden a ser particulares. Es el espacio para construir la identidad personal, el sentido de pertenencia y una tendencia al conservadurismo o a lo inmutable. La ciencia y la tecnología han invadido la sociedad en todos sus aspectos, incluyendo las culturas. Los nuevos problemas éticos que plantean la ciencia y la tecnología emergen de estos objetivos contrastantes. Según Ladrière, surgen dos categorías diferentes de problemas éticos: internos y externos. Ambos emergen debido a la posición especial de los científicos y tecnólogos. Los problemas internos conciernen a la naturaleza, estructura y función de la ciencia y la tecnología, y su promoción como una actividad socialmente relevante; mientras que los problemas externos se relacionan con la responsabilidad social y ética de los científicos y tecnólogos por los impactos de sus desarrollos. Los científicos y tecnólogos están entre los dos sistemas y deben mediar entre ellos, garantizando que los objetivos de la sociedad y los de la investigación científica y tecnológica sean lo más compatibles posible.

- **Surgiendo nuevos valores éticos:**

La introducción de nuevos resultados científicos y tecnológicos induce un proceso creativo que propone nuevos valores éticos o refuerza los valores actuales para lidiar con las nuevas condiciones. Por ejemplo, la inteligencia artificial (IA) ha propiciado la aparición de nuevos valores éticos, desafiando y ampliando nuestra comprensión tradicional de lo que es ético en un mundo

cada vez más influenciado por decisiones y procesos automatizados. Con sistemas de IA que a menudo funcionan como “cajas negras”, se ha vuelto esencial que estos sistemas sean transparentes en sus procesos de toma de decisiones y que puedan explicar cómo y por qué se toman ciertas decisiones. De igual manera, la preocupación por el sesgo y la discriminación en los algoritmos de IA ha resaltado la importancia de desarrollar y entrenar sistemas de IA de manera que sean justos y equitativos, evitando perpetuar o ampliar las desigualdades sociales existentes (Etzioni & Etzioni, 2017).

- **Nuevas maneras de determinar normas:**

La ciencia y la tecnología están creando un nuevo orden sobre la naturaleza que otorga a los profesionales cada vez más independencia para tomar decisiones, no basadas en tradiciones o en la “naturaleza”, sino en lo que es deseable, razonable y basado en principios. De esta manera, la ciencia y la tecnología son una fuente importante de creatividad y racionalidad ética. La creación de nuevas normas apropiadas al contexto hace que la ética sea más rica y compleja y esté regida por criterios racionales. El papel que la sociedad asigna a la ciencia y la tecnología convierte a esta actividad en el medio para ganar autonomía y fortalecer la responsabilidad humana. Proporciona más conocimiento y herramientas para la intervención; los profesionales tienen cada vez más libertad para decidir cómo actuar, al mismo tiempo que más responsabilidad por sus decisiones (Amin, 2023). Por ejemplo, el *cloud computing* o computación en la nube ha redefinido varias normas en el mundo de la tecnología y los negocios, llevando a la creación de nuevas pautas y estándares. Estos cambios se observan en diversas áreas, desde la seguridad de la información hasta la gestión de infraestructuras y la ética en el uso de datos. Dado que la computación en la nube implica almacenar datos en servidores remotos, se han tenido que establecer normas rigurosas de seguridad para proteger la información contra accesos no autorizados, brechas de datos y otros riesgos de seguridad cibernética. Esto incluye el desarrollo de protocolos de cifrado avanzados, políticas de autenticación robustas y medidas de cumplimiento como el GDPR en Europa (Ali & Osmanaj, 2020).

El enfoque de Ladrière proporciona un marco importante para analizar el papel ético de los científicos, ingenieros y técnicos respecto a cómo desarrollan la ciencia y la tecnología, así como en relación con el impacto de los logros científicos y tecnológicos en la cultura y la sociedad. Este marco también se aplica a las tecnologías aeronáuticas, como se explica a continuación.

La ética en las tecnologías aeronáuticas abarca una serie de consideraciones morales y normativas cruciales en el diseño, desarrollo, operación y gestión de tecnologías relacionadas con la aeronáutica y la aviación. A medida que la industria aeronáutica sigue avanzando, se presentan desafíos éticos únicos que requieren una atención cuidadosa (Mendes, 2016). Según Tomás Peña (2023), algunas de las principales consideraciones éticas en este campo incluyen:

- **Seguridad y fiabilidad:** La seguridad es primordial en la aeronáutica. Los fabricantes y operadores deben garantizar que los aviones y los sistemas relacionados sean extremadamente seguros y fiables. Esto implica un compromiso ético con el mantenimiento riguroso, las pruebas exhaustivas y la mejora continua de la seguridad.

- **Privacidad y vigilancia:** Las tecnologías aeronáuticas, especialmente los drones, plantean preguntas éticas sobre la privacidad y la vigilancia. El uso de drones para monitoreo y recopilación de datos debe equilibrarse con el derecho a la privacidad de los individuos.
- **Impacto ambiental:** La aviación contribuye significativamente a las emisiones de gases de efecto invernadero. Existe una responsabilidad ética para desarrollar y adoptar tecnologías más limpias y sostenibles, como los combustibles alternativos y las mejoras en la eficiencia del consumo de combustible.
- **Autonomía y piloto automático:** El desarrollo de aviones autónomos y sistemas de piloto automático avanzados plantea preguntas sobre la autonomía y la responsabilidad. ¿Quién es responsable en caso de un accidente? ¿Cómo se garantiza la seguridad cuando se reduce el papel del piloto humano?
- **Uso de drones en contextos militares y civiles:** Los drones tienen aplicaciones tanto en entornos militares como civiles. Su uso en operaciones militares, particularmente en ataques letales, plantea serias cuestiones éticas sobre la guerra, la toma de decisiones y las bajas civiles.
- **Equidad y accesibilidad:** La tecnología aeronáutica debe ser accesible y beneficiar a todas las secciones de la sociedad. Esto incluye considerar la asequibilidad del transporte aéreo y garantizar que los beneficios de las tecnologías aeronáuticas no estén limitados solo a los países o individuos más ricos.
- **Integridad y honestidad en la investigación y el desarrollo:** La ética en la investigación y el desarrollo en aeronáutica exige honestidad, integridad y transparencia, especialmente cuando se trata de pruebas y certificación de nuevas tecnologías.
- **Responsabilidad internacional y cooperación:** La aviación es una industria global que requiere cooperación internacional y cumplimiento de tratados y normativas internacionales para garantizar la seguridad y eficiencia del espacio aéreo global.
- **Inteligencia artificial y toma de decisiones:** A medida que la IA se integra más en los sistemas aeronáuticos, surgen preguntas sobre cómo se toman las decisiones y cómo se puede garantizar que estas decisiones sean éticas y seguras.
- **Ciberseguridad:** La protección de los sistemas aeronáuticos contra amenazas cibernéticas es una preocupación ética, ya que una brecha de seguridad podría tener consecuencias catastróficas.

Garantía de la ciberseguridad en sistemas críticos

La Industria 4.0, caracterizada por la convergencia de operaciones físicas con tecnologías digitales avanzadas, ha inaugurado una era de innovación y eficiencia sin precedentes. Sin embargo, con la creciente integración del Internet de las Cosas (IoT), la inteligencia artificial (IA), el big data y la computación en la nube, la ciberseguridad se ha convertido en una preocupación crítica. La infraestructura conectada de la

Industria 4.0 presenta un paisaje amplio y complejo para la ciberseguridad, que va más allá de la protección de la información confidencial, abarcando la integridad operativa y la continuidad de los sistemas industriales críticos (Waidner & Kasper, 2016).

La ciberseguridad en la Industria 4.0 no es solo una cuestión técnica; es un imperativo estratégico que afecta a todos los niveles de una organización. Los desafíos únicos de seguridad en este entorno interconectado exigen soluciones innovadoras y multidimensionales. Estas soluciones deben ser capaces de anticiparse a amenazas altamente sofisticadas y en constante evolución, que van desde el espionaje industrial hasta el sabotaje o incluso el terrorismo cibernético (Flatt et al., 2016).

A medida que las empresas adoptan tecnologías de la Industria 4.0, también deben implementar prácticas robustas de ciberseguridad. Esto incluye desarrollar una cultura de seguridad que permea todas las áreas de operación, desde la sala de juntas hasta el piso de fábrica. La ciberseguridad debe considerarse desde las etapas iniciales de diseño del sistema y a lo largo de todo el ciclo de vida del producto o servicio (Benias & Markopoulos, 2017). Por lo tanto, la ciberseguridad en la Industria 4.0 no solo es fundamental para proteger los activos y la información, sino que es esencial para mantener la confianza de los clientes, la reputación de la marca y, en última instancia, el éxito empresarial en el mercado global hiperconectado de hoy (Dawson, 2018).

La Industria 4.0 integra tres o más factores mutuamente interconectados, que incluyen la digitalización e integración de redes técnico-económicas simples transformándolas en complejas, la digitalización de productos y servicios, y la implementación e integración de nuevos modelos de mercado. Estos tres factores comprenden diferentes tecnologías y conceptos que se generalizan como componentes de la Industria 4.0 (Gubán & Kovács, 2017). Según Zetzka et al. (2016), los componentes de la Industria 4.0 se basan en el Modelo de Arquitectura de Referencia Industria 4.0 (RAMI 4.0). En general, los elementos identificados en el modelo RAMI 4.0 pueden categorizarse en big data, Smart Factory, Sistemas de Producción Ciberfísicos (CPPSs) y tecnologías y conceptos del Internet de las Cosas (IoT).

Los errores y fallos que involucran a personas, infraestructura, equipos y máquinas dentro de los CPPS tienen implicaciones para la seguridad operacional. Según Waidner y Kasper (2016), identifican una “amplia superficie de ataque de los CPPS” como la amenaza principal amalgamada para la Industria 4.0. Las principales fuentes de amenazas incluyen la electrónica, los sistemas operativos y otros software de terceros, las redes, las máquinas y las personas. Las vulnerabilidades asociadas con las amenazas incluyen ataques físicos y ciberataques que comprenden ataques de intermediario (man-in-the-middle), ataques de hombre en el navegador (man-in-the-browser), así como ataques de ingeniería social y de phishing.

En la computación en la nube, especialmente en el contexto de big data, se está volviendo cada vez más difícil asegurar la transmisión de datos entre activos físicos y virtuales, y la autenticación es incluso un desafío cuando se disemina información a través de múltiples dispositivos vulnerables interconectados (Alouffi et al., 2021). Algunas de las amenazas para la disponibilidad, confidencialidad, integridad y autenticación de los big data incluyen una amplia superficie de ataque, la disponibilidad de datos globales en el contexto local, la manipulación del comportamiento del usuario y la complejidad y mala configuración. Las amenazas que supone tener un mayor alcance están asociadas con el punto único de fallo, y la mayoría de los informes citan la denegación de servicio

(DoS) como el principal modo de ataque. Además, la exposición en la capa que maneja los sensores ha llevado a fugas de información que afectan los procesos empresariales en los entornos de computación en la nube (Riaz et al., 2020).

Finalmente, en la mayoría de los casos, la complejidad y configuración incorrecta dentro de los CPPS, así como otros componentes de la Industria 4.0, fomentan ataques de mayor alcance, que la mayoría se atribuyen a la escalación de privilegios. Más importante aún, todos los componentes de la Industria 4.0 tienen diferentes superficies de ataque, aunque los CPPS y el IoT han demostrado tener muchas más vulnerabilidades en comparación con el resto de los componentes (Bajic et al., 2020).

La Industria 4.0, al igual que otros grupos de sistemas integrados, enfrenta amenazas internas y externas, especialmente debido a la complejidad de las técnicas avanzadas de evasión de protección disponibles en la cibernética (Tseng et al., 2021). Además, el número de superficies de ataque aumenta con la adopción de nuevas tecnologías de la Industria 4.0, lo que incrementa también los puntos vulnerables. Estos dependen del número de sistemas extendidos y de las superficies de ataque únicas que cada uno genera. Por ejemplo, al implementar IoT y otros componentes en una Fábrica Inteligente, el número de puntos vulnerables se multiplica. Sin embargo, interconectar estos componentes hace que el proceso de identificación de vulnerabilidades sea aún más complejo, complicando la detección y prevención de ataques (Tawalbeh et al., 2020).

En el contexto de la Industria 4.0, garantizar la seguridad en los sistemas críticos aeronáuticos adquiere una nueva dimensión con la integración de tecnologías avanzadas como IoT, IA, big data y la computación en la nube. Aunque estas tecnologías ofrecen grandes oportunidades para mejorar la eficiencia y capacidad operativa, también presentan retos únicos en términos de seguridad (Ukwandu et al., 2022).

Dada la importancia de las ciber-tecnologías para la integridad operacional de la aviación, el sector ha confiado en la Asociación Internacional de Transporte Aéreo (IATA) para proporcionar orientación y actualizar las regulaciones, estándares y principios de ciberseguridad en el ecosistema que abarca desde la aviónica hasta los controles de tráfico aéreo, aerolíneas y aeropuertos (Lykou et al., 2018). Es claro que el uso de nuevas tecnologías ha tenido impactos positivos en los sistemas de control de aeronaves, mejorando la calidad de las operaciones, la seguridad y el rendimiento. Sin embargo, también ha generado impactos negativos relacionados con la ciberseguridad, debido al aumento de vulnerabilidades y brechas que pueden derivar en violaciones con consecuencias fatales y pérdida de continuidad operativa (Haass et al., 2016).

Corretjer (2018) analizó las prácticas actuales de ciberseguridad en la industria aeronáutica de los Estados Unidos (civil y militar), registrando las estrategias del gobierno y de entidades privadas para proteger la industria contra los ciberataques. Aunque se elogió el esfuerzo de la Autoridad Federal de Aeropuertos (FAA) y del sector privado para gestionar los ciberataques, se recomendó intensificar la implementación de medidas proactivas en todas las etapas del diseño, adquisición, operación y mantenimiento de los sistemas de navegación aérea.

Las amenazas cibernéticas más comunes provienen de los grupos de Amenaza Persistente Avanzada (APT), que colaboran con actores estatales para obtener propiedad intelectual e inteligencia con el fin de avanzar en sus capacidades aeroespaciales, así como para infiltrarse y subvertir las capacidades de otras naciones. Los APTs son

ejecutados por grupos de ciberespionaje especializados en obtener información y activos de seguridad que son de vital importancia económica para naciones y grandes corporaciones (Kagalwalla & Churi, 2019).

Estos grupos son altamente capacitados y tienen una gran experiencia en realizar ataques maliciosos con una alta destreza en ocultar sus trayectorias de ataque. Estas características los hacen difíciles de rastrear y capaces de causar daños significativos. Se ha documentado que algunos grupos asociados con actores estatales utilizan los activos robados para desarrollar contramedidas de ciberseguridad y vender tecnologías y herramientas en la web oscura (Lykou et al., 2019). Según Potts (2022), en los últimos años se identificaron al menos 24 incidentes de APT que comprometieron diversas organizaciones aeroespaciales, con tipos de datos robados que incluyen información presupuestaria, comunicaciones empresariales, registros de mantenimiento de equipos, especificaciones, organigramas, directorios, datos personales, diseños de productos, planos, procesos de producción, información propietaria, informes de investigación, procedimientos de seguridad y archivos de registro del sistema. Este espectro de información robada podría causar consecuencias perjudiciales.

Ukwandu et al. (2022) realizaron un mapeo de los ciberataques dentro de la aviación civil, revelando que predominan los ataques de phishing y a redes, como la interceptación, DoS, Man-in-the-middle y suplantación. Los ataques DDoS y DoS dirigidos a los activos de red de los aeropuertos, particularmente los DDoS de Agotamiento de Ancho de Banda por Vulnerabilidad (VBDDA), podrían mitigarse mediante la Inspección de Paquetes con Estado (SPI) basada en la Infraestructura Centrada en Aplicaciones OpenFlow (OACI).

Este enfoque busca mitigar ataques a los Sistemas de Gestión de Recursos de Información del Aeropuerto (AIRMS), un sistema de gestión basado en la nube utilizado en algunos aeropuertos (Potts, 2022). Roush (2022) sugiere utilizar la clasificación de inteligencia de aeropuertos para proteger los activos e infraestructuras del aeropuerto contra ciberataques, con un enfoque basado en buenas prácticas técnicas para resolver problemas de seguridad de alto nivel. En la práctica, esto implica una cultura de buena ciberhigiene, que incluye actualizaciones regulares de sistemas y antivirus, educación cibernética para nuevos empleados, respaldo periódico de datos y gestión de contraseñas.

8. PERSPECTIVAS FUTURAS Y TENDENCIAS

La industria aeronáutica, un sector en constante evolución y expansión, se enfrenta a un futuro emocionante y desafiante. A medida que avanzamos hacia una nueva era, caracterizada por la innovación tecnológica y los cambios en las demandas y expectativas del consumidor, la industria se encuentra en un punto de inflexión crucial. Las perspectivas futuras y las tendencias en este campo no solo reflejan los avances tecnológicos, sino también un cambio profundo en la forma en que entendemos y experimentamos la aeronáutica.

En el corazón de esta transformación se encuentran las tendencias emergentes en digitalización, sostenibilidad y personalización de la experiencia de vuelo. La adopción de tecnologías de la Industria 4.0, como la inteligencia artificial, el Internet de las Cosas y la robótica avanzada, está redefiniendo el diseño y la fabricación de

aeronaves, mejorando la eficiencia operativa y abriendo nuevas posibilidades en la gestión del tráfico aéreo y la seguridad. Paralelamente, el impulso hacia una aviación más sostenible está ganando terreno, con un enfoque en la reducción de emisiones de carbono a través del desarrollo de combustibles alternativos y diseños de aviones más eficientes (Karnik et al., 2022).

Innovaciones Emergentes en Tecnologías Aeronáuticas

La industria aeronáutica genera volúmenes bajos dirigidos a una clientela restringida y específica (aerolíneas, compradores de aeronaves privadas, gobiernos...). Los aviones comerciales, que sin duda representan la mayor parte de la producción del sector, se venden solo por unos pocos cientos cada año. En la raíz de la débil automatización en este sector se encuentran los bajos volúmenes de producción y la fabricación compleja, lo que resulta en una necesidad de mano de obra significativa a lo largo del ciclo de producción (Zutin et al., 2022). No obstante, al igual que otras industrias, la aeronáutica ha experimentado una serie de cambios con la Industria 4.0, incluyendo el desarrollo de plataformas colaborativas compartidas por las diferentes partes involucradas a lo largo de la cadena de suministro (Guyon et al., 2019). Por lo tanto, en las próximas décadas, se esperan ganancias significativas en eficiencia, principalmente a través de la integración digital y la inteligencia de los procesos de fabricación (Chang et al., 2019).

Conceptos como IoT, fabricación basada en la nube y fabricación digital cumplen con estos requisitos. Sin embargo, existen dificultades para determinar su estado de desarrollo en relación con la visión de la Industria 4.0 y, como resultado, no se han identificado campos de acción específicos, programas y proyectos. Para superar la creciente incertidumbre e insatisfacción en las empresas manufactureras respecto a la idea de la Industria 4.0, se necesitan nuevos métodos y herramientas, como los niveles de preparación tecnológica (TRL), para proporcionar orientación y apoyo con el fin de alinear las estrategias de negocio y operaciones (Chistov et al., 2020).

Es necesario no solo aplicar la combinación de tecnología digital al proceso de fabricación y diseño de aeronaves, sino también enfatizar la colaboración entre diseño y fabricación. Para alcanzar estos objetivos, el diseño descentralizado en tiempo real y la información de fabricación deben ser recopilados, optimizados e integrados por un sistema de control inteligente, adaptándose mejor a los procesos de diseño y fabricación de aeronaves, con el fin de optimizar el producto en su totalidad (Zutin et al., 2022).

Otro aspecto importante que ha transformado la Industria 4.0 en la aeronáutica es el mantenimiento. El mantenimiento en la industria aeronáutica es un campo crucial que juega un papel fundamental en garantizar la seguridad, eficiencia y fiabilidad de las aeronaves. En esta industria, donde la seguridad es de suma importancia, el mantenimiento no es simplemente una tarea operativa, sino una cuestión crítica que implica una combinación de conocimientos técnicos avanzados, regulaciones estrictas, innovación tecnológica y prácticas rigurosas (Biedermann & Kinz, 2019). La integración de tecnologías como el Internet de las Cosas (IoT), la inteligencia artificial (IA) y el Big Data está permitiendo enfoques más sofisticados, como el mantenimiento predictivo o Mantenimiento 4.0, que utiliza datos en tiempo real y análisis avanzados para predecir cuándo es probable que los componentes de una aeronave necesiten atención (Høgden, 2019).

El Mantenimiento 4.0 amplía las capacidades de los sistemas de gestión de mantenimiento informatizados (CMMS) y las soluciones “clásicas” de gestión de activos (EAM), añadiendo herramientas modernas para la gestión del rendimiento de activos en varios niveles (APM). La Gestión del Rendimiento de Activos (APM) incluye funciones para recopilar, integrar, visualizar y analizar datos con el fin de mejorar la fiabilidad y el tiempo de actividad de los activos. El concepto de APM se basa en monitorear el estado actual del equipo, pronosticar y realizar un mantenimiento orientado a la fiabilidad (RCM) (Werbińska-Wojciechowska & Winiarska, 2023).

El Mantenimiento 4.0 depende en gran medida del uso de algoritmos de análisis de Big Data y modelos de aprendizaje automático. Para la recopilación de datos de la tecnología del Internet de las Cosas (IoT), se permite la acumulación de lecturas de sensores durante un largo período de tiempo en repositorios de Data Lake empresariales (Korchagin et al., 2022). El objetivo principal del Mantenimiento 4.0 es predecir y prevenir posibles fallos en el equipo, acercándose lo más posible a una operación de producción completamente ininterrumpida. Herramientas avanzadas de análisis y pronóstico ayudan a organizar el mantenimiento preventivo de manera oportuna, identificar el momento óptimo para reemplazar componentes y piezas, así como el tiempo para dismantelar y reemplazar el equipo (Høgden, 2019). Además, debido a la alta precisión de los pronósticos, las empresas pueden reducir significativamente las existencias de recursos y artículos de inventario necesarios para el mantenimiento y la reparación (Pedersen & Schjølberg, 2020).

La Industria 4.0 ha traído cambios en la forma de producción, así como el uso de nuevos materiales. Uno de los cambios más notables en la producción es la impresión 3D, también denominada manufactura aditiva. La impresión 3D es una técnica de fabricación por capas utilizada para producir diversas estructuras y geometrías complejas a partir de datos de modelos. El proceso consiste en imprimir sucesivas capas de material una encima de la otra (Goh et al., 2021).

El uso de impresoras 3D tiene muchas ventajas para las empresas que producen para la industria aeroespacial, particularmente en la producción de piezas con geometría compleja. En los últimos años, las piezas complejas en términos de forma y estructura han cobrado protagonismo, y surgen muchos problemas cuando la producción de estas piezas se realiza mediante métodos convencionales (Kalender et al., 2019). Un tema importante es reducir los costos simplificando el proceso de producción y fabricación. Los diseñadores de productos pueden mejorar las propiedades de la pieza con pequeñas correcciones en este método de fabricación (Joshi & Sheikh, 2015). La solución de problemas funcionales y estéticos puede resolverse con tecnologías de impresoras 3D; además, partes de un diseño compuesto por múltiples componentes pueden ser impresas como un todo, lo que es crucial en términos de costo y tiempo, ya que menos partes implican menos análisis de ensamblaje y menor complejidad (Karkun & Dharmalingam, 2022).

También habrá menos obstáculos en el diseño de piezas. Factores como la selección de ángulos de desmoldeo, líneas de partición y mucho más se reducirán. Ahora es posible diseñar piezas que no se reproducen fácilmente mediante mecanizado, que tienen formas complejas o generan un alto desperdicio de material durante el proceso (Kumar & Krishnadas Nair, 2017). Los diseñadores podrán optimizar sus relaciones fuerza/peso minimizando el uso de material, lo que también minimiza los costos de mecanizado. Este método contribuye a la reducción del desperdicio de material, los

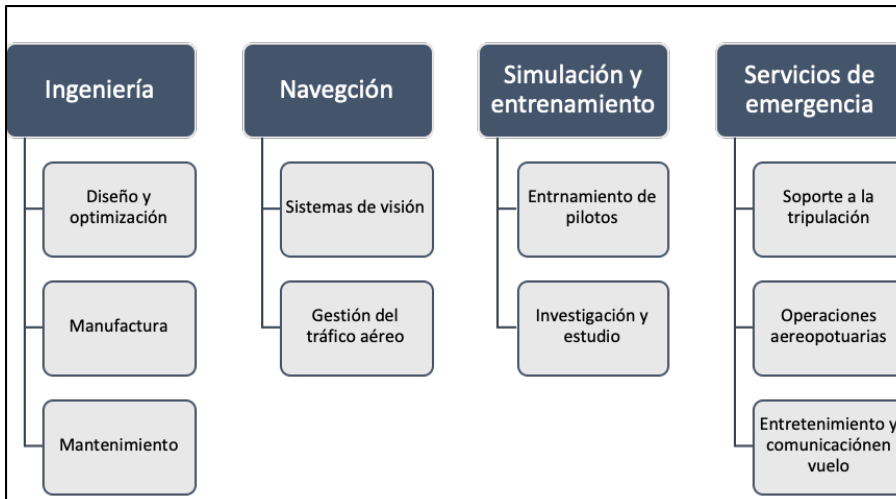
costos de eliminación de desechos, los costos de transporte de material y la producción directa del producto final, lo que reduce los costos generales y los daños derivados de cambios en el diseño o ventas decepcionantes, ya que se mantiene menos stock (Vieira & Romero-Torres, 2016).

Dentro del diseño e ingeniería de la industria aeronáutica, la realidad aumentada (RA) representa una revolución tecnológica con un potencial transformador. La RA es un mecanismo de visualización que combina contenidos del mundo real y virtual en una sola pantalla. Por definición, los contenidos del mundo real existen en el mundo físico del usuario, mientras que los contenidos del mundo virtual son generados por computadora (Carmigniani & Furht, 2011). Esta innovadora herramienta se está integrando progresivamente en diversos aspectos del sector aéreo, desde el diseño y fabricación de aeronaves hasta las operaciones de mantenimiento y la experiencia de vuelo. En un ámbito donde la precisión y la eficiencia son fundamentales, la RA ofrece una serie de aplicaciones que mejoran la calidad, seguridad y rendimiento (Auffinger, 2021).

En la industria aeroespacial, la RA ha sido utilizada durante décadas para mejorar la navegación en la aviación civil y militar de vehículos tripulados y no tripulados. Los ingenieros y técnicos también han empleado sistemas de RA para mejorar el flujo de trabajo y el entorno en el diseño, mantenimiento y ensamblaje de vehículos aeroespaciales (Ceruti et al., 2019).

Hoy en día, el uso de la RA está avanzando aún más con las gafas y cascos de realidad aumentada, herramientas que permiten la interacción directa con el entorno virtual sin perder contacto con el mundo físico. Estas tecnologías están mejorando las prácticas operacionales al ofrecer al personal de mantenimiento una visión en tiempo real de los componentes de una aeronave, mientras trabajan de manera más eficiente y precisa.

Figura 5. Áreas de mayor aplicación de la IA en la industria aérea



Fuente: Elaboración propia con base en Safi et al. (2019).

9. CONCLUSIONES

Este capítulo ha explorado en profundidad las estrategias y los desafíos asociados con la implementación de Tecnologías 4.0 en la gestión aérea militar, centrándose específicamente en los contextos de México y Colombia. A través de un análisis de literatura, se han identificado los elementos clave que contribuyen tanto al éxito como a los obstáculos encontrados en la integración de estas tecnologías avanzadas dentro de los marcos operativos y estratégicos de la gestión aérea militar en ambas naciones.

La evaluación del estado actual de la implementación de las Tecnologías 4.0 en la gestión aérea militar en México y Colombia revela un panorama complejo, marcado tanto por avances significativos como por desafíos persistentes. El análisis realizado muestra que ambos países han hecho esfuerzos considerables para integrar tecnologías avanzadas en sus fuerzas aéreas, con el objetivo de mejorar la eficiencia operativa, la seguridad y la capacidad de respuesta ante emergencias y desafíos de seguridad nacional. Sin embargo, la implementación efectiva de estas tecnologías enfrenta obstáculos relacionados con la infraestructura tecnológica existente, la capacitación del personal y la asignación de recursos financieros.

La implementación de las Tecnologías 4.0 en la gestión aérea militar de ambos países no solo resulta crucial para la modernización de sus capacidades defensivas y operativas, sino que también ofrece la oportunidad de fomentar la innovación, la cooperación internacional y el desarrollo de una industria nacional de defensa más robusta. Para que México y Colombia superen los desafíos actuales y aprovechen plenamente el potencial de las Tecnologías 4.0, es imperativo adoptar un enfoque integral que incluya la actualización de infraestructuras, el desarrollo de capacidades internas, alianzas estratégicas con la industria tecnológica y la capacitación de su personal.

La exploración detallada de las Tecnologías 4.0 relevantes para la gestión aérea militar en México y Colombia ha proporcionado una visión integral de cómo la revolución digital redefine las capacidades defensivas y operativas de las fuerzas aéreas. Este estudio ha identificado varias tecnologías clave, como la inteligencia artificial, el internet de las cosas, la robótica avanzada, los sistemas de drones autónomos, la realidad aumentada y la ciberseguridad, como fundamentales para impulsar la eficiencia, la seguridad y la efectividad en el ámbito militar aéreo.

Para aprovechar estas tecnologías, se proponen estrategias adaptadas a las realidades regionales en la industria aérea militar de México y Colombia, lo que representa un paso fundamental hacia la modernización y optimización de sus capacidades defensivas y operativas. Este estudio ha profundizado en el análisis de los contextos específicos de cada país, identificando tanto las oportunidades únicas como los desafíos particulares que enfrentan en el camino hacia la integración de estas tecnologías avanzadas. Las estrategias propuestas para ambos países también subrayan la relevancia de adoptar un enfoque de gestión de riesgos, especialmente en lo que respecta a la ciberseguridad, y de explorar nuevas formas de cooperación internacional para compartir experiencias, conocimientos y recursos en la implementación de estas tecnologías.

Es evidente que el campo de las tecnologías aeronáuticas militares está experimentando una transformación sin precedentes, impulsada por innovaciones emergentes que prometen redefinir tanto la estrategia como la táctica de las operaciones militares aéreas. Este estudio ha explorado una amplia gama de desarrollos tecnológicos, desde

sistemas de aeronaves no tripuladas y vehículos aéreos autónomos hasta tecnologías de sigilo avanzadas, inteligencia artificial aplicada al análisis de datos y operaciones, y mejoras significativas en la ciberdefensa y la guerra electrónica. Estas innovaciones no solo amplían las capacidades operativas y estratégicas de las fuerzas aéreas, sino que también establecen nuevos paradigmas para el conflicto y la seguridad internacionales.

Las aeronaves no tripuladas y los sistemas autónomos, por ejemplo, proporcionan capacidades sin precedentes para la vigilancia, el reconocimiento y el ataque, reduciendo al mismo tiempo los riesgos para el personal humano. La integración de la IA en sistemas aeronáuticos militares facilita la toma de decisiones más rápida y precisa, tanto en tiempo real como en la planificación y análisis de misiones. La tecnología de sigilo, por su parte, sigue evolucionando, permitiendo que las aeronaves operen en espacios aéreos disputados con un riesgo significativamente reducido de detección.

Sin embargo, estas innovaciones también plantean desafíos significativos, especialmente en términos de ética y seguridad. La autonomía de las máquinas en el teatro de operaciones militares suscita preguntas fundamentales sobre la toma de decisiones en situaciones de conflicto, la responsabilidad y el control humano. Además, la creciente dependencia de las tecnologías digitales y de red aumenta la vulnerabilidad a los ataques cibernéticos, lo que requiere un enfoque renovado y robusto en ciberseguridad. Por estas razones, este estudio ha analizado cómo la integración de tecnologías avanzadas, como la inteligencia artificial, el internet de las cosas y los sistemas autónomos, transforma no solo las capacidades operativas y estratégicas de las fuerzas aéreas, sino también los marcos éticos y de seguridad en los que operan.

En términos de seguridad, la dependencia de las Tecnologías 4.0 introduce vulnerabilidades y desafíos sin precedentes, especialmente en lo que respecta a la ciberseguridad. La protección de sistemas críticos y de infraestructuras tecnológicas contra ataques cibernéticos, la garantía de la integridad de los datos y la prevención del uso no autorizado de tecnología militar son aspectos clave que requieren estrategias robustas de gestión de riesgos y seguridad.

Las innovaciones emergentes en tecnologías aeronáuticas militares están configurando el futuro de la guerra y la defensa, ofreciendo tanto oportunidades extraordinarias como desafíos complejos. Para capitalizar plenamente estos avances, las fuerzas aéreas deben adoptar un enfoque holístico que equilibre la innovación tecnológica con consideraciones éticas, legales y de seguridad. Esto incluye el desarrollo de marcos regulatorios y de políticas que guíen el uso ético de tecnologías autónomas, así como la inversión en ciberdefensa y en la formación del personal para operar y mantener las tecnologías emergentes. Además, la colaboración internacional y el intercambio de conocimientos serán cruciales para abordar los desafíos globales que estas tecnologías presentan. De esta manera, las fuerzas aéreas podrán mantenerse a la vanguardia de la capacidad militar, mientras preservan la seguridad y estabilidad internacionales en una era de rápida innovación tecnológica.

Mirando hacia el futuro, México y Colombia deben continuar adaptando y refinando estas estrategias a medida que avanzan en la implementación de las Tecnologías 4.0. Esto garantizará que sus industrias aéreas militares no solo se mantengan a la vanguardia en términos tecnológicos, sino que también contribuyan a la seguridad

y estabilidad regional en un mundo cada vez más interconectado y digitalizado. La voluntad política, la inversión estratégica y el compromiso con la innovación serán claves para transformar estos desafíos en oportunidades, marcando el camino hacia una gestión aérea militar más eficiente, segura y resiliente.

10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Air Force Technology. (2021). *Military Robotics*. Recuperado de <https://www.airforce-technology.com/features/military-robotics/>
- Ali, O., & Osmanaj, V. (2020). The role of government regulations in the adoption of cloud computing: A case study of local government. *Computer Law & Security Review*, 36, 105396. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.clsr.2020.105396>
- Allhoff, F., & Henschke, A. (2018). The Internet of Things: Foundational ethical issues. *Internet of Things*, 1-2, 55-66. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.iot.2018.08.005>
- Alouffi, B., Hasnain, M., Alharbi, A., Alosaimi, W., Alyami, H., & Ayaz, M. (2021). A Systematic Literature Review on Cloud Computing Security: Threats and Mitigation Strategies. *IEEE Access*, 9, 57792-57807. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3073203>
- Amin, B. B. (2023). Liberté d'expression et plateformes numériques en Algérie, réflexions normatives et sociotechniques Freedom of Expression and Digital Platforms in Algeria, normative and socio-technical reflections. *Revue Académique des Etudes Sociales et Humaines Vol*, 15(02), 386-400.
- Auffinger, C. E. (2021). *Evaluation and implementation of augmented reality for aerospace operations and sustainment* Massachusetts Institute of Technology].
- Bajic, B., Rikalovic, A., Suzic, N., & Piuri, V. (2020). Industry 4.0 implementation challenges and opportunities: A managerial perspective. *IEEE Systems Journal*, 15(1), 546-559.
- Benias, N., & Markopoulos, A. P. (2017). A review on the readiness level and cyber-security challenges in Industry 4.0. 2017 South Eastern European Design Automation, Computer Engineering, Computer Networks and Social Media Conference (SEEDA-CECNSM),
- Benítez Manaut, R., Pocoroba García, A., Sánchez, L. (2021), Zepeda Gil, R., Gómez Sánchez, E., & Friedrich-Ebert-Stiftung Representación en México. (2021). *Fuerzas Armadas, Guardia Nacional y violencia en México*. (R. Benítez Manaut & El. Gómez Sánchez, Eds.) (1st ed.). Friedrich-Ebert-Stiftung.
- Biedermann, H., & Kinz, A. (2019). Lean smart maintenance—value adding, flexible, and intelligent asset management. *system*, 4, 5.
- Brey, P. A. E. (2012). Anticipatory Ethics for Emerging Technologies. *NanoEthics*, 6(1), 1-13. <https://doi.org/10.1007/s11569-012-0141-7>
- Brown, R., & Miller, S. (2019). Challenges and Opportunities in the Age of Fourth Industrial Revolution in Military Aviation. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2019, 1-12.

- Carmigniani, J., & Furht, B. (2011). Augmented reality: an overview. *Handbook of augmented reality*, 3-46.
- Ceruti, A., Marzocca, P., Liverani, A., & Bil, C. (2019). Maintenance in aeronautics in an Industry 4.0 context: The role of Augmented Reality and Additive Manufacturing. *Journal of Computational Design and Engineering*, 6(4), 516-526.
- Chang, S., Wang, Z., Wang, Y., Tang, J., & Jiang, X. (2019). *Enabling technologies and platforms to aid digitalization of commercial aviation support, maintenance and health management*. 2019 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (QR2MSE),
- Chen, L. et al. (2020). Cybersecurity Measures in Modern Military Aviation: A Comprehensive Review. *Cyber Defense Review*, 15(4), 55-70.
- Chistov, I. V., Zakutnev, S. E., & Ryazanov, A. A. (2020, 2020). *Prospects for Developing a Competitive Position of the Russian Aerospace Industry in the World Market in Conditions of Economic Digitalization*. Industry Competitiveness: Digitalization, Management, and Integration, Cham.
- Codur, K. B., & Dogru, A. H. (2012). Regulations and software evolution: An example from the military domain. *Science of Computer Programming*, 77(5), 636-643. <https://doi.org/10.1016/j.scico.2011.12.001>
- Comando General Fuerzas Militares de Colombia. (2016). PEM Plan Estratégico Militar - PEM 2030. Bogotá D.C.: Recuperado de <https://www.dipor.co/%7CDoctrina%20Publica%7C/1%20Comando%20General%20Fuerzas%20Militares/Manuales/PEM%202030%20FINAL%20OBJETIVOS%20ESTRAT%C3%89GICOS.pdf>
- Corretjer, P. J. (2018). A Cybersecurity Analysis of Today's Commercial Aircrafts and Aviation Industry Systems. *Masters Thesis*, 22.
- Dawson, M. (2018). Cyber security in industry 4.0: The pitfalls of having hyperconnected systems. *Journal of Strategic Management Studies*, 10(1), 19-28.
- Defense News. (2019). *Artificial intelligence is the future of warfare*. Recuperado de <https://www.defensenews.com/opinion/commentary/2019/05/23/artificial-intelligence-is-the-future-of-warfare/>
- Dodgson, M., Gann, D., & Salter, A. (2008). *The management of technological innovation: Strategy and practice*. Oxford University Press.
- Etzioni, A., & Etzioni, O. (2017). Incorporating Ethics into Artificial Intelligence. *The Journal of Ethics*, 21(4), 403-418. <https://doi.org/10.1007/s10892-017-9252-2>
- Fan, Y. C., & Wen, C. Y. (2019). A virtual reality soldier simulator with body area networks for team training. *Sensors (Switzerland)*, 19(3). <https://doi.org/10.3390/s19030451>
- Flatt, H., Schriegel, S., Jasperneite, J., Trsek, H., & Adamczyk, H. (2016). *Analysis of the Cyber-Security of industry 4.0 technologies based on RAMI 4.0 and identification of requirements*. 2016 IEEE 21st International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA),

- Freeman, C., & Soete, L. (1997). *The economics of industrial innovation*. Routledge.
- Fuerza Aérea Colombiana (2011). *Plan Estratégico Institucional Fuerza Aérea Colombiana 2010-2030*. https://www.fac.mil.co/sites/default/files/linktransparencia/control/Informesgestion/contraloria/5._plan_estrategico_institucional_fac.pdf
- Goh, G. L., Zhang, H., Chong, T. H., & Yeong, W. Y. (2021). 3D Printing of Multilayered and Multimaterial Electronics: A Review. *Advanced Electronic Materials*, 7(10), 2100445. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/aelm.202100445>
- Gómez, A. (2017). Modernización de la Fuerza Aérea Mexicana: Retos y Oportunidades. *Revista de Seguridad y Defensa*, 22(3), 45-60.
- Gonzalez, M. A., & Betancourt Montoya, M. A. (2018). La transformación del Ejército Nacional de Colombia: una interpretación teórica. *URVIO - Revista Latinoamericana de Estudios de Seguridad*, (22), 70-84. <https://doi.org/10.17141/urvio.22.2018.3093>
- González, R. (2018). Blockchain in Military Logistics: Revolutionizing Supply Chain Management. *Military Technology Journal*, 12(3), 89-104.
- Gubán, M., & Kovács, G. (2017). INDUSTRY 4.0 CONCEPTION. *Acta Technica Corviniensis-Bulletin of Engineering*, 10(1).
- Guyon, I., Amine, R., Tamayo, S., & Fontane, F. (2019). *Analysis of the opportunities of industry 4.0 in the aeronautical sector*. 10th International Multi-Conference on Complexity, Informatics and Cybernetics: IMCIC 2019,
- Haass, J., Sampigethaya, R., & Capezzuto, V. (2016). Aviation and cybersecurity: opportunities for applied research. *Tr News*(304), 39.
- Høgden, M. (2019). Developing a framework for predictive maintenance for a land-based company from an Industry 4.0 perspective University of Stavanger, Norway].
- Hurtado, J., Ch, D. A., & Londo, A. (2020). Avances en la industria web 4.0 En colombia y su aplicabilidad. *Areandina*, (1), 1-41.
- Jackman, A. (2023). 'Manning' the 'unmanned': Reapproaching the military drone through learning the/to drone. *Political Geography*, 104(April). <https://doi.org/10.1016/j.polgeo.2023.102894>
- Jia, H. (2020). Research ethics: a safeguard for advanced technologies. *National Science Review*, 7(11), 1787-1792.
- Johnson, M. et al. (2022). Advancements in Artificial Intelligence for Military Aviation. *Journal of Defense Technology*, 17(1), 23-38.
- Jones, A., et al. (2020). Transforming Military Aviation through Industry 4.0 Technologies. *Journal of Defense Technology*, 15(2), 45-62.
- Joshi, S. C., & Sheikh, A. A. (2015). 3D printing in aerospace and its long-term sustainability. *Virtual and Physical Prototyping*, 10(4), 175-185. <https://doi.org/10.1080/17452759.2015.1111519>
- Kagalwalla, N., & Churi, P. P. (2019, 19-21 Sept. 2019). Cybersecurity in Aviation : An Intrinsic Review. 2019 5th International Conference On Computing,

Communication, Control And Automation (ICCUBEA),

- Kalender, M., Kılıç, S. E., Ersoy, S., Bozkurt, Y., & Salman, S. (2019). Additive manufacturing and 3D printer technology in aerospace industry. 2019 9th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST),
- Kaplan, A. D., Cruit, J., Endsley, M., Beers, S. M., Sawyer, B. D., & Hancock, P. A. (2021). The Effects of Virtual Reality, Augmented Reality, and Mixed Reality as Training Enhancement Methods: A Meta-Analysis. *Human Factors*, 63(4), 706–726. <https://doi.org/10.1177/0018720820904229>
- Karkun, M. S., & Dharmalingam, S. (2022). 3D printing technology in aerospace industry—a review. *International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace*, 9(2), 4.
- Karnik, N., Bora, U., Bhadri, K., Kadambi, P., & Dhatrak, P. (2022). A comprehensive study on current and future trends towards the characteristics and enablers of industry 4.0. *Journal of Industrial Information Integration*, 27, 100294. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jii.2021.100294>
- Kearney, T. (2018). Readiness for the Future of Production. Retrieved from http://www3.weforum.org/docs/FOP_Readiness_Report_2018.pdf
- Korchagin, A., Deniskin, Y., Pocebneva, I., & Vasilyeva, O. (2022). Lean Maintenance 4.0: implementation for aviation industry. *Transportation Research Procedia*, 63, 1521-1533. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.06.164>
- Kot, T., & Novák, P. (2018). Application of virtual reality in teleoperation of the military mobile robotic system TAROS. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 15(1), 1–6. <https://doi.org/10.1177/1729881417751545>
- Kumar, L. J., & Krishnadas Nair, C. (2017). Current trends of additive manufacturing in the aerospace industry. *Advances in 3D printing & additive manufacturing technologies*, 39-54.
- Ladrière, J. (1977). The challenge presented to cultures by science and technology. UNESCO.
- Lu, Y. (2017). Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues. *Journal of Industrial Information Integration*, 6, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2017.04.005>
- Lykou, G., Iakovakis, G., & Gritzalis, D. (2019). Aviation cybersecurity and cyber-resilience: assessing risk in air traffic management. *Critical Infrastructure Security and Resilience: Theories, Methods, Tools and Technologies*, 245-260.
- Martínez, C., & Rodríguez, E. (2021). Big Data Analytics in Military Aviation: Enhancing Decision-Making. *Journal of Military Technology*, 26(3), 112-127.
- McGregor, C., Bonnis, B., Stanfield, B., & Stanfield, M. (2017). Integrating Big Data analytics, virtual reality, and ARAIG to support resilience assessment and development in tactical training. 2017 IEEE 5th International Conference on Serious Games and Applications for Health, SeGAH 2017. <https://doi.org/10.1109/SeGAH.2017.7939256>
- Mendes, A. L. M. (2016). Philosophy and Ethics of Aerospace Engineering Universidade da Beira Interior (Portugal).

- Moll, I. (2022). The fourth Industrial revolution: A new Ideology. tripleC: Communication, Capitalism & Critique. Open Access Journal for a Global Sustainable Information Society, 20(1), 45-61.
- Moor, J. H. (2005). Why We Need Better Ethics for Emerging Technologies. Ethics and Information Technology, 7(3), 111-119. <https://doi.org/10.1007/s10676-006-0008-0>
- Morales, V. H. (SRE). (2017). La relación estratégica México-Colombia. Ciudad de México. Retrieved from http://ccmexcol.com/wp-content/uploads/2017/09/PRESENTACIÓN-1_SEPTIEMBRE.pdf
- Nagajyothi, K., & Malathi, K. (2016). Security challenges in cloud computing. International Journal of Pharmacy and Technology, 8(4), 21175-21179. <https://doi.org/10.4018/978-1-4666-5888-2.ch141>
- Nonaka, I., & Takeuchi, H. (1995). The knowledge-creating company: How Japanese companies create the dynamics of innovation. Oxford university press.
- Patanakul, P., & Milosevic, D. (2015). Project management for the creation of organizational value. Springer.
- Pedersen, T. I., & Schjøberg, P. (2020). The Economic Dimension of Implementing Industry 4.0 in Maintenance and Asset Management. Advanced Manufacturing and Automation IX 9th,
- Philbeck, T., & Davis, N. (2018). The fourth industrial revolution. Journal of International Affairs, 72(1), 17-22.
- Postelnicu, C., & Câlea, S. (2019). The fourth industrial revolution. Global risks, local challenges for employment. Montenegrin Journal of Economics, 15(2), 195-206.
- Potts, P. L. (2022). Action—A Model for Prioritizing Cross Sector Aviation Cyber Threats Capitol Technology University.
- Riaz, S., Khan, A. H., Haroon, M., Latif, S., & Bhatti, S. (2020, 13-14 Aug. 2020). *Big Data Security and Privacy: Current Challenges and Future Research perspective in Cloud Environment*. 2020 International Conference on Information Management and Technology (ICIMTech),
- Rothwell, R. (1994). Towards the fifth-generation innovation process. International Marketing Review.
- Roush, K. (2022). Designing for Security: A Cybersecurity Introduction for Aerospace Education.
- Safi, M., Chung, J., & Pradhan, P. (2019). Review of augmented reality in aerospace industry. Aircraft engineering and aerospace technology, 91(9), 1187-1194.
- Secretaría de la Defensa Nacional. (2019). *Plan de Desarrollo Institucional de la Fuerza Aérea Mexicana*. Editorial Militar.
- Secretaría de la Defensa Nacional. (2021). Informe Anual de Actividades de la Fuerza Aérea Mexicana. * Ciudad de México, México.
- Smith, A., & Williams, B. (2019). Harnessing the Power of IoT in Military Aviation. *International Journal of Aerospace Innovation*, 4(2), 67-82.

- Smith, J. (2018). *A Century of Wings: The Evolution of Military Aviation*. Military History Press.
- Sollie, P. (2007). Ethics, technology development and uncertainty: an outline for any future ethics of technology. *Journal of Information, Communication and Ethics in Society*, 5(4), 293-306.
- Steven, L., Hauw, J. K., Keane, M. B., & Gunawan, A. A. S. (2023). Empowering Military in Tactical and Warfare Area with Virtual Reality Technology: A Systematic Literature Review. *Procedia Computer Science*, 227, 892–901. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.10.596>
- Tawalbeh, L. a., Muheidat, F., Tawalbeh, M., & Quwaider, M. (2020). IoT Privacy and Security: Challenges and Solutions. *Applied Sciences*, 10(12), 4102. <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/12/4102>
- TE Connectivity. (2018). MIL-DTL-38999: Conectando el pasado con el futuro de la aviación militar. Recuperado de <https://www.te.com/es/products/connectors/circular-connectors/intersection/mil-dtl-38999-connecting-past-to-future-of-military-aviation.html>
- Tidd, J., & Bessant, J. (2018). *Managing innovation: Integrating technological, market and organizational change*. John Wiley & Sons.
- Tomás Peña, P. (2023). Design and development of a new course on Ethics in Aerospace Engineering Universitat Politècnica de Catalunya].
- Tseng, M.-L., Tran, T. P. T., Ha, H. M., Bui, T.-D., & Lim, M. K. (2021). Sustainable industrial and operation engineering trends and challenges Toward Industry 4.0: a data driven analysis. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 38(8), 581-598. <https://doi.org/10.1080/21681015.2021.1950227>
- Ukwandu, E., Ben-Farah, M. A., Hindy, H., Bures, M., Atkinson, R., Tachtatzis, C., Andonovic, I., & Bellekens, X. (2022). Cyber-security challenges in aviation industry: A review of current and future trends. *Information*, 13(3), 146.
- Utterback, J. M. (1994). *Mastering the dynamics of innovation*. Harvard Business Press.
- Vargas-Elizondo, C. (2020). On the role of ethics in shaping technology development. *HighTech and Innovation Journal*, 1(2), 86-100.
- Vargas, J. (2020). *Desafíos en la Aviación Militar: El Caso de la Fuerza Aérea Colombiana.* *Anales de Estrategia y Seguridad*, 15(2), 75-89.
- Vieira, D. R., & Romero-Torres, M. A. (2016). Is 3D printing transforming the project management function in the aerospace industry? *The Journal of Modern Project Management*, 4(1), 187-187.
- Villarreal, I. G., Garza, J. R. G., Montemayor, R. E. R., & Taboada, J. A. (2016). Crafting the future: a roadmap for industry 4.0 in mexico. *Secretaria de Economía*, 1–98. Retrieved from www.gob.mx/se
- Waidner, M., & Kasper, M. (2016, 14-18 March 2016). Security in industrie 4.0 - challenges and solutions for the fourth industrial revolution. 2016 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE),

- Wei, L., Zhou, H., & Nahavandi, S. (2019). Haptically enabled simulation system for firearm shooting training. *Virtual Reality*, 23(3), 217–228. <https://doi.org/10.1007/s10055-018-0349-0>
- Werbińska-Wojciechowska, S., & Winiarska, K. (2023). Maintenance Performance in the Age of Industry 4.0: A Bibliometric Performance Analysis and a Systematic Literature Review. *Sensors*, 23(3), 1409.
- Xu, M., David, J. M., & Kim, S. H. (2018). The fourth industrial revolution: Opportunities and challenges. *International journal of financial research*, 9(2), 90-95.
- Zezulka, F., Marcon, P., Vesely, I., & Sajdl, O. (2016). Industry 4.0 – An Introduction in the phenomenon. *IFAC-PapersOnLine*, 49(25), 8-12. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.12.002>
- Zutin, G. C., Barbosa, G. F., de Barros, P. C., Tiburtino, E. B., Kawano, F. L. F., & Shiki, S. B. (2022). Readiness levels of Industry 4.0 technologies applied to aircraft manufacturing—a review, challenges and trends. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 120(1), 927-943. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-08769-1>

CAPÍTULO 7.

INFLUENCIA DE LOS SATÉLITES PEQUEÑOS PARA LA SEGURIDAD Y DEFENSA NACIONAL

Teniente Coronel Julián Andrés Delgado Martínez

<https://orcid.org/0000-0002-7991-8513>

julian.delgado@fac.mil.co

Teniente Coronel Gina Paola Garzón Méndez

<https://orcid.org/0009-0005-8448-7649>

gina.garzon@fac.mil.co

/ Escuela Militar de Aviación “Marco Fidel Suárez”

Fuerza Aeroespacial Colombiana (FAC)

1. INTRODUCCIÓN

Este capítulo aborda el dominio espacial como un objetivo estratégico clave para la seguridad y defensa de las naciones, destacando su creciente vulnerabilidad ante diversas amenazas. A medida que las amenazas en el espacio se diversifican, es fundamental revisar las estrategias de seguridad y defensa para adaptarse a los retos multidominio y complejos. En el ámbito espacial, la posibilidad de que los satélites sean hackeados, interferidos o utilizados con fines agresivos plantea riesgos significativos, afectando áreas esenciales como las comunicaciones, la navegación y la capacidad operativa de los países en los sectores militar, social y económico (Harvey, Smid, & Pirard, 2010).

A nivel internacional, se han adoptado políticas y estrategias nacionales para abordar estas amenazas, reconociendo el espacio como un dominio esencial para la disuasión y defensa, además de ser clave para la supervivencia humana y la exploración científica. Los países miembros de la OTAN y la Unión Europea, por ejemplo, han establecido políticas espaciales nacionales y consideran el espacio como un dominio estratégico fundamental para la seguridad global y la cooperación internacional (Wickramatunga, 2023).

En el caso de Colombia, si bien se han logrado avances en el sector espacial, estos han sido limitados. Aunque se promulgó una ley y se han formulado políticas relacionadas con las aplicaciones espaciales, los objetivos establecidos en los documentos CONPES no se han cumplido en su totalidad. No obstante, la creación de la Comisión Colombiana del Espacio y la adopción de estrategias institucionales por parte de la Fuerza Aeroespacial Colombiana (FAC) evidencian un compromiso con el desarrollo del sector espacial.

Ante este contexto, surge la necesidad de investigar y analizar el uso y explotación de los pequeños satélites en el dominio espacial, tanto a nivel internacional como nacional. Este análisis permitirá identificar las oportunidades, desafíos y riesgos asociados con el aprovechamiento de estos satélites, contribuyendo así a la protección y fortalecimiento del dominio espacial para la seguridad y defensa de Colombia.

Palabras clave: seguridad, defensa, pequeños satélites.

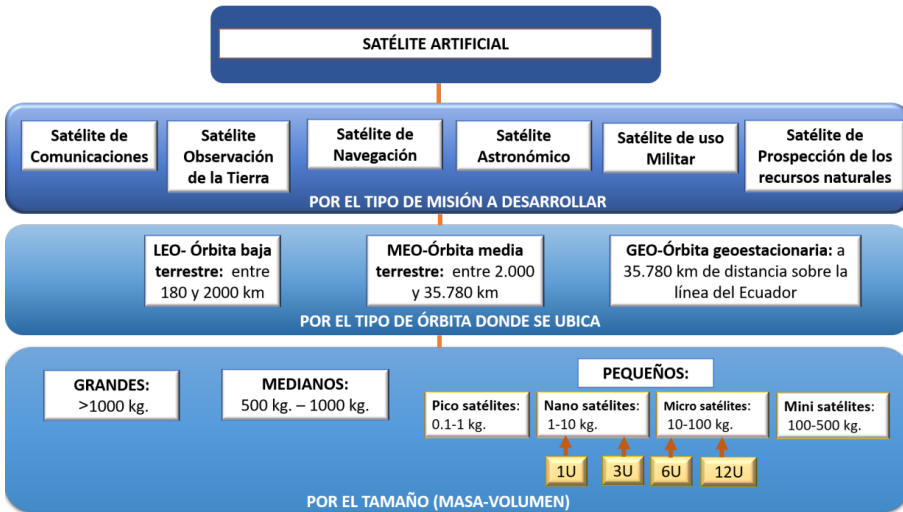
2. GENERALIDADES

Para comprender el uso y explotación del dominio espacial, es necesario tener en cuenta varios elementos fundamentales. En primer lugar, un satélite es un objeto que orbita alrededor de un planeta o una estrella. Este objeto puede ser una luna natural, un planeta o una máquina construida por el hombre (NASA, 2014). De acuerdo con Garzón (2021), los satélites artificiales pueden clasificarse en tres categorías principales:

1. **Por el tipo de misión a desarrollar:** Los satélites pueden cumplir diferentes misiones, tales como comunicaciones, observación de la Tierra, y navegación, entre otras.
2. **Por el tipo de órbita:** Los satélites se colocan en diferentes tipos de órbitas, dependiendo de sus funciones. Las órbitas bajas son ideales para satélites de observación, mientras que las órbitas medias y altas se emplean para satélites de comunicaciones y navegación.
3. **Por la configuración de masa-volumen:** Los satélites se pueden clasificar en tres grupos según su peso: grandes, medianos y pequeños. Los satélites pequeños se dividen, a su vez, en subcategorías dependiendo de su masa y volumen. Un ejemplo destacado de esta clasificación son los cubesats, que son satélites pequeños con configuraciones que van desde una unidad cúbica (1U) hasta doce unidades cúbicas (12U).

La Figura 1 resume esta clasificación, mostrando cómo los satélites varían tanto en función de su misión como en su configuración orbital y física. Estos diferentes tipos de satélites desempeñan roles esenciales en la exploración, la comunicación y la seguridad en el ámbito espacial, lo que subraya la importancia estratégica de este recurso.

Figura 1. Clasificación de los satélites artificiales



Fuente: (Garzón , 2021).

El concepto de los satélites pequeños, especialmente aquellos con un peso inferior a 10 kg (cubesats), tuvo su origen en la década de 1990. Esta idea surgió como un esfuerzo colaborativo entre dos académicos que identificaron la oportunidad de acceder al espacio de una manera más sencilla y económica. Los cubesats están diseñados a partir de unidades cúbicas estándar, cada una de las cuales mide 10 cm x 10 cm x 10 cm (Campbell, Wynne, & Thomas, 2011).

Una característica destacada de estos satélites es su capacidad para operar en constelaciones, es decir, en grupos que trabajan en conjunto para proporcionar respaldo y redundancia en sus funciones (Oficina de Información Científica y Tecnológica para el Congreso de la Unión, 2023). Este modelo aumenta la eficiencia y la capacidad operativa, permitiendo aplicaciones avanzadas en diversas áreas.

Los satélites pequeños se han consolidado como herramientas versátiles, con tiempos de fabricación reducidos y un rango de aplicaciones en proyectos innovadores, incluidos aquellos relacionados con la exploración del espacio profundo (Agencia Espacial Europea, 2022). En la Tabla 1, se presenta un conjunto de ejemplos que ilustran las aplicaciones más comunes y prácticas de los satélites pequeños en distintos campos. Estos usos reflejan su creciente importancia y el impacto significativo que tienen en la investigación científica y en la mejora de sistemas tecnológicos en el espacio.

Tabla 1. *Aplicaciones basadas en satélites pequeños*

DESARROLLO Y DEMOSTRACIÓN DE TECNOLOGÍAS	OBSERVACIÓN DE LA TIERRA	INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA	COMUNICACIONES	EXPLORACIÓN	DEFENSA
Misión Hera, para la Evaluación e Impacto de Asteroides.	NAME-O, una misión diseñada para llevar a cabo la tele-detección	SpectroCube, para evaluar el impacto del espacio en la biología y la química de los componentes básicos de la vida	Programa Pioneer: está probando nuevas tecnologías de telecomunicaciones	Misión FSS-Cat, para la observación en tándem de las regiones polares de la Tierra.	Constelación STP-S3 está diseñada para brindar servicios de comunicación, vigilancia y navegación
CAPSTONE: demostrará cómo ingresar y funcionar en esta órbita especial, así como probar una nueva capacidad de navegación	EUMETSAT, que mantiene los satélites meteorológicos de Europa.	Lunar Flashlight localizarán depósitos de hielo en los cráteres permanentemente sombreados de la Luna	SKYNET apoya a las Fuerzas Armadas del Reino Unido.	MarCO CubeSats e InSight: cada uno transmitió datos a la Tierra cuando el módulo de aterrizaje entró en la atmósfera marciana.	SIGINT dio una alerta temprana, cuando un radar fuera de uso en el sur de Irak reanudó sus operaciones;

Fuente: Elaboración propia basado en (Nanosats, 2023; Camps, 2019; Capderou, 2014).

El espacio exterior, o dominio espacial, se refiere al entorno que se encuentra más allá de la atmósfera terrestre. Este incluye no solo los satélites y cuerpos celestes, sino también otros objetos que orbitan alrededor de la Tierra. Comprender su importancia estratégica y su potencial es esencial para maximizar sus aplicaciones, como las que se destacaron anteriormente (Moliner González, 2023).

Existen tratados y acuerdos internacionales que regulan el uso y la explotación del espacio exterior. Entre los más relevantes están el **Tratado del Espacio Exterior de 1967** y la **Convención sobre la Responsabilidad Internacional por Daños Causados por Objetos Espaciales**, que establecen principios legales para garantizar su uso pacífico y seguro. Estos acuerdos regulan las actividades de los actores internacionales y fomentan la cooperación para evitar conflictos y asegurar la sostenibilidad del espacio (International Telecommunication Union, 2021; Moliner González, 2023).

Las principales agencias espaciales a nivel mundial, como la **NASA** (Estados Unidos), la **Agencia Espacial Europea (ESA)**, **Roscosmos** (Rusia) y la **CNSA** (China), desempeñan un papel crucial en el desarrollo tecnológico espacial. Estas instituciones lideran proyectos de exploración e investigación y promueven la cooperación internacional, lo que contribuye significativamente al avance en este dominio (NASA, 2020; Roscosmos, 2022; European Space Agency, 2019; China National Space Administration, 2018).

Sin embargo, el crecimiento de las actividades en el espacio trae consigo desafíos significativos en términos de seguridad y defensa. Problemas como la acumulación de basura espacial, las posibles colisiones de satélites, el uso indebido de tecnologías espaciales y el desarrollo de armas en este ámbito representan riesgos que deben ser abordados con urgencia (Ziarnick, 2005).

El dominio espacial tiene un enorme potencial para impulsar el desarrollo sostenible en áreas como las comunicaciones, la agricultura, la meteorología, la gestión de desastres, la navegación, la investigación científica y la defensa. Para aprovechar estas oportunidades de manera responsable, es fundamental adoptar enfoques que prioricen la inclusión, la protección ambiental y la mitigación de impactos negativos. Esto garantizará que el desarrollo en el espacio sea equitativo y sostenible, beneficiando tanto a las generaciones actuales como a las futuras.

3. CONTEXTO INTERNACIONAL Y NACIONAL

El uso y explotación del dominio espacial son pilares fundamentales para el modo de vida moderno. La conectividad a Internet, la televisión, el posicionamiento global, las transacciones financieras, las comunicaciones militares y comerciales, y las imágenes satelitales son solo algunos ejemplos de las aplicaciones de esta tecnología, que ha transformado la sociedad contemporánea. Además, el espacio es una herramienta esencial para la vigilancia del medio ambiente, una tarea cada vez más apremiante, lo que subraya la importancia de proteger este ámbito en beneficio de toda la humanidad.

La creciente proliferación de satélites de menor tamaño y costos de manufactura ha ampliado las posibilidades de aplicaciones espaciales, particularmente en la observación de la Tierra y el análisis de los fenómenos que en ella interactúan. Esto ha permitido comprender mejor los cambios en escalas local, regional y global, fortaleciendo la capacidad de respuesta ante desafíos ambientales y climáticos (Board & Council, 2014).

El crecimiento del sector espacial es evidente, tanto por el aumento en el monto de las inversiones como por la diversidad de programas satelitales que están en desarrollo (Belward & Skøien, 2015). Los pronósticos indican que la economía espacial podría alcanzar el billón de dólares anuales en la próxima década, lo que resalta su potencial como motor de desarrollo económico global (Khlystov, 2023).

No obstante, para sostener este crecimiento y garantizar un entorno seguro en el espacio y en la Tierra, es imprescindible abordar los riesgos asociados al uso del dominio espacial. Su importancia estratégica en la seguridad y defensa de las naciones exige medidas concertadas que promuevan tanto el aprovechamiento responsable como la protección de este recurso vital.

3.1 Contexto Internacional

Naciones de todo el mundo han recorrido un importante camino en el ámbito espacial, aprovechando los beneficios de las aplicaciones derivadas del uso de este dominio, cuyo alcance global se potencia mediante políticas y estrategias nacionales. Burton et al., en su informe titulado *International Space Collaboration and Security*, destacan cómo los países dependen cada vez más del espacio para tareas de seguridad nacional

y operaciones militares en todo el mundo. El informe señala que, aunque el espacio puede usarse con fines pacíficos, también es susceptible de fines agresivos. Por ejemplo, los satélites pueden ser hackeados, interferidos o armados, lo que podría paralizar las comunicaciones, la navegación y otras capacidades operativas esenciales. Reconociendo este desafío, los países miembros de la OTAN y de la Unión Europea han establecido Políticas Espaciales Nacionales, considerando el espacio como un ámbito dinámico y crítico para la disuasión y defensa de las naciones (Burton, Thompson, Papa, & Wong, 2022).

En el ámbito militar, los satélites desempeñan un papel fundamental, apoyando actividades como la detección de detonaciones subterráneas, la identificación de objetivos, los sistemas guiados de armas, la interceptación de comunicaciones, la inteligencia en tiempo real, las alertas tempranas para detección de misiles y los reportes meteorológicos (Ziarnick, 2005). Estas aplicaciones resaltan la relevancia estratégica de los sistemas espaciales.

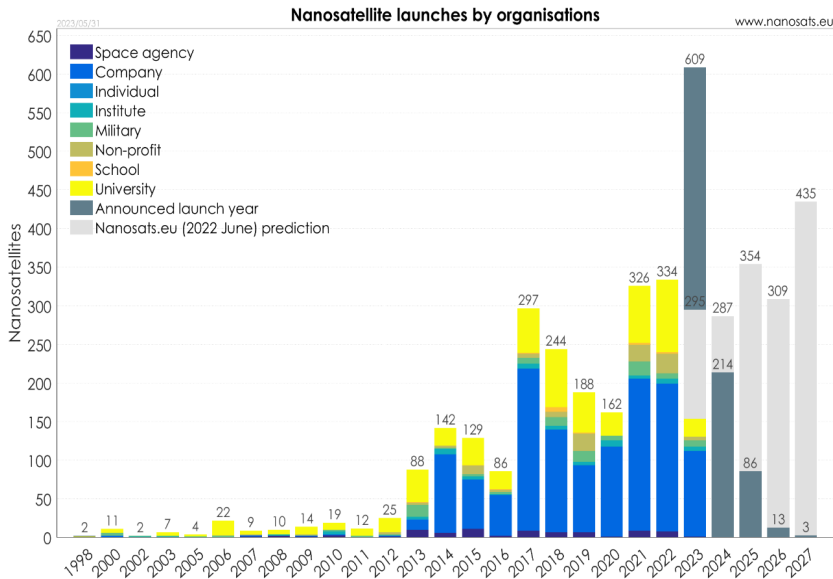
La tendencia actual en el desarrollo de satélites pequeños se enfoca en reducir los costos de lanzamiento mediante el uso compartido de viajes (*rideshare*), así como los costos de diseño, manufactura y pruebas. Esto ha permitido que más de 1500 satélites pequeños se encuentren en órbita, con más de 1000 nuevos lanzamientos proyectados en los próximos cinco años. Actualmente, más de 1100 empresas comerciales de 53 países desarrollan, fabrican y operan sistemas espaciales, lo que evidencia un crecimiento sin precedentes en este sector (Camps, 2019; Nanosats, 2023).

Diversos estudios destacan las capacidades y aplicaciones de los satélites pequeños en misiones militares, científicas y comerciales. Por ejemplo, Camps (2019) demostró su versatilidad en múltiples áreas, mientras que Greenland y Clark (2010) evaluaron sus capacidades como plataformas de validación para misiones de ciencia y vigilancia. Woeller et al. (2011) exploraron el impacto de estos satélites en naciones emergentes, y Chandrika (2006) analizó su uso dual en contextos militares y no militares. Además, bases de datos como *Nanosats* (2023) y recursos de la ESA ofrecen información detallada sobre las misiones satelitales actuales.

El dominio espacial se enfrenta a desafíos emergentes, como la competencia por los espacios en órbita, la asignación de frecuencias y la gestión del comando y control de satélites. Aunque el Tratado sobre el Espacio Ultraterrestre de 1967 sigue siendo una base legal fundamental, la soberanía y el uso pacífico del espacio probablemente serán objeto de discusión en el futuro debido al aumento exponencial de satélites y las nuevas dinámicas estratégicas globales (Grest, 2022; Wallis & David, 2008).

La Figura 2 muestra el análisis de *Nanosats* (2023) sobre la cantidad de satélites pequeños lanzados anualmente entre 1998 y 2022, junto con las proyecciones para 2023 y 2027, confirmando la tendencia hacia el uso dual de aplicaciones satelitales.

Figura 2. Lanzamiento de satélites pequeños por organización



Fuente: (Nanosats, 2023).

Se puede deducir que los usos militares y comerciales del espacio seguirán siendo fundamentales para los intereses nacionales, especialmente a medida que las capacidades espaciales se expanden en todo el mundo. En los últimos 15 años, se ha observado una convergencia entre los sectores espacial militar, comercial y educativo, con un cambio notable hacia el predominio del sector comercial como receptor y proveedor principal de servicios espaciales.

Hoy en día, los recursos militares tienden a priorizar la adquisición y alquiler de servicios tecnológicos avanzados sobre el mantenimiento de sistemas espaciales propios. Empresas privadas ofrecen servicios que antes eran exclusividad de agencias gubernamentales, como comunicaciones, conciencia situacional del espacio, inteligencia, vigilancia y reconocimiento, lanzamientos y vuelos espaciales. Este crecimiento del sector comercial evidencia un aumento en el alcance y la importancia global del espacio (Defense Intelligence Agency, 2022).

No obstante, este cambio también plantea riesgos para la seguridad nacional. Las interferencias intencionales con satélites aliados o nacionales representan una amenaza crítica, haciendo necesaria la adopción de estrategias para alcanzar y mantener la Superioridad Espacial. Para lograr esto, es fundamental integrar capacidades espaciales, asegurar la interoperabilidad y establecer sistemas de monitoreo efectivos para proteger activos espaciales y negar el uso del espacio a posibles adversarios (Burton, Thompson, Papa, & Wong, 2022; Wallis & David, 2008).

En el caso de la OTAN, las capacidades espaciales tanto en tierra como en el espacio son esenciales para garantizar el flujo continuo de información dentro del campo de combate. Los avances en satélites más pequeños y efectivos fortalecen áreas como las comunicaciones, navegación, vigilancia, monitorización de recursos terrestres y meteorología. Estas capacidades contribuyen significativamente al conocimiento situacional del campo de batalla y a la construcción de un entorno operativo común. La protección de estas capacidades y la restricción del acceso al espacio por parte de actores hostiles forman parte integral de la estrategia para mantener la superioridad espacial (Grest, 2022; Burton, Thompson, Papa, & Wong, 2022).

Entre las amenazas actuales y futuras para el uso y proliferación de activos espaciales destacan:

Daños accidentales a los sistemas espaciales

La probabilidad de colisión entre activos espaciales y objetos abandonados (desechos espaciales), especialmente en la órbita terrestre baja, aumenta debido al incremento significativo en el número de lanzamientos espaciales. Estas colisiones representan una amenaza, ya que pueden destruir o inutilizar cualquier activo espacial. Esta situación se agrava porque no existen normas internacionales vinculantes sobre la mitigación de desechos espaciales. Además, las condiciones ambientales en el espacio, como las tormentas solares, resultan importantes porque generan campos magnéticos o corrientes de partículas de alta energía que pueden afectar el funcionamiento de los satélites y dejarlos inoperativos (Khlystov, 2023; Defense Intelligence Agency, 2022).

Daños no accidentales a los sistemas espaciales

Varias naciones han desarrollado, probado y desplegado satélites y armas de contrapoder espacial capaces de atacar tanto el segmento espacial como el terrestre. Entre estas capacidades destacan los sistemas de interferencia (jamming) que interrumpen las comunicaciones y engañan a los sistemas de navegación, los ataques cibernéticos dirigidos a estaciones terrestres que bloquean o interfieren el comando y control de los activos espaciales, las armas antisatélite (ASAT) que emplean misiles lanzados desde tierra o desde el aire, y los sistemas láser diseñados para perturbar los sensores de los satélites en órbita.

Por ejemplo, países como China y Rusia han desarrollado nuevos sistemas para mejorar su eficacia militar y reducir su dependencia de sistemas espaciales estadounidenses, como el Sistema de Posicionamiento Global (GPS). Esta proliferación de capacidades supone una amenaza para las naciones que carecen de tecnología avanzada para contrarrestar los efectos adversos que podrían ocasionar (Defense Intelligence Agency, 2022; Grest, 2022).

3.2 Contexto Nacional

La masificación de la exploración espacial

La creciente exploración espacial a nivel mundial ha generado mayores oportunidades de acceso al espacio y ha priorizado la necesidad de contar con información clave para

la toma de decisiones en áreas como el ordenamiento territorial, la seguridad nacional y el desarrollo científico y tecnológico. En Colombia, diversos estudios documentan el uso y la explotación de este dominio. Por ejemplo, Barrero y Baquero señalan que las aspiraciones espaciales del país se han configurado a lo largo de décadas (Barrero & Baquero, 2022). Baquero destaca “la proyección del empleo del poder aéreo, espacial y ciberespacial para combatir y contener las amenazas, enfrentando los nuevos desafíos multidimensionales que afectan al Estado colombiano en la garantía de la seguridad y defensa nacional” (Baquero, 2022). Por su parte, Álvarez y Corredor presentan el espacio ultraterrestre como un ámbito crítico para la seguridad multidimensional del país (Álvarez & Corredor, 2019). Además, Ospina y Cabrera editaron en 2021 la *Estrategia de Seguridad Aérea y Espacial Nacional*, donde subrayan la relevancia de la seguridad en los dominios aéreo y espacial para la nación (Ospina & Cabrera, 2021).

Marco normativo y política pública

En el ámbito de las políticas públicas, la promulgación de la Ley 2302 del 12 de julio de 2023 por el Congreso de la República marcó un hito al establecer la primera legislación específica sobre aplicaciones espaciales en Colombia. De acuerdo con el Congreso de la República, el objetivo de esta ley es el siguiente:

Establece medidas para garantizar la defensa e integridad territorial en el ámbito espacial, en el marco general para el desarrollo de las actividades espaciales en Colombia, considerando el importante papel que el Estado debe tener en este campo para la promoción y desarrollo del sector espacial, así como en la ejecución de actividades en el espacio exterior, incluido la Luna y otros cuerpos celestes, en concordancia con la Constitución y los tratados internacionales ratificados en la materia, procurando que las mismas se desarrollen en condiciones que no constituyan un riesgo para la seguridad y defensa nacional, la operación aérea y espacial, y la soberanía nacional. (Art. 1. Ley 2302 del 12 de julio de 2023 por el Congreso de la República) .

En adición, desde el año 1969, se han expedido los siguientes documentos CONPES relacionados con este dominio (Consejo Nacional de Política Económica y Social, 2020).

- CONPES 239 (1969): *Garantía del Gobierno nacional a la financiación de la ITT Space Communications, Inc. a Telecom para la construcción de la estación terrestre para comunicaciones espaciales.*
- CONPES 1421 (1977): *Proyecto de un satélite colombiano para comunicaciones domésticas.*
- CONPES 3579 (2009): *Lineamientos para implementar el proyecto Satelital de Comunicaciones de Colombia.*
- CONPES 3613 (2010): *Complemento al CONPES 3579 del 25 de marzo de 2009 para el proyecto Satelital de Comunicaciones de Colombia.*
- CONPES 3683 (2010): *Lineamientos para la formulación del Programa Nacional de Observación de la Tierra.*
- CONPES 3983 (2020): *Política de desarrollo espacial: condiciones habilitantes para el impulso de la competitividad nacional.*

Todos los CONPES relacionados anteriormente reconocen que el entorno espacial es un medio para aumentar la competitividad del país, sin embargo, a la fecha no se cumplieron completamente sus objetivos. La Tabla 2 resume el estado de cada una de estas iniciativas. Como se puede observar, solo el CONPES 239 del año 1969 se cumplió en su totalidad, 04 CONPES (1421, 3579, 3613 y 3683) no se cumplieron y el 3983 del año 2020 se encuentra en proceso.

Tabla 2. Estado CONPES aplicaciones espaciales en Colombia

CONPES	AÑO	CUMPLIDO	NO CUMPLIDO	EN PROCESO
239	1969	X		
1421	1977		X	
3579	2009		X	
3613	2010		X	
3683	2010		X	
3983	2020			X

Fuente: Elaboración propia basado en (Consejo Nacional de Política Económica y Social, 2020).

Si bien Colombia ha tenido una experiencia limitada en el sector espacial, es importante destacar los esfuerzos nacionales realizados, como la creación de la **Comisión Colombiana del Espacio** en 2006 (Álvarez & Corredor, 2019), así como la adopción reciente del **CONPES 3983 de 2020** y la **estrategia para el Desarrollo Aéreo y Espacial de la Fuerza Aérea Colombiana 2042** (Fuerza Aérea Colombiana, 2020). Esta estrategia subraya, además de las condiciones habilitantes, las iniciativas para el desarrollo y la innovación en tecnologías satelitales de manera continua, lo que contribuye a una mayor competitividad del país en el ámbito satelital.

En línea con lo anterior, y en virtud de sus funciones y responsabilidades, la **Fuerza Aérea Colombiana** ha experimentado una transformación. Desde 2019, a través de la **Directiva Permanente 32**, se estableció el desarrollo espacial como objetivo estratégico y política institucional. En 2020, el dominio espacial fue incorporado en la misión y visión institucionales. La proyección espacial se incluyó dentro de la estrategia institucional hacia 2042. Además, la doctrina fue actualizada con el Anexo de Contrapoder Espacial en la quinta edición del **Manual de Doctrina Básica Aérea, Espacial y Ciberespacial** (DBAEC) (Fuerza Aérea Colombiana, 2020). En 2021, mediante la **Resolución No. 0192 FAC** del 3 de febrero, se creó la **Jefatura de Operaciones Espaciales**, dependiente del **Comando de Operaciones Aéreas y Espaciales**, y en 2022 se activó el **Centro de Operaciones Espaciales FAC - SpOC**, encargado de la planificación y ejecución de operaciones espaciales para la seguridad y defensa nacional (Fuerza Aérea Colombiana, 2023).

Finalmente, es relevante señalar que Colombia aún no dispone de sistemas ofensivos y defensivos de contrapoder espacial. Actualmente, solo tres misiones satelitales colombianas han orbitado la Tierra, utilizando satélites pequeños por iniciativa de instituciones nacionales. La primera misión tuvo lugar hace más de 10 años, en 2007, cuando el pico satélite **Libertad-1** fue puesto en órbita baja para realizar una misión

de sensoramiento remoto, con un tiempo de vida útil de 22 días (Portilla, 2012). La segunda misión corresponde al **nanosatélite FACSAT-1**, del programa espacial **FACSAT** de la Fuerza Aérea Colombiana (FAC), lanzado en noviembre de 2018. Este satélite sigue operativo en una órbita baja sincrónica con el sol y es operado desde la estación terrena ubicada en la **Escuela Militar de Aviación EMAVI** en Santiago de Cali. Está próximo a cumplir su tiempo de vida útil. La tercera misión es el **FACSAT-2**, también parte del programa espacial de la FAC, lanzado en abril de 2023. Este satélite se encuentra bajo control desde el **SpOC** en Santiago de Cali (Urbina, 2017; Rodríguez, Sofrony, Cortés, & Rueda, 2020; Fuerza Aérea Colombiana, 2023).

4. RECOMENDACIONES PARA COLOMBIA

Dado que la capacidad de monitorear el espacio, comunicarse de manera segura y recopilar datos en tiempo real es fundamental para la protección nacional en la actual revolución industrial, los satélites pequeños surgen como una innovación tecnológica clave. Ofrecen ventajas significativas en términos de costo, flexibilidad y agilidad. Colombia debe incorporar urgentemente esta tecnología en los siguientes campos:

Vigilancia y Reconocimiento: Uno de los usos más destacados de los satélites pequeños en la seguridad nacional es la vigilancia y el seguimiento de áreas críticas como el Catatumbo, el Cauca y la Guajira. Estos satélites pueden proporcionar imágenes de alta resolución y datos en tiempo real, vitales para la monitorización de fronteras, bases militares y zonas conflictivas. La capacidad de obtener información actualizada de manera constante es esencial para tomar decisiones informadas en situaciones de seguridad nacional (Baquero, 2022; Wallis & David, 2008).

Recomendación 1: Desarrollar y poner en órbita constelaciones de satélites pequeños dedicados a la vigilancia continua de zonas estratégicas. Esto garantizará una cobertura constante y permitirá realizar un seguimiento preciso de cualquier actividad sospechosa.

Inteligencia: La recopilación de inteligencia es otro aspecto clave. Los satélites pequeños permiten interceptar señales de comunicación, rastrear el movimiento de vehículos militares y supervisar actividades sospechosas. La capacidad de obtener información sin ser detectados es esencial para las operaciones de inteligencia, especialmente cuando se cuenta con datos en tiempo real (Barrero & Baquero, 2022; Belward & Skoien, 2015).

Recomendación 2: Invertir en tecnologías de inteligencia de señales y en el desarrollo de satélites pequeños altamente especializados para esta tarea, lo que aumentará la capacidad de obtener información crucial de manera discreta.

Comunicaciones Seguras: Las comunicaciones seguras son fundamentales para la seguridad nacional. Los satélites pequeños pueden servir como enlaces de comunicación seguros, garantizando que las transmisiones sean resistentes a la interferencia y el espionaje. Esto es esencial para la coordinación de operaciones militares y la transmisión de información confidencial (Chandrika, 2006).

Recomendación 3: Desarrollar satélites pequeños de comunicación con capacidades de encriptación avanzada. Estos satélites deben garantizar la integridad de las comunicaciones en cualquier situación, además de contar con sistemas de contrapoder espacial en el segmento terrestre que aseguren su efectividad.

Detección y Seguimiento de Amenazas: Los satélites pequeños son ideales para la detección temprana de amenazas y el seguimiento de movimientos militares. Pueden proporcionar datos en tiempo real sobre actividades sospechosas, permitiendo una respuesta rápida y eficiente. Esta capacidad es crucial para la defensa nacional (Woellert, Ehrenfreund, Ricco, & Hertzfeld, 2011).

Recomendación 4: Implementar sistemas de alerta temprana basados en satélites pequeños, diseñados para detectar amenazas potenciales y proporcionar información en tiempo real a las autoridades pertinentes.

Apoyo a Operaciones Militares: Los satélites pequeños también pueden brindar apoyo a las operaciones militares. Su agilidad y capacidad de reorientación los hacen ideales para proporcionar información en tiempo real a las fuerzas en el terreno. Pueden ayudar en la identificación de objetivos, navegación y coordinación de operaciones (Barrero & Baquero, 2022).

Recomendación 5: Integrar satélites pequeños y sistemas de contrapoder espacial ofensivo y defensivo en la planificación y ejecución de operaciones militares, lo que requerirá una coordinación efectiva entre las fuerzas terrestres y el personal operativo de los sistemas espaciales.

Fortalecimiento de la Disuasión: La presencia de satélites pequeños y sistemas de contrapoder espacial puede fortalecer la disuasión militar. El conocimiento de que una nación tiene la capacidad de monitorear y responder a cualquier amenaza potencial puede disuadir a los actores adversarios de llevar a cabo acciones agresivas (Burton, Thompson, Papa, & Wong, 2022).

Recomendación 6: Comunicar de manera efectiva la capacidad de utilizar satélites pequeños y sistemas de contrapoder espacial para la disuasión. Esto podría incluir políticas de transparencia en la utilización de tecnologías espaciales tanto ofensivas como defensivas.

Desafíos y Consideraciones Éticas: A pesar de las numerosas ventajas, los satélites pequeños también plantean desafíos y consideraciones éticas. Uno de los principales problemas es la basura espacial, que puede afectar tanto a los satélites pequeños como a los más grandes. Además, el uso de tecnología espacial en el ámbito militar plantea cuestiones éticas relacionadas con la privacidad y el uso de la fuerza (Moliner González, 2023).

Recomendación 7: Desarrollar políticas para gestionar la basura espacial y colaborar con otros países para reducir la proliferación de desechos en órbita. En cuanto a las cuestiones éticas, se deben establecer marcos legales y regulaciones que guíen el uso de satélites pequeños en operaciones militares.

Unidad de Acción: La preparación y articulación de las instituciones del Estado posibilitan el empleo de los recursos ante incidencias y la anticipación en situaciones de crisis. Un ejemplo de esto es el desarrollo del FACSAT-2, realizado en convenio con Ecopetrol y la FAC, que permite soluciones transversales para ambas instituciones (Álvarez & Corredor, El Espacio Exterior: Una Oportunidad Infinita para Colombia, 2019; Fuerza Aérea Colombiana, 2020).

Recomendación 8: Articular las instituciones que requieran servicios satelitales para capitalizar los esfuerzos, evitando realizar grandes inversiones de manera independiente, lo que permite el uso eficiente y multipropósito de los recursos y facilita el intercambio de información.

Preparación del Capital Humano: El personal capacitado y entrenado en sistemas espaciales es fundamental. La ventaja de este campo es que todas las áreas del conocimiento son importantes, lo que reduce la dependencia de otros países y permite respuestas más oportunas y autónomas a las necesidades internas.

Recomendación 9: Fomentar una cultura espacial en el país desde temprana edad, creando una atmósfera natural para el desarrollo e innovación aeroespacial. Para ello, es necesario crear programas académicos públicos y privados que faciliten la capacitación y formación de competencias que nutran la base industrial del sector.

Protección de la Tecnología Aeroespacial: La protección de la tecnología aeroespacial es una prioridad, ya que se utiliza recurrentemente en la cotidianidad. Estos servicios pueden verse amenazados por múltiples factores, como ataques malintencionados, condiciones meteorológicas adversas, amenazas cibernéticas o conflictos armados (Burton, Thompson, Papa, & Wong, 2022).

Recomendación 10: Fortalecer los sistemas de seguridad aeroespacial, dado que este sector incluye servicios clave como comunicaciones, sistemas de navegación y meteorológicos, entre otros, que requieren protección contra diversas amenazas.

5. CONCLUSIONES

Independientemente del nivel de desarrollo, son muchos los países en los que las organizaciones educativas, comerciales y militares logran liderar acciones que impulsan el desarrollo tecnológico en el ámbito espacial. El uso y explotación de este dominio a través de los satélites pequeños para uso dual (militar y comercial) y el desarrollo de sistemas de contrapoder espacial son una tendencia en un planeta interconectado y dependiente de esta tecnología. Por lo tanto, los usos militares y comerciales de estos activos serán vitales para los intereses nacionales a medida que proliferan las capacidades espaciales en todo el mundo.

A nivel internacional, los países miembros de la Unión Europea y los pertenecientes a la Organización del Tratado del Atlántico Norte han implementado políticas espaciales nacionales, reconociendo el dominio espacial como un ámbito dinámico y en rápida evolución, esencial para la disuasión y defensa de las naciones. Alcanzar la superioridad espacial es crucial, ya que garantiza el uso libre de las capacidades espaciales, su protección y la negación del uso del espacio por parte del enemigo.

En el ámbito nacional, se puede inferir que Colombia históricamente se ha mantenido desconectada de la importancia y necesidad de la tecnología espacial propia, que permita la independencia y soberanía, evitando la vulnerabilidad, particularmente en las actividades de seguridad y defensa nacional. Desde 1969 se han expedido seis documentos del Consejo Nacional de Política Económica y Social (CONPES), reconociendo que el entorno espacial es un medio para aumentar la competitividad del país; sin embargo, no se cumplieron completamente sus objetivos. Por su parte, en la última década, la Fuerza Aérea Colombiana (FAC) ha logrado transformarse con su proyección espacial, a través de objetivos estratégicos, su política institucional y la formulación de estrategias para el desarrollo en este ámbito. La FAC está a cargo del comando y control de los únicos activos espaciales nacionales en órbita e impulsando la gobernanza, que recientemente se materializó con la ley 2302 del 12 de julio de 2023. Por primera vez en el país, esta ley promulgó un marco legal específico sobre las aplicaciones espaciales nacionales y su importancia para garantizar la defensa y la integridad territorial.

En consecuencia, tomando como referencia el uso y explotación de los satélites pequeños tanto a nivel internacional como nacional, y con el fin de comprender los desafíos, riesgos y oportunidades que esto implica, se puede inferir que, para Colombia, este tipo de aplicaciones espaciales ofrece ventajas significativas en términos de costo, flexibilidad y agilidad en los siguientes diez campos recomendados para la seguridad y defensa de la nación: Vigilancia y Reconocimiento, Inteligencia, Comunicaciones Seguras, Detección y Seguimiento de Amenazas, Apoyo a Operaciones Militares, Fortalecimiento de la Disuasión, Desafíos y Consideraciones Éticas, Unidad de Acción, Preparación del Capital Humano y Protección de la Tecnología Aeroespacial.

6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- EIA632A. (2021). *Processes for Engineering a System*. Information Report, SAE International. doi:<https://doi.org/10.4271/EIA632A>
- AEM. (2016). *Mejores prácticas para el diseño de Cubesats*. Foro, Secretaría de Comunicaciones y Transportes -SCT, Agencia Espacial Mexicana -AEM, Jalisco 2016. Recuperado el 12 de Julio de 2021, de <https://docplayer.es/77363921-Mejores-practicas-para-el-diseno-de-cubesats.html>
- AEM. (2019). *Secretaría de comunicación y transportes*. Obtenido de http://www.educacionespacial.aem.gob.mx/images/normateca/pdf/CURSO_ISE/Modulo_3.pdf
- Agencia Espacial Europea. (31 de Marzo de 2022). *ESA*. Obtenido de CubeSats: https://www.esa.int/Enabling_Support/Preparing_for_the_Future/Discovery_and_Preparation/CubeSats
- Álvarez, C., & Corredor, C. (2019). *El Espacio Exterior: Una Oportunidad Infinita para Colombia*. Bogotá: Sello editorial Escuela Superior de Guerra.
- Álvarez, C., Corredor, C., Quiroga, R., & Molano, Á. (2019). Programa Espacial Colombiano. En C. Álvarez, & C. Corredor (Edits.), *El Espacio Exterior: Una Oportunidad Infinita para Colombia* (Vol. 2, págs. 265-291). Bogotá: Escuela Superior de Guerra "General Rafael Reyes Prieto".
- Álvarez, C., Murillo, S., Hernández, J., & Urbina, J. (2019). El Poder Espacial y la Seguridad Multidimensional. En C. Álvarez, & C. Corredor (Edits.), *El Espacio Exterior: Una Oportunidad Infinita para Colombia* (págs. 19-82).

- Bogotá: Escuela Superior de Guerra “General Rafael Reyes Prieto” y Fuerza Aérea Colombiana.
- Baquero, F. (2022). *PODER AÉREO, ESPACIAL Y CIBERESPACIAL frente a desafíos y amenazas multidimensionales que afectan al Estado colombiano*. Bogotá: Sello Editorial Escuela Superior de Guerra.
- Barrero, D., & Baquero, F. (2022). Operaciones Espaciales de Colombia: enfoque en seguridad y desarrollo. En J. H. (ed), *Visión Aeroespacial Colombiana* (págs. 43-70). Bogotá: Sello Editorial Escuela Superior de Guerra.
- Barrero, D., Baquero, F., & Gaitán, A. (2018). La Seguridad Multidimensional y el Poder Aéreo: doctrinas de la OEA y Fuerza Aérea para fortalecer el desarrollo de la seguridad y la defensa. ¿Cuál es el nuevo panorama de Colombia? *Ciencia Y Poder Aéreo*, 13(1), 72-81. doi:<https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaereo.587>
- Becerra, J. (2014). Colombias space policy: An analysis of six years of progress and challenges. *Acta Astronáutica*, 100(1), 94-100.
- Belward, A. S., & Skoien, J. O. (2015). Who launched what, when and why; trends in global land-cover observation capacity from civilian earth observation satellites. *ISPRS. Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*(103), 115-128.
- Board, S. S., & Council, N. R. (2014). *Landsat and Beyond: Sustaining and Enhancing the Nation's Land Imaging Program*. National Academies Press.
- Bolaño-Ortiz, T. P.-F.-N. (2019). Assessment of absorbing aerosols on austral spring snow albedo reduction by several basins in the Central Andes of Chile from daily satellite observations (2000–2016) and a case study with the WRF-Chem model. *SN Applied Sciences*, 13. doi:<https://doi.org/10.1007/s42452-019-1256-z>
- Burton, J., Thompson, D., Papa, A., & Wong, A. (2022). *INTERNATIONAL SPACE COLLABORATION AND SECURITY*. Brussels, Belgium: A JOURNAL OF STRATEGIC AIRPOWER & SPACEPOWER.
- Campbell, J., Wynne, R., & Thomas, V. (2011). *Introduction to remote sensing*. Guilford Press.
- Camps, A. (2019). *Nanosatellites and Applications to Commercial and Scientific Missions*. IntechOpen.
- Capderou, M. (2014). *Handbook of Satellite Orbits*. Pasadena, California: Springer.
- Cappelletti, C., Battistini, S., & Malphrus, B. K. (2021). *Cubesat Handbook from mission desing to operations*. London: Elsevier. Recuperado el 23 de Julio de 2021, de <https://www.elsevier.com/books-and-journals>
- Center Langley Research, N. (2021). *S'COOL: Satélites observando la tierra*. Obtenido de <https://scool.larc.nasa.gov/Spanish/sats-sp.html>.
- Chandrika, N. (2006). *MILITARY USES OF SPACE*. London: The Parliamentary Office of Science and Technology.
- China National Space Administration. (2018). China National Space Administration. Obtenido de <http://www.cnsa.gov.cn/english/n6465652/index.html>
- Clemente, J. (2016). *Sistemas de iluminación de altas prestaciones aplicados a bienes de Universidad Complutense de Madrid*. Madrid, España: Facultad de óptica y optometría.
- CMMI Product Team. (2002). *Capability Maturity Model*. Integration (CMMI), Version 1.1. , Carnegie Mellon University, Software Engineering Institute.
- Congreso de la República de Colombia. (2023). *Ley 2302 de 2023 Congreso de la República*. Bogotá D.C.
- Consejo Nacional de Política Económica y Social. (2020). *POLÍTICA DE DESARROLLO ESPACIAL: CONDICIONES HABILITANTES PARA EL IMPULSO DE LA COMPETITIVIDAD NACIONAL*. Bogotá D.C.: CONPES.

- Córdoba, J., & Gago, C. (2012). Globalización, movilidad y el análisis de conectividad aérea: una herramienta para la práctica interdisciplinar. *Revista de Antropología Social*, 111-315.
- Cortés, L. (2014). Historia espacial: Recuento histórico de su evaluación y desarrollo [en línea]. *Revista de Derecho, Comunicaciones y Nuevas Tecnologías*(12). doi:<http://dx.doi.org/10.15425/redecom.12.2014.05>
- Council of Managers of National Antarctic Programs, C. (2017). *Antarctic Station Catalogue*. Christchurch, New Zealand: COMNAP and contributors.
- Dallamuta, J. P., & Rocha de Oliveira, M. (2023). Space missions in South America: Profile and evolutionary perspective of their development. *Acta Astronautica*, 9-17. doi:<https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2023.02.008>
- Defense Intelligence Agency. (2022). *CHALLENGES TO SECURITY IN SPACE*.
- Departamento de Seguridad Nacional, Presidencia de Gobierno de España. (2019). *Estrategia de Seguridad Aeroespacial Nacional*. Catálogo de Publicaciones de la Administración General de Estado.
- Dirección de Ciencia y Tecnología FAC. (2020). Anexo A. Información Cuantificable del Problema. Colombia: Fuerza Aérea Colombiana.
- Doran, T. (15 de MAY de 2006). IEEE 220: for practical systems engineering. *Computer*, 39(5), 92-94. doi:[doi:10.1109/MC.2006.164](https://doi.org/10.1109/MC.2006.164)
- Duarte Muñoz, C. (02 de Abril de 2018). *Hacia el Espacio*. Recuperado el 22 de Agosto de 2021, de <http://haciaelespacio.aem.gob.mx/revistadigital/articul.php?interior=780>
- EATC. (2024). *Fact Sheet*. EATC 2024.
- ECSS. (2017). *Ingeniería Espacial - Requerimientos generales de Sistemas de ingeniería*. Noordwijk, Holanda: ESA Requirements and Standards Division. doi:<https://ecss.nl/standard/ecss-e-st-10c-system-engineering-general-requirements/>
- EIA632A. (2021). *Processes for Engineering a System*. Information Report, SAE International. doi:<https://doi.org/10.4271/EIA632A>
- Elm, J. P., Goldenson, D. R., El Emam, K., Donatelli, N., & Neisa, A. (2008). *A Survey of Systems Engineering Effectiveness - Initial Results (with detailed survey response data)*. SPECIAL REPORT CMU/SEI-2008-SR-034, Software Engineering Institute -SEI; National Defense Industrial Association - NDIA;) Systems Engineering Effectiveness Committee (SEEC) , National Defense Industrial Association. Obtenido de <http://www.sei.cmu.edu/>
- EO Sharing Earth Observation Resources. (18 de 06 de 2023). *EO Portal Directory*. Recuperado el 31 de 03 de 2020, de <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions>
- ESA, E. S. (01 de 07 de 2024). *European Space Agency, eduspace*. Obtenido de https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_ES/SEMO1U3FEXF_o.html
- ESA, ECSS-E-ST-10C. (2009). *SESS - Systems Engineering Standards And Specifications*. Norma, ECSS, Requirements & Standards Division, Noordwijk, The Netherlands. Obtenido de <http://everyspec.com/ESA/download.php?spec=ECSS-E-ST-10C.047801.pdf>
- ESA, TEC-SY/128/2013/SPD/RW. (2016). *Tailored ECSS Engineering Standards for In-Orbit. Demonstration CubeSat Projects*. ESA. TEB. Obtenido de https://copernicus-masters.com/wp-content/uploads/2017/03/IOD_CubeSat_ECSS_Eng_Tailoring_Iss1_Rev3.pdf
- Escuela Superior de Guerra “Rafael Reyes Prieto”, & Fuerza Aeroespacial de Colombia. (2019). *Volumen 2. El Espacio Exterior: Una Oportunidad Infinita para Colombia. El Cielo no es el Límite: El Futuro Estelar de Colombia*. Bogotá: Escuela Superior de Guerra “General Rafael Reyes Prieto” y Fuerza Aérea Colombiana.

- Escuela Superior de Guerra, & Fuerza Aeroespacial de Colombia. (2019). *El Espacio Exterior: Una Oportunidad Infinita Para Colombia*. Escuela Superior de Guerra “General Rafael Reyes Prieto” y Fuerza Aérea Colombiana.
- Espíndola, J. M. (2011). *Assembly and Deployment of a Ground Station for Tracking Low Earth Orbit Satellites*. II encuentro internacional y VI Nacional de Investigación en Ingeniería de Sistemas e Informática-EIISI 2011.
- Estrada, C. (21 de marzo de 2023). Se calcula que más de 80% del oro que exporta Colombia proviene del mercado ilegal [en línea]. *La República*. Obtenido de <https://www.larepublica.co/economia/se-calcula-que-mas-de-80-del-oro-que-exporta-colombia-proviene-del-mercado-ilegal-3572072>
- European Space Agency. (2019). Our activities. Obtenido de https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Transportation/Our_activities
- European Space Agency. (18 de 06 de 2023). *CEOS DATABASE*. Recuperado el 11 de 04 de 2020, de <http://database.eohandbook.com/>
- Firesmith, D. (2009). The Method-Framework for Engineering System Architectures (MFESA). In *System and Software Technology Conference (SSTC)*, 1, pág. 153. Pittsburgh, Pensilvania. Obtenido de https://resources.sei.cmu.edu/asset_files/Presentation/2009_017_001_23622.pdf
- Flemes, D. (2012). Actores estatales y regionalismo estratégico: Brasil y Colombia en el orden multipolar. En E. Pastrana, S. Jost, & D. Flemes, *Colombia y Brasil: ¿socios estratégicos en la construcción de Sudamérica?* (págs. 25-48). Bogotá D.C.: Pontificia Universidad Javeriana.
- Fuerza Aérea Colombiana. (2020). *Estrategia para el Desarrollo Aéreo y Espacial de la FAC*. Bogotá: Oficina de Doctrina FAC.
- Fuerza Aérea Colombiana. (2020). *Doctrina Básica Aérea, Espacial y Ciberespacial - DBAEC*. Bogotá: Oficina de Doctrina de la FAC.
- Fuerza Aérea Colombiana. (30 de 12 de 2020). *Estrategia para el Desarrollo Aéreo y Espacial Fuerza Aérea Colombiana 2042*. Obtenido de <https://www.fac.mil.co/edaesfac2042>
- Fuerza Aérea Colombiana. (2020). *Manual de Confiabilidad Aeronáutica-MACOA-*. Bogotá D.C.: Fuerzas Militares República de Colombia.
- Fuerza Aérea Colombiana. (2020). *Manual de Doctrina Básica, Aérea, Espacial y Ciberespacial*. Bogotá: FAC.
- Fuerza Aérea Colombiana. (2021). *FACSAT-1 Dos años en el espacio al servicio del país*. Obtenido de <https://www.fac.mil.co/es/estamos-en-el-espacio>
- Fuerza Aérea Colombiana. (2022). Blanco: Afectación Recursos Naturales y Medio Ambiente. Bogotá, Colombia: FAC.
- Fuerza Aérea Colombiana. (2023). *Tamaño de Fuerza*. Bogotá D.C.
- Fuerza Aérea Colombiana. (2024). *Ficha Técnica SAT - “Chiribiquete”*. Bogotá, Colombia.
- Fuerza Aérea Colombiana. (08 de 06 de 2023). *Fuerza Aérea Colombiana*. Obtenido de <https://www.fac.mil.co/es/node/49725>
- Fuerza Aérea Colombiana. (12 de 06 de 2023). *Poder Espacial FAC*. Obtenido de <https://poderespacial.fac.mil.co/jefatura-de-operaciones-espaciales>.
- Funes, M. (2017). *El Transporte Aéreo Estratégico como una necesidad del Nivel Operacional para el siglo XXI*. Buenos Aires: Escuela Superior de Guerra Conjunta de las Fuerzas Armadas.
- Garzón , G. (2021). Implementación de la Prueba de Vibración Aleatoria para Estructuras a Escala de Micro satélites con base en el Estandar General de Verificación de la NASA. *Tesis de grado para optar al título de Magíster en Ingeniería*. Universidad del Valle.

- Giroux, H. (1997). .La pedagogía de frontera y la política del postmodernismo. *Revista Intrínsecos*(6), 96.
- Greenland, S., & Clark, C. (2010). Cubesatplatformsasanon-orbit. *European Small Satellite Service Symposium*. 2010.
- Grest, H. (2022). *National Military Space Operations Centres - Requirements on National Centres with Respect to NATO Needs*. Kalkar Germany: Joint Air Power Competence Centre.
- Harvey, B., Smid, H., & Pirard, T. (2010). Emerging Space Powers: The New Space Programs of Asia, the Middle East and South-America. Springer.
- Hernández Sampieri, R., Fernández, C., & Baptista, M. (2014). *Metodología de la Investigación* (Sexta Edición ed.). México D.F., México: McGrawHill Education.
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la Investigación*. México: Mc Graw Hill.
- Herrera, J. F. (2011). Identification of priority themes in management of technology. In *20th International Conference For The International Association Of Management Of Technology Iamot*. Miami: North South Center University Of Miami.
- IEEE P1220. (1994). *Standard for system engineering-a commercial standard for improving competitiveness*. Norma, IEEE, Fort Worth, TX, USA. doi:https://doi.org/10.1109/DASC.1993.283580
- INACH. (01 de 07 de 2024). *Instituto Antártico Chileno, Ministerio de Relaciones Exteriores Gobierno de Chile*. Obtenido de https://www.inach.cl/expedicion-antartica/bases-chilenas-en-antartica-2/base-bernardo-ohiggins/
- INCOSE. (30 de julio de 2015). *Introduction To Model-Based System Engineering (MBSE) and SysML*. doi:https://www.incose.org/docs/default-source/delaware-valley/mbse-overview-incose-30-july-2015.pdf
- INCOSE. (2015). *Systems Engineering Handbook* (Cuarta ed.). (D. Walden, G. Roelder, K. Forsberg, D. Hamelin, & T. Shortell, Edits.) San Diego, California, EEUU: Wiley. Obtenido de https://img1.wsimg.com/blobby/go/a430a7ae-a333-4c88-af76-fd5624bfbddd/downloads/INCOSE%20Systems%20Engineering%20Handbook%204e%202015%2007.pdf?ver=1604878104477
- International Telecommunication Union. (2021). *Radio Regulations*. Obtenido de https://www.itu.int/pub/R-REG-RR
- INTERPOL. (28 de abril de 2022). *Los efectos devastadores de la extracción ilegal de oro en América Latina*. Obtenido de https://www.interpol.int/es/Noticias-y-acontecimientos/Noticias/2022/Los-efectos-devastadores-de-la-extraccion-ilegal-de-oro-en-America-Latina#:~:text=La%20extracci%C3%B3n%20ilegal%20de%20oro%20destruye%20el%20medio%20ambiente%2C%20provocando,liberaci%C3%
- IPCC, I. P. (2012). *Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC)*. Obtenido de https://archive.ipcc.ch/home_languages_main_spanish.shtml
- JAXA. (2013). *Research on the technology of space systems*. Documento informativo, Japan Aerospace Exploration Agency -JAXA. Obtenido de https://www.kenkai.jaxa.jp/eng/research/system/system.html
- Jimenez R, R. S. (2019). FACSAT-1 Ground Station Performance. *Instituto de Astrofísica de Canarias - IAC-19-F1.2.3*, 21-25.
- Juárez, F. (2016). La minería ilegal en Colombia: un conflicto de narrativas [en línea]. *El Ágora USB*, 16(1), 135-146. Obtenido de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1657-80312016000100007&lng=en&tlng=es

- Khlystov, N. (2023). *Space Industry Debris Mitigation Recommendations*. World Economic Forum.
- King, J. T., Kolbeck, J., Kang, J. S., Sanders, M., & Keidar, M. (2021). Performance analysis of nano-sat scale μ CAT electric propulsion for 3U CubeSat attitude control. (E. Ltda, Ed.) *Acta Astronautica*, 178, 722-732. doi:<https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.10.006>
- Kotter, J. P. (2007). *Que Hacen Los Lideres*. (G. Planeta, Ed.)
- Krebs, G. (2024). "FACSAT 2 (Chibiriquete)". *Gunter's Space Page*. Obtenido de https://space.skyrocket.de/doc_sdat/facsat-2.htm
- Lilo, J. (2020). *Impactos de la minería en el medio natural*. Obtenido de <https://www.ucm.es/data/cont/media/www/pag-15564/Impactos%20de%20la%20miner%C3%ADa%20-%20Javier%20Lillo.pdf>
- López, L. (2010). La seguridad aeroespacial en América del Norte. *Norteamérica [online]*, 5(1), 173-219. Obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-35502010000100007&lng=es&tlng=es.
- Margalef, L., & Arenas, A. (2006). ¿Qué entendemos por innovación Educativa? A proposito del desarrollo curricular. *Perpectiva Educacional*, 1(47), 13-31.
- Masson-Delmotte, V. P. (2021). *Summary for Policymakers*. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University: IPCC.
- Mesa, L. R. (2019). Sistema de monitoreo de señales en tierra usando la Estación Terrena Satelital UPTC. *Articulos científicos, INGE CUC*.
- Minenergía, & UNODC. (Junio de 2023). Informe EVOA 2022. Bogotá, Colombia.
- Minenergía, Embajada de Estados Unidos, & UNODC. (2020). Colombia. Explitación de orro de aluvi3n. Evidencias a partir de percepci3n remota 2019. Bogotá, Colombia.
- Moliner González, J. A. (2023). Dimensi3n 3tica y moral de posibles conflictos militares en el espacio exterior. *Revista Iberoamericana de Filosofía, Política, Humanidades y Relaciones Internacionales*, 25(53), 335-356. doi:<https://dx.doi.org/10.12795/araucaria.2023.i53.13>
- Nanosats. (11 de 06 de 2023). *Nanosats Data Base*. Recuperado el 10 de 04 de 2020, de <https://www.nanosats.eu/>
- NASA. (2007). *Systems Engineering Handbook*. Washington, D.C., Estados Unidos: National Aeronautics and Space Administration. doi:https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/nasa_systems_engineering_handbook.pdf
- NASA. (2014). *What Is a Satellite?* Obtenido de <https://www.nasa.gov/audience/forstudents/5-8/features/>
- NASA. (12 de Diciembre de 2019). *Nasa*. Recuperado el 30 de Agosto de 2021, de https://www.nasa.gov/seh/2-1_technical-processes
- NASA. (2020). About NASA. Obtenido de <https://www.nasa.gov/about/index.html>
- Navarro, E., Jiménez, E., Rappoport, S., & Thoilliez, B. (2017). *Fundamentos de la investigaci3n y la innovaci3n educativa*. Universidad Internacional de la Rioja. Obtenido de https://www.unir.net/wp-content/uploads/2017/04/Investigacion_innovacion.pdf
- Navarro, V. M. (2011). European Air Transport Command: ¿ hacia unas Fuerzas Armadas europeas ? *Documento de opinion del IEEE No.14/2011*, 2-4.
- Oficina de Informaci3n científica y tecnológica para el Congreso de la Uni3n. (Marzo de 2023). Sat3lites Pequeños. (038). Ciudad de Mexico. Obtenido de https://foroconsultivo.org.mx/INCyTU/documentos/Completa/INCYTU_20-038.pdf

- Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito - UNODC. (11 de noviembre de 2023). *Colombia: Explotación de Oro de Aluvión EVOA 2022*. Obtenido de https://www.unodc.org/documents/colombia/2023/noviembre-11/Resumen_Ejecutivo_EVOA_2022.pdf
- Ortega, G. (14 de Octubre de 2009). <https://www.gr.ssr.upm.es/>. Recuperado el 22 de Agosto de 2021, de Grupo de Radiación: https://www.gr.ssr.upm.es/docencia/grado/csat/picosatelites/LN11_Sesion2_Analysis_of_Space_Missions_GOrtega.pdf
- Ospina, L., & Cabrera, F. (2021). *Estrategia de Seguridad Aérea y Espacial Nacional*. Bogotá: Escuela Superior de Guerra "General Rafael Reyes Prieto" - ESDEG.
- Planeación, D. N. (2023). *Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026*. Bogotá: Imprenta Nacional de Colombia.
- Planton, S. S.-K. (2013). *Cambio Climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América.: IPCC.
- Portilla, J. (2012). LA ÓRBITA DEL SATÉLITE LIBERTAD 1. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 36(141), 491-500.
- Quiroga, R., Gutiérrez, N., Núñez, J., & Rico, Y. (2019). La Fuerza Aérea Colombiana y la Evolución del Pensamiento Estratégico del Poder Espacial. En C. Álvarez, & C. Corredor (Edits.), *Volumen 2. El Espacio Exterior: Una Oportunidad Infinita para Colombia. El Cielo no es el Límite: El Futuro Estelar de Colombia* (págs. 19-52). Bogotá: El Cielo no es el Límite: El Futuro Estelar de Colombia.
- Rendón, O. (04 de octubre de 2022). *Datos y tecnología para saber trazabilidad del oro*. Obtenido de <https://www.elcolombiano.com/negocios/datos-y-tecnologia-para-saber-trazabilidad-del-oro-DJ18774564>
- Restrepo, J. (2019). Extracción ilegal o el dinero por sobre todas las formas de vida [en línea]. *Elmundo.com*, 17, mayo. Obtenido de <https://www.elmundo.com/noticia/Extraccion-ilegal-o-el-dinero-por-sobre-todas-las-formas-de-vida/376594>
- Rincón U, S. R., Bastidas B, E. J., & Rodriguez A, C. A. (2023). *Factibilidad del desarrollo del FACSAT-2* (Vol. I). Cali, Valle del Cauca, Colombia: FAC.
- Rincón, S., Cárdenas, J., Pirazán, K., Acero, I., Hurtado, R., & Cortés, D. (2023). Critical Design of the FACSAT-2 mission CubeSat for the observation and analysis of the Colombian Territory. *Revista UIS Ingenierias*, 22(3), 69-86. Obtenido de <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistausingenierias>
- Rincón, S., Cárdenas, J., Virginia, H., & Pirazan, K. (2022). *Simposio de la IAA sobre misiones de pequeños satélites*. Congreso Astronáutico Internacional 2022.
- Rincón-Urbina, S. R., Cardenas-García, J. M., Pirazán-Villanueva, K. N., Acero-Niño, I. F., Hurtado-Velasco, R. H., & Cortés-García, E. D. (2023). Diseño crítico del nanosatélite de la misión FACSAT-2 para la observación y análisis del territorio Colombiano. *RUI*, 22(3), 68-86.
- Robledo Asencio, J. C., Rincón Urbina, S. R., Cardenas Garcia, J. M., Mendez Gomez, J. E., & Salek Chaves, D. Z. (2023). System Engineering Approach for the Implementation Project of the Colombian Aerospace Force's (FAC) Assembly, Integration, and Testing (AIT) Laboratory. *14° WETE Workshop em Engenharia e Tecnologia Espaciais*, (págs. 1-10). Brasil.
- Rodriguez A., C. A. (2019). *Implementación de una estrategia sistémica de los proyectos del programa espacial de la FAC*. Propuesta Postdoctoral, Centro de investigación en Estudios Aeroespaciales -CITAE, I+D+i, Cali.

- Rodríguez, G., Sofrony, J., Cortés, E., & Rueda, K. (2020). *Diseño de misión, síntesis de factores operacionales y representaciones del segmento espacial, caso facsat y emff*. Bogotá DC: Revista Ciencia y Poder Aéreo.
- Rodríguez-Pirateque, G. W., Sofrony E., J., Cortés G., E. D., & Rueda, K. (19 de Septiembre de 2020). Diseño de misión, síntesis de factores operacionales y representaciones del segmento espacial, caso FACSAT y EMFF. *Ciencia y Poder Aéreo*, 15(2), 143-165. doi:<https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaereo.678>
- Rojas, A. (09 de septiembre de 2023). *Con tecnología geoespacial se puede controlar la minería ilegal en Colombia*. Obtenido de <https://www.las2orillas.co/con-tecnologia-geoespacial-se-puede-controlar-la-mineria-ilegal-en-colombia/>
- Roscosmos. (2022). State Corporation for Space Activities ROSCOSMOS. Obtenido de <https://www.roscosmos.ru/29189/>
- 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.
- Salazar, A. N. (2018). *Manual de operación de estación terrena: centro de control y Monitoreo “Rodrigo Noguera Laborde”* (pág 16). Bogotá: Fondo de publicaciones de la Universidad Sergio Arboleda.
- Santé, J. M. (2017). La doctrina aeroespacial y la estrategia de seguridad aeroespacial. *Cuadernos de estrategia*(192), 105-146. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/6268236.pdf>
- Sarafin, T. P., Doukas, P. G., McCandless, J. R., & Britton, W. R. (2007). Structures and Mechanisms. En J. R. Wertz, & W. J. Larson, *Space Mission Analysis and Design* (págs. 459–518).
- Sellers, J. J. (2007). *Understanding space: an introduction to astronautics* (Tercera ed.). (D. Kirkpatrick, Ed.) New York, New York, EEUU: McGraw-Hill.
- Sellers, J., Astore, W., Grifen, R., Larson, W., Kirkpatrick, D., Shute, A., . . . Tostanoski, M. (2015). *Understanding space: An introduction to astronautics*. McGraw-Hill Companies.
- Selva, D., & Krejci, D. (2012). A survey and assessment of the capabilities of Cubesats for Earth observation. *Acta Astronautica*, 74, 50–68. doi:<https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2011.12.014>
- Selva, D., & Krejcl, D. (2012). *A survey and assessment of the capabilities of Cubesats for Earth observation*. Cambridge, MA: ELSEVIER. Acta Astronautica.
- Sheard, S. A. (2000). Three Types of Systems Engineering Implementation. *Proceedings of the Tenth International Symposium of the International Council on Systems Engineering* (pág. 9). Minneapolis: INCOSE International Symposium. Obtenido de All three types. Figure 1 shows how the three types
- Shiotani, B. (2018). *Project life-cycle and implementation for a class of small satellites*. Florida, Estados Unidos: University of Florida. Recuperado el 31 de Agosto de 2021, de https://s3vi.ndc.nasa.gov/ssri-kb/static/resources/SHIOTANI_B.pdf
- Silva, C. F., Corredor, C., & Álvarez, C. (2019). Análisis de la Política Espacial Colombiana: Una perspectiva de defensa y seguridad. En Escuela Superior de Guerra “Rafael Reyes Prieto”, & Fuerza Aérea Colombiana, *El Espacio Exterior Volumen 2* (págs. 53-82). Escuela Superior de Guerra y Fuerza Aérea Colombiana.
- Silva, C., Corredor, C., & Álvarez, C. (2019). Capítulo VIII. Análisis de la política espacial colombiana: una perspectiva de defensa y seguridad. En *El espacio exterior: Una oportunidad infinita para Colombia* (Vol. 2, págs. 53-82). Bogotá, Colombia: Escuela Superior de Guerra “General Rafael Reyes Prieto”.

- Slavin, R. (2002). *Aprendizaje cooperativo: Teoría, investigación y práctica*. AIQUE.
- STARLINK. (2024). *STARLINK*. Obtenido de <https://www.starlink.com/roam>
- Tahseen HU, Y. L. (2021). X. Design of FSS-antenna-radome system for airborne. *IET Communications*, 9. doi:DOI: 10.1049/cmu2.12181
- THOT, T. (2018). *ARGUS 2000 IR spectrometer kit*. Canada: Owner's Manual.
- Torrijos, V., & Carvajal, A. (2014). Geopolítica sistémica aplicada: un modelo para entender las dinámicas cambiantes del sistema internacional. *Revista Científica General José María Córdova*, 35-56.
- Tubio Pardavila, R. (2012). *Ingeniería de Sistemas basada en Estándares ECSS aplicada al diseño, fabricación, integración, validación y operación de pico, nano y microsátélites. Aplicación a la Constelación HUMSAT*. Vigo, España: Universidad de Vigo. doi:<https://core.ac.uk/download/pdf/54205042.pdf>
- United States Air Force. (Julio de 2019). *Air Mobility Operations*. Montgomery: Curtis E. Lemay Center. Obtenido de <https://www.af.mil/About-Us/Fact-Sheets/Display/Article/104566/air-mobility-command/>
- Universidad del Rosario. (05 de diciembre de 2022). *URosario lanza plataforma creada con el apoyo de Google.org para monitorear minería a cielo abierto usando imágenes satelitales y machine learning*. Obtenido de <https://urosario.edu.co/periodico-nova-et-vetera/urosario-lanza-plataforma-creada-con-google-org-para-monitorear-mineria-a-cielo-abierto>
- UNODC. (julio de 2021). Colombia. Explotación de oro de aluvión. Evidencias a partir de percepción remota 2020. Colombia.
- Urbina, J. (2017). El espacio, futuro de la Fuerza Aérea Colombiana. *Ciencia y Poder Aéreo*, 12, 202-208.
- USAF. (27 de 06 de 2024). *Air Mobility Command*. Obtenido de <https://www.amc.af.mil/>
- Vergara-Escobar, F. P. (2021). Corpolaridades: cuerpos producidos en una cuidadosa Antártica. *Revista Latinoamericana de Estudios sobre Cuerpos, Emociones y Sociedad*, 24. Obtenido de Www.relaces.com.ar
- Wallis, S., & David, F. (2008). *Space Observations: An Australian Perspective*. Commonwealth of Australia.
- Wasson, C. S. (2012). *Formulation and Development of the Wasson System Engineering Process Model*. ASEE Southeast Section Conferen.
- Wertz, J. R., & Larson, W. J. (2007). *Space Misión Analysis and Design*. El segundo, California, Estados Unidos: Space Technology Library. Recuperado el 30 de Agosto de 2023
- Wickramatunga, R. (2023). *United Nations Office for Outer Space Affairs*. Obtenido de The outer space treaty: <https://www.unoosa.org/oosa/en/ourwork/spacelaw/treaties/introouterspacetreaty.html>
- Woellert, K., Ehrenfreund, P., Ricco, A., & Hertzfeld, H. (2011). Cubesats: cost-effective science and technology platforms for emerging and developing nations. *Adv. Space.Res.*, 47(4), 663–684.
- Ziarnick, B. (2005). The Militarization and Weaponization of Space. *Air & Space Power Journal*, 19(2), 103. doi:<https://link.gale.com/apps/doc/A135843283/AONE?u=anon~2593f224&sid=googleScholar&xid=497dcc9e>

CAPÍTULO 8.

TRANSPORTE AÉREO ESTRATÉGICO MILITAR Y SUS IMPACTOS A LA SEGURIDAD Y DEFENSA NACIONAL

Mayor Alan Ricardo Calderón Cortés

Fuerza Aeroespacial Colombiana (FAC)

<https://orcid.org/0009-0008-5825-7251>

alan.calderonc@fac.mil.co

1. INTRODUCCIÓN

Según Hadman (2020), “la teoría del poder aéreo nació antes de la Primera Guerra Mundial (PMG), la cual fue el primer gran escenario de aplicación” (p.73). Otros teóricos como Giulio Douhet, Billy Mitchell y Hugh Trenchard desarrollaron teorías clave que permitieron visualizar la importancia y las ventajas del poder aéreo para los Estados.

El transporte aéreo estratégico es un componente vital para la defensa y la seguridad nacional de Colombia. Es el soporte de las operaciones militares en todas sus dimensiones, constituyéndose como un elemento logístico esencial para el combate, y asociado con la proyección de capacidades distintivas de la FAC en la región. Maywald y otros (2017) consideran que para la Fuerza Aérea de los Estados Unidos, la rápida y decisiva entrega de tropas y equipos militares es fundamental para alcanzar los objetivos de seguridad nacional. Además, la flexibilidad del transporte aéreo militar es clave para ejecutar una estrategia de movilidad con alcance global (Maywald, Reiman, Johnson & Rovbert, 2017). Por su parte, la FAC ha recurrido al transporte aéreo estratégico en múltiples roles, desde operaciones significativas que impactaron la seguridad y la defensa de la Nación, como la operación Vuelo de Ángel, en la retoma de Mitú en 1998, donde el poder aéreo de la FAC desempeñó un papel excepcional para el éxito de las operaciones conjuntas (Álvarez Calderón & Correcha Ramírez, 2022).

Esta investigación se enfoca en la situación actual de esta área de las operaciones militares, destacando su importancia, dificultades, desafíos y posibles estrategias para optimizarla. La actividad aérea militar con fines estratégicos juega un papel importante en la capacidad de movilización de las fuerzas armadas, suministros y equipos en acciones bélicas, tanto en el ámbito externo como interno, y en operaciones de paz con el apoyo a misiones humanitarias que respaldan los fines del Estado. Además, apoya la elaboración de un plan de acción y la respuesta rápida a situaciones de peligro para la nación y otros actores a nivel global.

Por otro lado, algunos factores importantes, como la recesión, la fluctuación en el precio del dólar, las dificultades para lograr un flujo logístico constante y eficiente, y particularmente la dependencia tecnológica y la disminución en el presupuesto, impactan directamente la cantidad de horas de vuelo asignadas a cada una de las fuerzas. Esto debilita el mantenimiento de las capacidades distintivas y la disponibilidad de aeronaves para cumplir con las misiones de transporte aéreo estratégico.

A pesar de que la doctrina de la FAC ha implementado diversos cambios para mejorar la eficiencia operacional, como la modificación de los criterios de clasificación de pilotos relacionados con los requisitos de entrenamiento continuo, con el fin de mantener la operatividad de las tripulaciones, y la planificación conjunta de requerimientos de transporte para optimizar los recursos, persisten desafíos que impiden cumplir a tiempo con los diversos requerimientos solicitados. Esto genera desabastecimiento, pérdida del factor sorpresa en el desarrollo de operaciones y disminución de las reservas estratégicas de combustible en algunas unidades con activos estratégicos bajo su responsabilidad, lo que impacta directamente la seguridad y defensa de la nación.

Por consiguiente, el autor propone una revisión de las mejores prácticas a nivel regional, tomando como referencia algunos países y la Unión Europea, en aspectos operacionales, doctrinales, organizacionales, materiales, de personal e infraestructura sobre el transporte aéreo militar, para facilitar la identificación de los factores más importantes que afectan la operación aérea y el apoyo para el combate brindado por la Fuerza Aérea Colombiana, en beneficio de la seguridad de la nación y la mejora de las capacidades de transporte aéreo militar.

Palabras clave: Transporte Aéreo; Seguridad Nacional; Defensa Nacional; Poder Aéreo; Reabastecimiento en Vuelo; Despliegue Operacional.

2. REVISIÓN DE LA LITERATURA

Según Funes (2017), la finalidad de los medios de transporte aéreo estratégico es satisfacer los requerimientos operativos de la Conducción Estratégica Militar, Operacional, así como los desplazamientos inter-teatros o inter-áreas, permitiendo proyectar fuerzas y poder de fuego a lugares de interés para el poder político (Funes, 2017). Sin embargo, la baja disponibilidad de aeronaves de transporte táctico obliga a que las aeronaves de la FAC se desplacen constantemente dentro de los diversos espectros de las misiones de transporte aéreo. Esto genera, en primer lugar, la no disponibilidad de estas aeronaves y, en segundo lugar, un incremento en sus costos de mantenimiento y operación (Funes, 2017; Torrijos & Carvajal, 2014).

El transporte aéreo, tradicionalmente interpretado en términos de internacionalidad y modernidad, ha favorecido el acercamiento de muchos centros periféricos a las regiones generadoras de riqueza, tanto a nivel nacional como mundial (Córdoba & Gago, 2012). En Colombia, particularmente por su ubicación geográfica, se facilita el tránsito de miles de pasajeros al año como efecto de la globalización, lo que también trae consigo amenazas transnacionales que constituyen un desafío para las Fuerzas de Seguridad del Estado, que luchan por mantener la seguridad y defensa de la nación. Según Martín (2012), el desarrollo de los centros urbanos está estrechamente relacionado con las

vías de comunicación y los medios de transporte, especialmente el transporte aéreo, ya sea militar o civil, siendo los aeropuertos una infraestructura crítica en ese desarrollo.

Por su parte, el transporte aéreo estratégico de carácter militar ha permitido desarrollar operaciones significativas en diferentes teatros de operación. Es un factor fundamental del poder militar, proporcionando capacidades distintivas que apoyan la protección del territorio nacional, la respuesta ante cualquier amenaza y la demostración de poder como un referente geopolítico. Esto asegura la soberanía y los intereses nacionales. Tal como se define en el Manual de Doctrina Básica Aérea, Espacial y Ciberespacial (DBAEC), el transporte aéreo militar permite una movilidad aérea ágil de personal y carga, asegurando a la nación una respuesta oportuna con los medios aéreos adecuados, en el tiempo y lugar correctos, en los diferentes escenarios posibles, tanto en combate como en el impulso del desarrollo nacional y programas de cooperación (Fuerza Aérea Colombiana, 2020). La misión de transporte aéreo militar estratégico permite realizar múltiples misiones dentro y fuera del país, según sea necesario, independientemente del ambiente operacional.

Según Funes (2017), los medios de transporte aéreo estratégico tienen como misión principal satisfacer los requerimientos operativos de la Conducción Estratégica Militar, Operacional y los desplazamientos inter-teatros o inter-áreas, facilitando la proyección de fuerzas y poder de fuego a lugares de interés para el poder político. Sin embargo, la baja disponibilidad de aeronaves de transporte táctico obliga a que las aeronaves de la FAC se desplacen constantemente dentro de los diversos espectros de las misiones de transporte aéreo, lo que genera la no disponibilidad permanente de estas aeronaves y el incremento en sus costos de mantenimiento y operación, ya que los programas de mantenimiento de las aeronaves se basan principalmente en la cantidad de horas voladas.

Por otro lado, dentro de la misión del transporte aéreo estratégico, la Fuerza Aérea Colombiana tiene la responsabilidad de transportar al presidente de la República y su familia (Fuerza Aérea Colombiana, 2020) a cualquier parte del mundo, asegurando su seguridad y movilidad necesaria para cumplir con su mandato democrático. Como líder del Estado, el presidente debe impulsar diversas políticas tanto a nivel nacional como internacional, en busca de los intereses del país. Además, la FAC es la única institución estatal que cuenta con activos estratégicos relacionados con la movilidad y misiones que impactan la seguridad y defensa de la nación, como la capacidad de reabastecer de combustible en vuelo a aeronaves de superioridad aérea, lo que garantiza su operatividad y extiende su alcance. Por lo tanto, es fundamental que este rol se refleje en el gasto en defensa, asegurando el soporte necesario para satisfacer las necesidades actuales.

El gasto en defensa se entiende como los recursos destinados a actividades militares por parte de una institución militar legalmente establecida. Este gasto se utiliza para mantener y aumentar la capacidad operativa de estas organizaciones, abarcando aspectos como la gestión del personal, su formación, equipamiento y otros recursos necesarios para cumplir con su función de defensa y seguridad, que es el propósito fundamental de las Fuerzas Armadas de un Estado (Barrios, 2022).

La seguridad y defensa nacional están íntimamente conectadas con los diferentes actores del tablero geopolítico del país, donde se relacionan entre sí en una carrera particular que considera los campos político, militar, económico, entre otros, buscando obtener una relación de dominación que permita influir en el comportamiento de los otros

(Torrijos & Carvajal, 2014). Esto obliga al Estado a desarrollar la capacidad de ejercer dominio y control de los territorios nacionales de manera eficiente. El dinamismo de los factores de inestabilidad que afectan la seguridad nacional constantemente explora e introduce nuevas formas de delinquir, lo que exige flexibilidad y movilidad en los mecanismos de defensa de las Fuerzas Militares de Colombia. Por esto, todo el poder aéreo, y en especial la capacidad objeto de estudio de esta investigación, debe estar disponible para la defensa de la nación, desde el soporte logístico para el despliegue de la aviación estratégica hasta el movimiento del equipamiento militar conforme a la dinámica operacional.

El Comando Aéreo de Transporte Militar (CATAM) es la punta de lanza de las operaciones de transporte aéreo militar estratégico, con capacidades distintivas en este tipo de operaciones, desarrollando importantes misiones de despliegue estratégico y táctico en todo el territorio nacional. La disponibilidad de aeronaves como el B767, B737 y C130 ha sido impactada directamente por factores como la devaluación del peso frente al dólar, el complejo flujo logístico y la reducción del presupuesto destinado a actividades de mantenimiento. La FAC, a través de un documento estratégico denominado libro azul, ha planteado la estrategia de renovación de flotas, considerando la obsolescencia de las aeronaves, lo que a su vez aumenta la necesidad de mantenimientos más rigurosos y el aumento de fallas en relación con las horas voladas.

La proyección de la FAC en relación con el transporte aéreo estratégico se ha desarrollado mediante una metodología de proyección de capacidades (PBC). Sin embargo, la voluntad política es un factor crucial para implementar y adquirir los recursos necesarios que permitan la movilidad de las Fuerzas de Seguridad del Estado y de las entidades gubernamentales. A menudo, las decisiones estratégicas y políticas han debilitado capacidades importantes, lo que impacta directamente en la disponibilidad de los medios necesarios para garantizar la seguridad y la defensa de la nación.

3. METODOLOGÍA

Según Hernández, Fernández y Baptista (2014), existen tres enfoques principales en la investigación: el cuantitativo, el cualitativo y el mixto. Cada uno de estos enfoques presenta características específicas que dependen del tipo de investigación y los objetivos planteados. Sin embargo, la distinción entre los enfoques cuantitativo y cualitativo es relativa, ya que ambos se interrelacionan y comparten ciertos aspectos en común. A pesar de sus diferencias, los autores destacan que los enfoques cuantitativo y cualitativo no son mutuamente excluyentes, sino que pueden complementarse y utilizarse de manera conjunta en una investigación, dependiendo de los objetivos y las preguntas de investigación. En su esencia, se busca comprender los fenómenos estudiados mediante técnicas como la observación participante y las entrevistas no estructuradas o en profundidad.

Para llevar a cabo la presente investigación, se propone una metodología cualitativa, la cual utiliza la recolección de datos mediante entrevistas semiestructuradas al personal involucrado en la conducción y desarrollo de las operaciones de transporte aéreo militar. Posteriormente, se realizará el análisis de los datos para dar respuesta a las preguntas de investigación o, en su defecto, para encontrar nuevas interrogantes que refinan las posibles soluciones al problema planteado (Hernández, Fernández, & Baptista, 2014).

En una primera etapa, se realizó un diagnóstico sobre el estado actual del transporte estratégico en la Fuerza Aérea Colombiana (FAC), con el fin de visualizar la situación actual del transporte aéreo estratégico. Se determinaron los factores principales que impactan en la disponibilidad de los medios necesarios para dar cumplimiento a esta importante misión. Para ello, se emplearon entrevistas semiestructuradas aplicadas a la Jefatura de Movilidad (JEMOV), Dirección de Operaciones de Movilidad (DIOMO), Grupo de Transporte No. 81 (GRUTA 81) y el Grupo Técnico No. 83 (GRUTE). Posteriormente, se elaboró un análisis comparativo entre los referentes regionales mediante la utilización de una matriz que permitió identificar los aspectos relevantes de cada uno de los países observados, con el fin de determinar aquellos que pudieran aportar a la mejora continua y al desarrollo de nuevas capacidades.

De igual manera, se utilizó un método inductivo que permitió realizar un análisis detallado sobre el impacto que genera en la seguridad y defensa nacional la situación actual del transporte aéreo estratégico en la FAC, involucrando todo el entorno que rodea este tipo de operaciones mediante la metodología DOMPI. Esta metodología busca identificar la doctrina escrita existente sobre la misión objeto de estudio, reconocer la organización de cada una de las fuerzas analizadas, el material y equipo disponible para el cumplimiento de este tipo de misión, así como el personal e infraestructura involucrado en el transporte aéreo militar al interior de las Fuerzas Aéreas referentes. Se abarcaron los impactos y aportes al cumplimiento de la misión, con el fin de identificar buenas prácticas y factores relevantes que puedan ser considerados en la Fuerza Aérea Colombiana para optimizar y mejorar los indicadores de cumplimiento de la institución y potenciar el transporte aéreo militar estratégico.

Así mismo, se realizó una revisión documental de la doctrina de los países referentes propuestos, identificando su organización y la manera en que desarrollan este tipo de operaciones. Igualmente, se revisaron otros conceptos disponibles en las diferentes bases de datos académicas, así como la aplicación de entrevistas semiestructuradas al personal del Comando Aéreo de Transporte Militar (CATAM) que esté directamente implicado en el planeamiento y ejecución de las operaciones de transporte aéreo de personal y carga. Esto busca conocer de primera mano las principales afectaciones relacionadas con la operación continua de las aeronaves dispuestas para la misión objeto de la presente investigación y en el nivel operacional a la Jefatura de Movilidad (JEMOV), como la sección encargada de la recepción y gestión de los diferentes requerimientos de las diversas entidades.

Finalmente, se realizarán algunas recomendaciones basadas en la investigación desarrollada que permitirán la optimización de los recursos dispuestos para las operaciones de transporte aéreo de personal y carga, planteando nuevas estrategias que fortalezcan y muestren la relevancia de este tipo de operaciones para la seguridad y defensa del Estado colombiano.

4. DESARROLLO Y RESULTADOS

El transporte aéreo estratégico en Colombia se ha configurado como una herramienta fundamental en la seguridad y la defensa de la Nación, llevando a cabo misiones de diversa índole, como el transporte de tropas a lo largo y ancho del país, y el movimiento estratégico de algunos activos para la defensa, como radares, armamento y embarcaciones.

Se exploran, dentro de las limitaciones que se presentan al interior de la Fuerza Aérea Colombiana, las influencias en el planeamiento y desarrollo de operaciones militares en todos los dominios del teatro de la guerra en Colombia, así como un análisis comparativo con algunos referentes regionales y hemisféricos, tales como países europeos que han evolucionado en diferentes conceptos, comprendiendo la necesidad de optimizar los medios y lograr la eficiencia operacional en relación con el transporte aéreo.

El concepto de capacidad, según Pineda (2017), se entiende como la habilidad de realizar una tarea bajo ciertos estándares (como tiempo, distancia, simultaneidad, etc.), a través de una combinación de sus respectivos componentes: Doctrina, Organización, Material y Equipo, Personal e Infraestructura (DOMPI). Estos factores interactúan con algunos principios del poder aéreo, como la flexibilidad y la rapidez. Las limitaciones existentes en cada uno de esos componentes restringen el uso efectivo de las fuerzas militares, dificultando la movilidad de las fuerzas y afectando directamente las operaciones de seguridad y defensa nacional al incidir en la logística para el combate.

En el diagnóstico de las capacidades y limitaciones del transporte aéreo estratégico del país, se realizó la recolección de información sobre los aspectos fundamentales, tanto positivos como negativos, según el personal experto que lidera las operaciones de transporte aéreo militar estratégico en la FAC, en los niveles operacional y táctico, es decir, el personal con conocimiento operacional y experiencia en el desarrollo de este tipo de misiones.

Para la recolección de estas perspectivas, se llevaron a cabo entrevistas semiestructuradas en las que se discutieron algunos factores que afectan el cumplimiento de la misión.

Una vez recolectados los datos, se realizó un análisis y comparación con los enunciados de capacidades formulados por el nivel estratégico de la Fuerza, los cuales son de carácter reservado y fueron construidos bajo la metodología DOMPI (Ministerio de Defensa Nacional, 2018). Esta metodología constituye el estado ideal de las capacidades con las que debería contar la FAC, articulado con los planes de seguridad y defensa que involucran la movilidad del personal y material de guerra necesarios para la defensa y seguridad de la Nación a lo largo de todo el territorio nacional. Así, la Jefatura de Movilidad debe garantizar el incremento efectivo del poder de combate de la propia Fuerza y de las demás Fuerzas Armadas en todo tiempo y lugar, con componentes de interoperabilidad que permitan el alcance, la movilidad y la proyección del poder de combate a nivel mundial.

4.1 Análisis Entrevista Grupo de Transporte No.81

El Grupo de Transporte No.81 del Comando Aéreo de Transporte Militar (GRUTA) es el referente de la misión del transporte aéreo militar estratégico, donde se encuentran las principales aeronaves encargadas de cumplir esta misión. El comandante de esta sección lidera las operaciones aéreas de esta importante unidad (Fuerza Aérea Colombiana, 2022), donde se conjugan factores clave que influyen en el desarrollo normal de las operaciones, tales como la meteorología, las tripulaciones entrenadas, las limitaciones de los aeródromos, entre otros, los cuales se tienen en cuenta durante la planeación y ejecución.

En la entrevista realizada a la comandante del GRUTA, se evidencia cómo el contexto de la seguridad nacional ha activado todas las capacidades disponibles. Se destacan situaciones particulares como el estallido social de 2021 en Colombia, durante el cual se transportó personal del Escuadrón Móvil Antidisturbios, hoy reconocido como la Unidad de Diálogo y Mantenimiento del Orden (UNDMO), y carga sobredimensionada, como los vehículos blindados utilizados por la Policía Nacional para el control de las multitudes (Fuerza Aérea Colombiana, 2024).

La situación de orden público en diversas regiones del país ha requerido el uso del transporte aéreo militar. Departamentos como Cauca, regiones como Catatumbo, los Llanos Orientales y el sur del país, entre Caquetá y Putumayo, han sido escenarios de operaciones militares ofensivas y defensivas. Estas operaciones han requerido el movimiento de tropas y material de guerra, elementos fundamentales para cumplir con la misión constitucional encomendada a las Fuerzas Militares.

Por otro lado, si observamos las operaciones especiales que las aeronaves de CATAM pueden desarrollar, tanto en entrenamiento como en operaciones reales contra los diversos factores de inestabilidad, se evidencia que fortalecen y mantienen las capacidades distintivas de las Fuerzas, permitiendo su sostenibilidad en el tiempo. No obstante, las limitaciones en la disponibilidad de aeronaves, por diversas razones como el factor técnico, que está vinculado directamente a otras causas como el presupuesto asignado a las fuerzas, el flujo logístico necesario para contar con los repuestos y la cantidad de personal capacitado para mantener el porcentaje de alistamiento, siguen siendo causas de la baja disponibilidad de aeronaves para desarrollar operaciones de movilidad.

Según lo concluido por la comandante del GRUTA (Comunicación personal, 05 de junio de 2024), los diferentes escuadrones asociados al transporte aéreo estratégico se han enfocado en mantener el entrenamiento de sus tripulaciones. Sin embargo, la reducción de horas disponibles para este fin representa un desafío que ha llevado a la innovación en nuevas formas de mantener listas y entrenadas las tripulaciones de esta unidad, cumpliendo con el procedimiento OA-JECSA-INS-009 Instructivo de Entrenamiento Continuado de Vuelo, emitido por el Comando de Operaciones Aéreas y Espaciales (COAES).

Un ejemplo claro de ello ha sido la optimización de los vuelos operativos, lo que ha permitido cumplir con las maniobras mínimas requeridas para mantener las autonomías, así como el uso de los simuladores disponibles en el grupo de educación aeronáutica para complementar el entrenamiento y mitigar las falencias derivadas de la disponibilidad de horas.

Al recopilar las respuestas de los diferentes líderes de los procesos involucrados en la operación aérea, en relación con los principales desafíos operativos, se puede entender la complejidad de la operación en aeródromos donde la infraestructura es deficiente. Esto incluye factores como la longitud de pista, las radioayudas disponibles, la disponibilidad de equipo de apoyo en tierra y, uno sumamente determinante, la disponibilidad de combustible.

La FAC cuenta con una flota de aeronaves de transporte liviano, utilizadas en diversas misiones como traslados aeromédicos, inteligencia y transporte de personalidades (esquema operacional de la FAC, 2024). Aunque estas aeronaves son parte integral

del transporte aéreo, su mantenimiento y disponibilidad no presentan la misma complejidad que las flotas de mayor envergadura.

En contraste, el Boeing 767 “Júpiter”, que desarrolla el reabastecimiento de combustible en vuelo, es la única aeronave de este tipo en la FAC, capaz de extender el alcance operativo de la aviación estratégica del país. Sin embargo, el “Júpiter” estuvo fuera de servicio durante todo el año 2023, lo que impactó significativamente la capacidad de proyección y sostenimiento de las operaciones aéreas de largo alcance de la FAC.

Por otro lado, la FAC ha fortalecido significativamente sus estándares de seguridad operacional, conjugando el entrenamiento de sus tripulaciones con la interoperabilidad en ejercicios operacionales internacionales como Red Flag, Red Flag Rescue, Resolute Sentinel, Maple Flag, entre otros. Estos ejercicios han permitido adquirir estándares en las operaciones aéreas, fortaleciendo las capacidades para la defensa y seguridad de la nación (Rueda, 2024). Se han modificado los estándares del entrenamiento continuado para las tripulaciones de la FAC con el fin de ajustar las necesidades de la organización frente a la disminución en la cantidad de horas de vuelo asignadas anualmente. Según los comandantes de escuadrón en CATAM, se ha enfrentado la necesidad de tener la disponibilidad exclusiva de aeronaves para misiones de entrenamiento, aun cuando existen requerimientos operacionales pendientes, considerando el costo que esto implica.

De acuerdo con la señora Teniente Coronel Comandante del GRUTA, “este punto de inflexión ha complicado el mantenimiento de las autonomías de vuelo y las capacidades de todas las tripulaciones” (Comunicación personal, 05 de junio de 2024). Como comandante del escuadrón de transporte pesado, fue necesario establecer estrategias para determinar la cantidad mínima de pilotos, de manera que se pudieran sostener las operaciones aéreas y el entrenamiento mínimo continuado.

En esta articulación de las operaciones y el entrenamiento, la disponibilidad de las aeronaves necesarias se presenta como un pilar fundamental para cumplir con todas las variables que involucra esta misión.

4.2. Análisis Entrevista Grupo Técnico No.83

El Grupo Técnico (GRUTE), que forma parte de CATAM, es responsable de la ejecución del mantenimiento de las aeronaves asignadas. Esto incluye la gestión y planificación de los programas establecidos por los fabricantes para asegurar la aeronavegabilidad de las aeronaves y sus componentes (Fuerza Aérea Colombiana, 2022). Según el Teniente Coronel Comandante del GRUTE, “En total, 38 aeronaves distribuidas en 11 flotas, cada una con un plan de mantenimiento diferente. También se identifican limitaciones importantes como la falta de personal suficiente (horas-hombre), insumos, herramientas y repuestos necesarios para los diferentes mantenimientos” (Comunicación Personal, 06 de junio de 2024).

Durante la investigación, se evidencia en la información proporcionada por el comandante del GRUTE que hay dos grandes desafíos que afectan directamente al porcentaje de alistamiento. Primero, el déficit de personal, que supera el 30 % en comparación con la Tabla de Organización y Equipo (TOE), lo cual provoca una alta carga laboral para el personal del GRUTE. Además, el bajo presupuesto destinado

a la logística y la diversidad de flotas provoca un incremento en los tiempos de mantenimiento debido a la falta de insumos, herramientas, elementos o repuestos.

El GRUTE cuenta con 217 personas, de las cuales 16 son oficiales, 157 suboficiales y 44 civiles, y una infraestructura que incluye talleres especializados y certificados para las actividades de mantenimiento, con el fin de suplir las necesidades de la operación diaria. A pesar de esto, existen mantenimientos que, por la complejidad, la capacidad instalada en la unidad y otros factores como la disponibilidad de personal, se subcontratan con organizaciones externas como la Corporación de la Industria Aeronáutica Colombiana (CIAC) y Central Aerospace.

Aunque esto ha permitido cumplir con los programas de mantenimiento, ha limitado las capacidades de mantenimiento de la FAC, especialmente porque, en la última década, muchos de estos programas eran cubiertos por el personal e infraestructura de la Fuerza, lo que le permitía tener autonomía e independencia.

4.3. Análisis Entrevista Jefatura de Movilidad

La Jefatura de Movilidad (JEMOV), que forma parte del Comando de Operaciones Aéreas y Espaciales, es la sección encargada de la recepción y autorización de los requerimientos de transporte de todas las Fuerzas (Fuerza Aérea Colombiana, 2022).

En la Figura 1 se detallan las capacidades específicas de JEMOV. Sin embargo, algunas de estas capacidades están orientadas al apoyo de las operaciones aéreas, como el otorgamiento de permisos de sobrevuelos, la construcción de procedimientos aeronáuticos para la navegación y la gestión del tráfico aéreo a través de la Dirección de Navegación (DINAV). Además, existen dos direcciones adicionales dentro de JEMOV: la Dirección de Potencial de Movilidad (DIPOM), encargada de proyectar los recursos humanos y físicos, como las aeronaves, de acuerdo con las estrategias planteadas por el alto mando relacionadas con las operaciones de movilidad y los ciclos de vida de las aeronaves destinadas para este fin, y la Dirección de Operaciones de Movilidad (DIOMO), que se abordará más adelante en el presente trabajo de investigación debido a su estrecha relación con las operaciones de transporte aéreo estratégico.

Figura 1. *Capacidades Específicas JEMOV*

Despliegue	Transporte de personal y carga
Reabastecimiento en vuelo	Reabastecimiento aéreo
Maniobra	Transporte presidencial y alto mando
Sostenimiento	Geodesia y Procedimientos

Fuente: Elaboración propia adaptado de Presentación Tamaño de Fuerza (Fuerza Aérea Colombiana, 2023).

4.4. Análisis Entrevista Dirección de Operaciones de Movilidad

La Dirección de Operaciones de Movilidad (DIOMO) es la sección encargada de la recepción y gestión de los requerimientos de transporte aéreo militar de las diferentes Fuerzas y entidades gubernamentales (Fuerza Aérea Colombiana, 2022). Esta área funciona como el primer filtro de las solicitudes de transporte, evaluando factores como la cantidad de pasajeros, la carga, los aeródromos de operación, entre otros, para determinar si es viable ejecutar el vuelo.

En la presente investigación se identificaron dos debilidades que afectan el planeamiento y la ejecución de la programación. La primera se refiere al recurso humano, con personal con poca experiencia en los cargos de programación. La segunda debilidad radica en la ausencia de tecnologías que respalden las actividades de planeamiento y programación de los requerimientos que llegan diariamente a JEMOV.

Durante la entrevista con el señor Teniente Coronel Director de Operaciones de Movilidad (DIOMO), se revisaron las solicitudes de transporte de las diferentes entidades y fuerzas en los últimos tres años, evidenciándose una disminución considerable. Las dos principales razones identificadas fueron: el incremento en el número de aeronaves de transporte adquiridas por las otras Fuerzas y la falta de disponibilidad de aeronaves de la FAC para cumplir con estas solicitudes (Comunicación personal, 5 de junio de 2024).

El porcentaje promedio de cumplimiento de los requerimientos es del 81.92%, con un porcentaje de cancelación del 15.90%. El resto de las solicitudes se cumplen parcialmente (0.23%) o están pendientes por programar (1.66%), como se muestra en la Tabla 1. Aunque esta estadística es positiva, debe analizarse con detenimiento, ya que algunas de las cancelaciones son debido a la disponibilidad de aeronaves o a requerimientos que solo pueden cumplirse en la fecha solicitada, con un margen mínimo de un día.

Tabla 1. Estado Requerimientos a marzo 2024

ESTADO DE REQUERIMIENTO	PORCENTAJES
CANCELADO	15.90%
CUMPLIDO	81.92%
CUMPLIDO PARCIAL	0.23%
PENDIENTE	1.66%
(en blanco)	0.29%
Total general	100.00%

Fuente: Suministrado por la Dirección de Operaciones de Movilidad (2024).

Estos requerimientos son solicitados principalmente para operaciones de seguridad y defensa, involucrando a unidades como el Comando Conjunto de Operaciones Especiales (CCOES) en el desarrollo de sus operaciones, relevos de tripulaciones desplegadas en todo el territorio nacional, así como unidades de la FAC que requieren suministros logísticos para su subsistencia. También incluyen relevos de unidades de superficie que están llevando a cabo operaciones a lo largo y ancho del país.

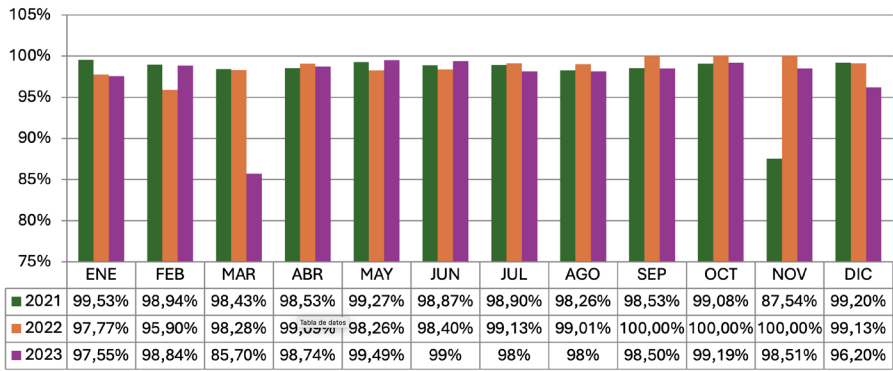
5. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Con los datos obtenidos durante la investigación, se procede a discutir la influencia del transporte aéreo estratégico en la seguridad y defensa nacional, tomando como base los enunciados de capacidad del planeamiento basado en capacidades (PBC), establecidos por la resolución No. 2702 del 2020. Estos enunciados representan un escenario ideal en el cual se conjugan todos los elementos clave para la seguridad nacional, así como las proyecciones de las capacidades distintivas de cada una de las fuerzas.

Las capacidades aéreas de la Fuerza Aérea Colombiana (FAC) permiten contar con recursos versátiles que se pueden utilizar no solo para fines militares, sino también en operaciones humanitarias, transporte de pasajeros y carga en situaciones de emergencia, rescates, extinción de incendios, entre otros (Delgado, Jiménez, & Jiménez, 2019). En este sentido, se desarrollan estrategias clave para alcanzar de manera gradual las capacidades propuestas.

En cuanto al término “confiabilidad de despacho” descrito en la Figura 2, se entiende como el porcentaje de misiones cumplidas por una aeronave en relación con las programadas, descontando únicamente aquellas misiones canceladas por factores de mantenimiento (Fuerza Aérea Colombiana, 2020). Este indicador no contempla fallas presentadas antes de la puesta en marcha de la aeronave con intención de vuelo. Es relevante notar que los porcentajes de confiabilidad entre los años 2021 y 2023 se mantienen por encima del 80 %.

Figura 2. Confiabilidad de Despacho-CATAM



Fuente: Elaboración Propia, adaptado de presentación GRUTE-CATAM.

En la Tabla 2 se presentan indicadores como el *Mean Time Between Failures* (MTBF) y el *Mean Time To Repair* (MTTR), que permiten visualizar, en primer lugar, el tiempo promedio entre fallas y, en segundo lugar, el tiempo que se tarda en reparar una falla. Con estos indicadores se puede observar que una de las aeronaves más importantes para el transporte estratégico militar, el C130, presenta una falla cada 7,83 horas de operación. Lo más complejo es que, en promedio, se requiere 12,36 horas para corregir una falla, lo que se traduce en una menor disponibilidad de esta aeronave para las operaciones.

Tabla 2. Porcentaje Disponibilidad, MTBF, Confiabilidad y MTTR

FLOTA	DISPONIBILIDAD	MTBF	CONF. DESPACHO	CONFIABILIDAD	MTTR
AW-139	93,42%	20,83	95,58%	78,08%	5,59
SK-350	54,70%	17,03	96%	72%	8,16
B-737	60,56%	22,35	97%	68%	5,76
C-130	21,81%	7,83	92%	37%	12,31
C-295	42,87%	27,46	97%	76%	9,02
C-90	58,99%	29,84	96%	83%	6,75
F-28	59,22%	18,75	97%	79%	9,97
LEGACY-600	76,13%	9,18	98%	46%	39,21

Fuente: Grupo Técnico No.83 (2024).

En la Tabla 3 encontramos un extracto de las aeronaves principales que desarrollan el tipo de misión objeto de la presente investigación.

Este complejo escenario es producto de múltiples factores identificados mediante la estadística suministrada por el GRUTE 83 y las percepciones de los líderes encargados del proceso de operaciones aéreas de transporte militar.

Tabla 3. *Aeronaves utilizadas para el Transporte Aéreo Estratégico*

TIPO DE AERONAVE	CANTIDAD	PROMEDIO ALISTAMIENTO	PAY LOAD	PAX
B-767	1	1	24 TON	198
B737-400/700	5	2	6 TON	144/150
C130 H	6	1	12/14 TON	110
C295	6	3	4,5 TON	46/70

Fuente: Elaboración propia.

En los enunciados de capacidad, los cuales son de carácter reservado, se especifica la cantidad de pax y carga que se proyecta transportar en un determinado periodo de tiempo y una distancia definida para el cumplimiento de los diferentes planes de seguridad y defensa nacional. De los enunciados 1-2-3 relacionados con el transporte terrestre de personal y carga, se puede determinar que actualmente la capacidad de cumplir con este enunciado está íntimamente ligada al alistamiento y disponibilidad de las aeronaves. Considerando las condiciones planteadas, la FAC cumple con este enunciado en un porcentaje superior al 80%, siempre y cuando las aeronaves estén listas sin ninguna restricción de mantenimiento.

En cuanto al enunciado 4, la FAC, con la flota presentada en la Tabla 2 y considerando variables como tiempo, cantidad de unidades, distancias y, en particular, la simultaneidad, estaría igualmente sujeta al alistamiento. Aunque se cuenta con más de 15 aeronaves para este movimiento, el promedio de aeronaves alistadas es solo de 7, algunas de las cuales, debido a limitaciones de rendimiento por velocidad, podrían afectar el cumplimiento del enunciado al 100%.

En el enunciado 5, se deben considerar dos aspectos fundamentales impactados por el tipo de flota con la que cuenta la FAC: la velocidad requerida y la condición de la pista en la que se propone aterrizar. Las aeronaves con mayor capacidad, como la flota de Boeing 767 y B737, son restringidas para operar en pistas no preparadas, lo que afecta el cumplimiento de la misión.

De manera transversal, en esta primera etapa de la investigación, existen percepciones comunes entre el personal entrevistado. Por un lado, se destaca la afectación del presupuesto en lo operacional, en el mantenimiento y, por ende, en el entrenamiento. También se menciona las limitaciones en el tren logístico, lo que reduce la confiabilidad y la disponibilidad de las aeronaves para el transporte aéreo de personal y carga en combate. Ante este panorama, surge la pregunta: si hipotéticamente se presentara un conflicto con otro país, ¿La Fuerza Aérea Colombiana tendría las aeronaves listas para cumplir con la demanda de transporte no solo de personal, sino también de la logística necesaria para la guerra?

Las proyecciones de renovación de las flotas están alineadas estratégicamente con los enunciados de capacidad, así como con la consolidación del libro azul, donde la FAC estima el ciclo de vida de las diferentes aeronaves, incluidas las de movilidad, y establece un cronograma proyectado hasta el año 2042. Esta secuencia de cambios dependerá siempre de la voluntad política, que determina el presupuesto de funcionamiento e inversión para las Fuerzas Militares.

Un aspecto señalado por Celi (2015) es que el principal problema actual de la falta de presupuesto en las instituciones encargadas de la seguridad y defensa nacionales se debe a la inserción del sector de la defensa en los sistemas políticos y la transformación correspondiente de la institucionalidad militar, sus roles y relaciones interinstitucionales con el aparato estatal en su conjunto. Esto afecta los diversos niveles de gestión, presupuestación y asignación de recursos. En este contexto, la voluntad política de los gobernantes de turno se convierte en la clave para cumplir con las proyecciones de la FAC.

Es importante considerar que, aunque las capacidades de la FAC están principalmente enfocadas en la defensa de la nación, en cumplimiento del mandato constitucional (Función Pública, 1991), el transporte aéreo estratégico permite la ejecución de actividades cruciales para la protección de la vida, como traslados aeromédicos, repatriación de connacionales en situaciones de riesgo por guerra o pandemia, transporte especial del presidente de la República y su familia (Fuerza Aérea Colombiana (FAC), 2020), así como todas las misiones en apoyo a la unidad de gestión de riesgo de desastres, transporte de personal y carga para apoyo humanitario y extinción de incendios.

La capacidad de transporte de personal y carga ha permitido realizar misiones significativas para el país. Con el paso de los años, las aeronaves han incrementado la cantidad de fallas por mantenimiento y, consecuentemente, el costo de mantenimiento. Por tal motivo, es fundamental entender lo esencial de estas flotas para la seguridad, la defensa nacional y los planes estratégicos militares.

El flujo logístico de repuestos para el mantenimiento de las aeronaves está generando una baja disponibilidad de aeronaves para el cumplimiento de esta misión. Los procesos de contratación de repuestos y mantenimientos a menudo toman más de 90 días. La secuencia de los programas estructurados para el sostenimiento de las aeronaves está siendo deficiente, lo cual es una condición indefectible, junto con la disminución del presupuesto asignado, que obliga a priorizar el empleo de los recursos sobre las flotas, aun cuando todas juegan un papel fundamental en la defensa de la nación.

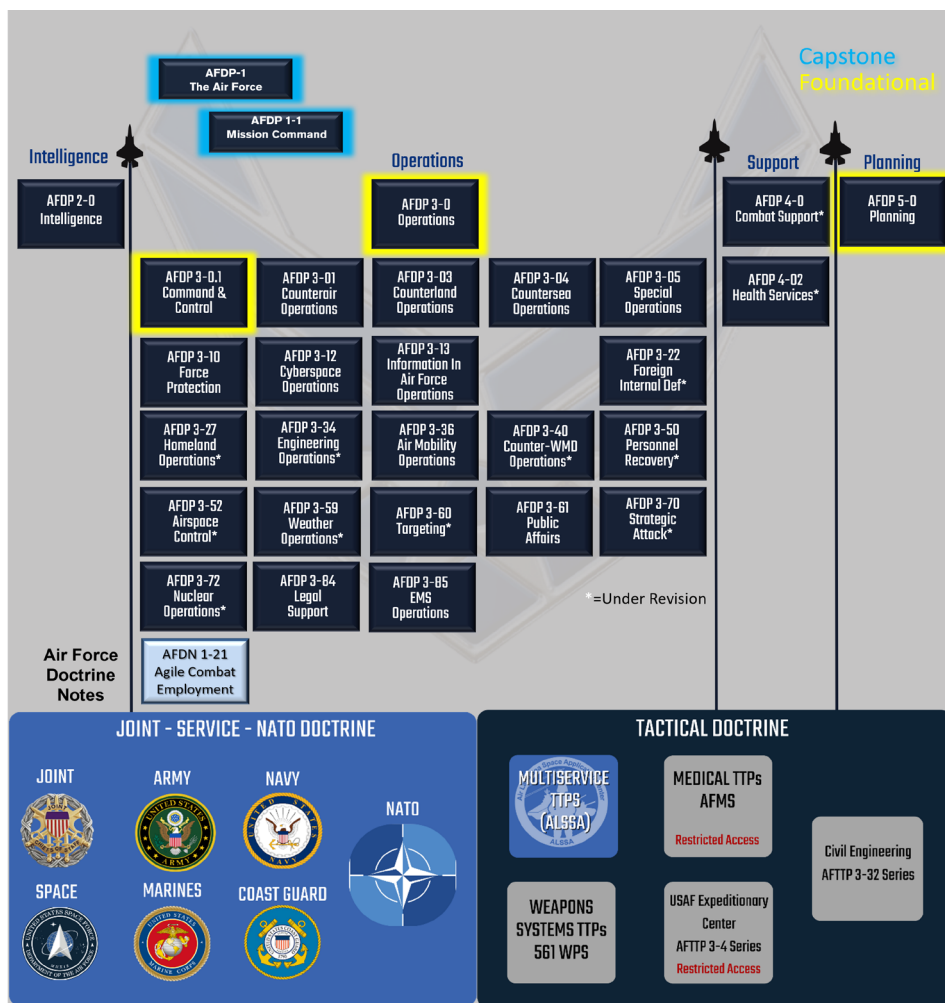
5.1 Fuerza Aérea de los Estados Unidos de América (USAF)

Estados Unidos, como referente mundial, ha sido una potencia militar durante décadas. Su enfoque en políticas de Estado bien definidas facilita la ejecución exitosa de operaciones en diversos dominios. Esto incluye la consideración de factores críticos como el presupuesto, la logística y el transporte militar estratégico (United States Department of Defense, 2023).

En su organización, la USAF cuenta con un comando de movilidad aérea (AMC, por sus siglas en inglés), encargado de proporcionar una capacidad superior de transporte

aéreo estratégico, reabastecimiento en vuelo, evacuación aeromédica, soporte a la movilidad aérea global y comando de las misiones de movilidad para proyectar, conectar, maniobrar y sostener (United States Air Force, 2019).

Figura 3. Publicaciones de Doctrina de la USAF



Fuente: Tomado de <https://www.doctrine.af.mil/>

Relacionando con la doctrina de operación, en la Figura 3 se pueden encontrar todas las publicaciones doctrinales de la USAF. En los recuadros amarillos y azules se han seleccionado las publicaciones que, de manera directa e indirecta, se relacionan con la misión de transporte aéreo militar.

La USAF cuenta con alrededor de 321.000 miembros activos, de los cuales 110.000 pertenecen al Comando de Movilidad Aérea (AMC, por sus siglas en inglés). Este comando opera las aeronaves C-5 Galaxy, KC-10 Extender, C-17 Globmaster III, C-130 Hércules, C-130J Super Hércules, KC-46 Pegasus y KC-135 Stratotanker (USAF, 2024). El AMC es el encargado de brindar una rápida movilidad global y sostenimiento a las Fuerzas Armadas de Estados Unidos, incluyendo misiones humanitarias nacionales e internacionales (U.S. Air Force, 2024).

Figura 4. Organización USTRANSCOM



Fuente: Elaboración propia con información recuperada de <https://www.ustranscom.mil>

En la Figura 4 se presenta la organización del Comando de Transporte de Estados Unidos, del cual dependen cuatro comandos adicionales encargados del transporte estratégico para todas las Fuerzas Armadas, abarcando todos los dominios y liderados por la Fuerza Aérea en el dominio aéreo y espacial a través del AMC, el Ejército mediante el SDDC y la Armada con el MSC. Dentro de la estructura se encuentra el Comando Conjunto Habilitante de Capacidades (JECC, por sus siglas en inglés), encargado de suministrar planificadores, especialistas en asuntos públicos y capacidades de comunicación para apoyar el comando y control dentro del teatro de guerra.

El AMC cuenta con 21 unidades de diferentes tipos, de acuerdo con las capacidades y clasificación de la USAF. Se destacan 3 unidades de reabastecimiento en vuelo y 2 unidades ubicadas en Hawái y Alemania, como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Unidades Pertenecientes al AMC

No.	AIR BASE WINGS	UBICACIÓN
1	87th Air Base Wing Joint Base Mcguire-Dix-Lakehurst	New Jersey
2	628th Air Base Wing Joint Base Charleston	South Carolina
AIR REFUELING WINGS		
3	6th Air Refueling Wing Macdill Air Force Base	Florida
4	22nd Air Refueling Wing McConnell Air Force Base	Kansas
5	92nd Air Refueling Wing Fairchild Air Force Base	Washington
AIR MOBILITY WINGS AND GROUPS		
6	43rd Air Mobility Group Pope Army Airfield	North Carolina

No.	AIR BASE WINGS	UBICACIÓN
7	60th Air Mobility Wing Travis Air Force Base	California
8	305th Air Mobility Wing Joint Base Mcguire-Dix-Lakehurst	New Jersey
9	375th Air Mobility Wing Scott Air Force Base	Illinois
AIR MOBILITY OPERATIONS WINGS		
10	515th Air Mobility Operations Wing Joint Base Pearl Harbor-Hickam	Hawái
11	521st Air Mobility Operations Wing Ramstein Air Base	Germany
AIRLIFT WINGS		
12	19th Airlift Wing Little Rock Air Force Base	Arkansas
13	62nd Airlift Wing Joint Base Lewis-Mcchord	Washington
14	89th Airlift Wing Joint Base Andrews	Maryland
15	317th Airlift Wing Dyess Air Force Base	Texas
16	436th Airlift Wing Dover Air Force Base	Delaware
17	437th Airlift Wing Joint Base Charleston	South Carolina
NUMBERED AIR FORCE		
18	18th Air Force Scott Air Force Base	Illinois
OTHER AMC ORGANIZATIONS		
19	618th Air Operations Center (Tanker Airlift Control Center) Scott Air Force Base	Illinois
20	621st Contingency Response Wing Joint Base Mcguire-Dix-Lakehurst	New Jersey
21	U.S. Air Force Expeditionary Center Joint Base Mcguire-Dix-Lakehurst	New Jersey

Fuente: Elaboración propia con información tomada de <https://www.amc.af.mil>

Esta distribución permite la rápida movilidad de las fuerzas armadas de los Estados Unidos. Estratégicamente, la 515th Air Mobility Operations Wing, ubicada en el Pacífico, es quizás la unidad más cercana a Asia. De la misma manera, la 521st Air Mobility Operations Wing, ubicada en Alemania, cubre el continente europeo (U.S. Air Force, 2024).

Finalmente, las Fuerzas Militares de Colombia han tomado como referente a los Estados Unidos, especialmente en su doctrina operacional, tácticas y procedimientos. Lo mismo ha sucedido en otros aspectos de la nación, como el político y el social, impulsado por la teoría de Respite Polum creada por Marco Fidel Suárez en 1914, donde siempre hemos mirado al norte como un modelo a seguir. Por ello, es importante considerar los elementos de la USAF que pueden aplicarse para optimizar los recursos necesarios en el mantenimiento de las capacidades de transporte aéreo estratégico de la FAC.

5.2 Unión Europea (UE)

La defensa y seguridad europea posterior a la Segunda Guerra Mundial (WWII) ha tenido como concepto estratégico una influencia directa en las grandes deficiencias que hoy en día presentan las capacidades de transporte aéreo estratégico en ese continente (Navarro, 2011, p. 2). La Primera Guerra del Golfo en 1991 representó una señal de alerta clave para los países europeos, al revelar la urgente necesidad de disponer de un sistema de transporte aéreo estratégico sólido y eficiente. Este conflicto demostró que la capacidad de movilizar recursos y tropas rápidamente es esencial para enfrentar desafíos en escenarios de gran escala, subrayando las carencias que Europa debía abordar en su infraestructura de transporte militar.

Los países que conforman la Unión Europea, muchos de ellos potencias económicas, militares y sociales, han luchado por unificar las capacidades de sus fuerzas militares e instituciones en busca de lograr la eficiencia operacional, a pesar de las diferencias significativas en lenguas, culturas y religiones entre ellos. Así como algunos países unificaron monedas y requisitos de visado para ingresar, también han trabajado en la construcción conjunta de aeronaves de superioridad aérea con diferentes tecnologías, como es el caso del Eurofighter (Avanzini, 2010).

De manera similar, algunas iniciativas operativas estratégicas para el transporte aéreo de personal y carga, traslados aeromédicos y reabastecimiento en vuelo buscan aunar esfuerzos en el cumplimiento de misiones, optimizando los medios aéreos de los países participantes. Un ejemplo de esto es el Comando de Transporte Aéreo Europeo (EATC, por sus siglas en inglés), conformado por siete naciones: Holanda, Bélgica, Francia, Alemania, Luxemburgo, Italia y España.

Figura 5. Línea de Tiempo EATC



Fuente: Elaboración propia con información adaptada de <https://eatc-mil.com/en/who-we-are/the-member-nations>

En la Figura 5 se puede observar cómo se conformó el Comando de Transporte Aéreo Europeo (EATC) y cómo tres nuevos países se unieron a este. Su inauguración tuvo lugar el 10 de septiembre de 2010, con los cuatro países fundadores: Bélgica, Holanda, Alemania y Francia. Posteriormente, en noviembre de 2012, se unió Luxemburgo, y finalmente, en 2014, España e Italia se incorporaron, en los meses de julio y diciembre, respectivamente.

Doctrinariamente, el EATC emite sus propios documentos que enmarcan la operación conjunta con las siete naciones que lo conforman. Entre los más importantes se destaca el Manual de Operaciones, compuesto por 10 subpartes que abordan temas como el entrenamiento y la gestión del riesgo operacional, entre otros. También se encuentra

el Manual de Operaciones en Tierra (EGOM), que establece los procedimientos estandarizados para el transporte de personal y carga a través del EATC (European Air Transport Command, 2024).

En la Figura 6 se presenta la organización del EATC. Se observa que la posición de comandante rota constantemente entre los Estados de Francia y Alemania, mientras que el cargo de subcomandante es ocupado por Bélgica, Italia, Holanda y España, con una rotación de tres años. Las demás posiciones son alternadas entre el resto de las naciones miembros del EATC, permitiendo la representación nacional de cada una de ellas a través del personal agregado permanentemente a este Comando.

Figura 6. Organigrama EATC



Fuente: Elaboración Propia con información adaptada de Fact Sheet (EATC, 2024).

Finalmente, es importante resaltar los resultados operacionales obtenidos por el EATC entre 2010 y 2023, los cuales se exponen en la Figura 7. Estos resultados permiten visualizar la eficiencia de la organización y su aporte a la seguridad y defensa de los Estados miembros.

Figura 7. Resultados Operativos EATC 2010-2023



Fuente: Elaboración propia con información adaptada de Fact Sheet (European Air Transport Command, 2024).

5.3. Fuerza Aérea de Brasil

Brasil ha sido un referente en varios campos, como el militar, económico y tecnológico, para los países suramericanos. Según Flandes (2012), mientras Brasil se destaca como la potencia regional de Sudamérica y una potencia intermedia con aspiraciones de convertirse en una gran potencia global, Colombia es una de las cuatro potencias secundarias de la región, junto con Argentina, Chile y Venezuela. Aunque estas naciones tienen ambiciones de alcanzar el estatus de potencias intermedias, su influencia a nivel global es actualmente limitada.

Dentro de este contexto, las Fuerzas Aéreas de Colombia y Brasil han mantenido una relación cooperativa, compartiendo características similares de operación, así como también enfrentando factores de inestabilidad en sus fronteras, como el narcotráfico y la minería criminal. Ambas fuerzas han participado en ejercicios operacionales como COLBRA, Cruzex y Amazonas, este último involucrando la protección de la Amazonía como un imperativo estratégico para ambas naciones (Pereira & de Oliveira Matos, 2020), lo que ha permitido la interoperabilidad y el fortalecimiento de la seguridad y defensa de la región.

De este modo, la Fuerza Aérea Brasileña (FAB) tiene distribuidas aeronaves a lo largo y ancho del territorio, que son empleadas para el transporte aéreo militar, como se

muestra en la Figura 9. Esto brinda sostenimiento a las diferentes operaciones de seguridad y defensa del país, reduciendo los tiempos de reacción y movimiento.

En la Tabla 5 se encuentran detalladas las bases y la distribución de las aeronaves de transporte de la FAB, donde se puede observar cómo las aeronaves con capacidades estratégicas de reabastecimiento en vuelo, como los KC-30 y KC-390, están ubicadas en lugares estratégicos de la nación, facilitando su despliegue a cualquier punto del territorio.

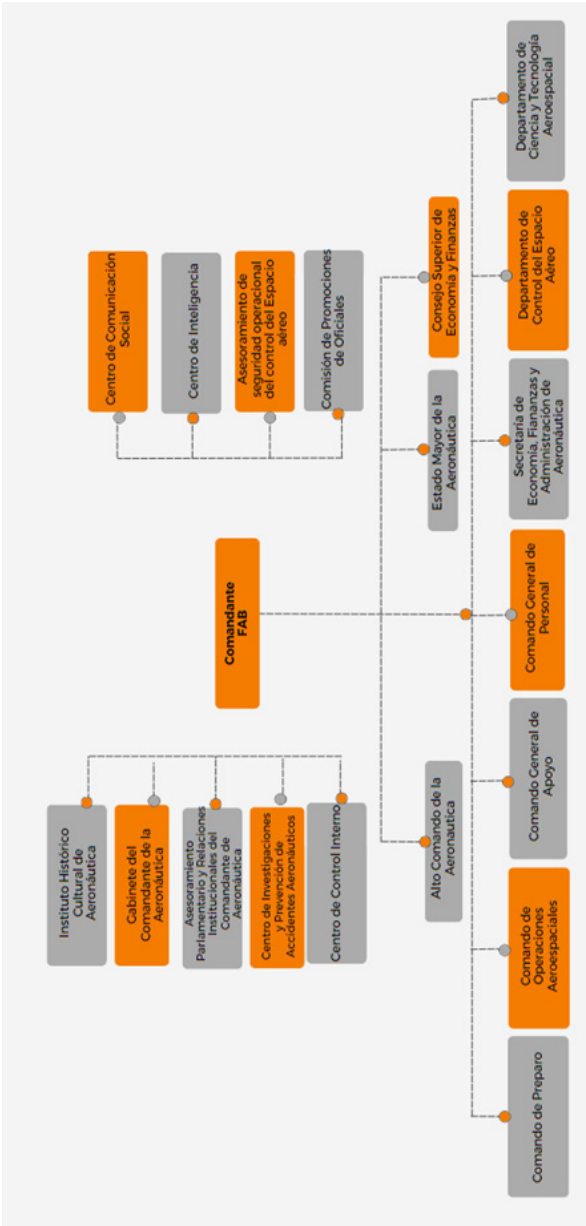
Tabla 5. *Unidades FAB con Medios para el Transporte*

No.	Unidad	Designación	Sede	Ubicación	Aeronaves
1	Primer Escuadrón del Primer Grupo de Transporte	1°/1° GT	Ala 11	Rio de Janeiro (RJ)	C-130 Hércules
2	Primer Escuadrón del Segundo Grupo de Transporte	1°/2° GT	Ala 11	Rio de Janeiro (RJ)	C-97 Brasilia C-99
3	Segundo Escuadrón del Segundo Grupo de Transporte	2°/2° GT	Ala 11	Rio de Janeiro (RJ)	KC-30
4	Primer Grupo de Transporte de Tropa	1° GTT	Ala 2	Anápolis	KC-390
5	Primer Escuadrón del Quinto Grupo de Aviación	1°/5° GAV	Ala 10	Natal	C-95
6	Primer Escuadrón del Noveno Grupo de Aviación	1°/9° GAV	Ala 8	Manaos	C-105
7	Primer Escuadrón del Décimo Quinto Grupo de Aviación	1°/15° GAV	Ala 5	Campo Grande	C-105 C-208
8	Primer Escuadrón de Transporte Aéreo	1° ETA	Ala 9	Belem	C-95 C-97 C-98
9	Segundo Escuadrón de Transporte Aéreo	2° ETA	Ala 10	Natal	C-95 C-97 C-98
10	Tercer Escuadrón de Transporte Aéreo	3° ETA	Ala 12	Rio de Janeiro	C-95
11	Quinto Escuadrón de Transporte Aéreo	5° ETA	Ala 3	Canoas	C-95 C-97 C-98
12	Sexto Escuadrón de Transporte Aéreo	6° ETA	Ala 1	Brasilia	C-95 C-97 C-98 U-55 Learjet U-100 Phenom
13	Séptimo Escuadrón de Transporte Aéreo	7° ETA	Ala 8	Manaos	C-95 C-97 C-98

Fuente: Elaboración propia con información de <https://www.fab.mil.br/transporte/>

La Fuerza Aérea Brasileña (FAB) cuenta con un total de 80.937 efectivos, distribuidos entre oficiales y suboficiales, asignados a las diferentes unidades descritas anteriormente, tal como se evidencia en la Figura 8. Asimismo, la Figura 9 muestra la organización general de la Fuerza Aérea Brasileña. El Comando de Operaciones Aeroespaciales es la sección encargada de llevar a cabo las diversas misiones aéreas y de defensa aérea de la nación (Ministério da Defesa, 2020).

Figura 8. Organigrama Fuerza Aérea Brasileira



Fuente: Elaboración propia adaptado del Livro Branco de Defesa Nacional(2020).

Doctrinalmente, la estructura de la Fuerza Aérea Brasileña (FAB) es sólida, respaldada por diversos manuales y reglamentaciones que guían las operaciones militares aéreas. Destaca el Libro Blanco de Defensa Nacional, en el que se expone la defensa del país, proporcionando una visión clara de las directrices para cada una de las fuerzas de seguridad del Estado (Ministério da Defesa, 2020).

La Fuerza Aérea Colombiana (FAC) y la Fuerza Aérea Brasileña (FAB) deben seguir generando alianzas que potencien las capacidades de ambas fuerzas, considerando por un lado la experiencia en operaciones reales de la FAC y, por otro, el potencial militar de la FAB.

Figura 9. Distribución Unidades FAB que cuentan con Aeronaves de Transporte



Fuente: Tomado de <https://www.fab.mil.br/transporte>.

5.4. Fuerza Aérea Colombiana

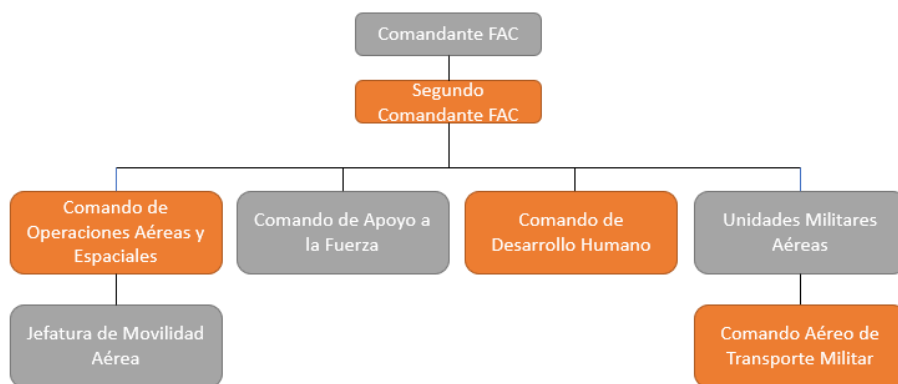
La Fuerza Aérea Colombiana (FAC) ha iniciado un proceso de actualización de la doctrina existente, con la inclusión de las nuevas capacidades adquiridas por la Fuerza. Esto ha generado, a su vez, documentos de referencia que enmarcan la operación aérea y el uso adecuado del poder aéreo, espacial y ciberespacial, impactando directamente en la seguridad y defensa de la Nación (Fuerza Aérea Colombiana (FAC), 2020). Por otro lado, el proceso de transformación de la Fuerza incluyó el ajuste de la estructura organizacional, el nuevo contexto del conflicto interno con todos sus matices, incluido el proceso de paz firmado en 2016, y las amenazas transnacionales que han surgido con el tiempo.

En la Figura 10 se representa de manera resumida la organización de la FAC, visualizando las secciones relacionadas con el transporte aéreo estratégico de la Nación, como la Jefatura de Movilidad y el CATAM.

Actualmente, la FAC cuenta con un compendio de documentos doctrinales que regulan su operación, las misiones de transporte aéreo objeto de esta investigación, y una serie de procedimientos que normatizan las diferentes situaciones que surgen en el desarrollo de este tipo de operaciones.

Respecto a la organización de la FAC, la estructura de la institución ha experimentado cambios, con mejoras en la eficiencia de cada una de las secciones y la agrupación de tareas en nuevas secciones. La Jefatura de Movilidad (JEMOV) es una de ellas, y lidera las operaciones de movilidad de la FAC, abarcando diferentes fases como el análisis de los requerimientos para su viabilidad, el planeamiento y la programación, así como la proyección del personal involucrado en dichas operaciones.

Figura 10. Nivel Jerárquico de la JEMOV y CATAM



Fuente: Elaboración propia con información tomada de <https://www.fac.mil.co/sites/default/files/linktransparencia/>

Para el transporte estratégico, la FAC cuenta con una flota de 18 aeronaves de diferentes fabricantes, como Boeing, Lockheed Martin y EADS Casa. Adjuntas a esta misión, se consideran dentro del plan aeronaves de menor envergadura, como el C-208, C-212 y C-95, distribuidas en diferentes unidades.

6. CONCLUSIONES

El transporte aéreo estratégico sigue siendo fundamental para el desarrollo y sostenimiento de las operaciones militares en todos los dominios de la guerra, asegurando la seguridad y defensa de la Nación. La FAC y sus capacidades han enfrentado dificultades relacionadas con decisiones de nivel estratégico que afectan la disponibilidad y el alistamiento de las aeronaves. La falta de medios aéreos para el transporte aéreo estratégico impacta la seguridad y defensa nacional, dificultando el transporte de material y tropas necesarios para la ejecución de los planes y la estrategia, e incluso en la materialización de algunas de las hipótesis consideradas.

Es decir, la ausencia de un transporte aéreo militar estratégico robusto y bien estructurado puede llevar al fracaso en las misiones de despliegue en los diferentes dominios, limitando la capacidad de alcanzar la superioridad aérea y la logística requerida para sostener las operaciones militares durante la guerra.

La antigüedad de las aeronaves incrementa los costos de mantenimiento y la necesidad de un programa adecuado para mantener en operación las flotas que lleguen a estos estados, además de asegurar un flujo logístico constante que permita incrementar la disponibilidad y confiabilidad de las aeronaves.

Se debe comprender la importancia del transporte aéreo estratégico para el despliegue de otras capacidades fundamentales de las diferentes Fuerzas, así como para alcanzar la superioridad aérea con los medios disponibles. Para la seguridad y defensa, debe ser una preocupación constante la falta de aeronaves suficientes para la movilización en caso de conflicto.

La oportunidad de consolidar alianzas o convenios de cooperación en transporte aéreo estratégico entre los países del continente americano, que cuenten con capacidades similares o superiores, como Brasil, podría potenciar las capacidades de los Estados participantes, tal como lo ha hecho el EATC, cumpliendo no solo con los requerimientos de transporte de personal y carga, sino también contribuyendo significativamente a la seguridad y defensa de la región.

En la complejidad del teatro de la guerra en Colombia, es necesario mantener la interoperabilidad de las Fuerzas Armadas, facilitando la movilidad y suministrando la flexibilidad que caracteriza al poder aéreo.

Adicionalmente, si se consideran los escenarios prospectivos establecidos en el PEM 2030 de 2016 y el PEMT 2042 de 2022, en los que las FFMM deben estar preparadas para enfrentar múltiples actores antagónicos simultáneamente, se puede contemplar la necesidad de establecer un Teatro de Guerra con varios Teatros de Operaciones dentro de una misma área de responsabilidad (AOR) que exceda los límites territoriales del Estado Colombiano (Fuerza Aérea Colombiana, 2022, p. 2-15). En este contexto, cubrir

diferentes teatros de operaciones requerirá la disponibilidad de los medios necesarios para apoyar la operación, donde el transporte estratégico será clave para sostener las operaciones, movilizandole la logística necesaria.

Actualmente, existen hipótesis de guerras dentro de los planes estratégicos, los cuales deberían sustentar la necesidad de fortalecer las capacidades de transporte aéreo estratégico de la Nación, contemplando leyes y proyectos de inversión que impacten en la seguridad y la defensa del país.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- EIA632A. (2021). *Processes for Engineering a System*. Information Report, SAE International. doi:<https://doi.org/10.4271/EIA632A>
- AEM. (2016). *Mejores prácticas para el diseño de Cubesats*. Foro, Secretaría de Comunicaciones y Transportes -SCT, Agencia Espacial Mexicana -AEM, Jalisco 2016. Recuperado el 12 de Julio de 2021, de <https://docplayer.es/77363921-Mejores-practicas-para-el-diseno-de-cubesats.html>
- AEM. (2019). *Secretaria de comunicacion y transportes*. Obtenido de http://www.educacionespacial.aem.gob.mx/images/normateca/pdf/CURSO_ISE/Modulo_3.pdf
- Agencia Espacial Europea. (31 de Marzo de 2022). *ESA*. Obtenido de CubeSats: https://www.esa.int/Enabling_Support/Preparing_for_the_Future/Discovery_and_Preparation/CubeSats
- Álvarez, C., & Corredor, C. (2019). *El Espacio Exterior: Una Oportunidad Infinita para Colombia*. Bogotá: Sello editorial Escuela Superior de Guerra.
- Álvarez, C., Corredor, C., Quiroga, R., & Molano, Á. (2019). Programa Espacial Colombiano. En C. Álvarez, & C. Corredor (Edits.), *El Espacio Exterior: Una Oportunidad Infinita para Colombia* (Vol. 2, págs. 265-291). Bogotá: Escuela Superior de Guerra “General Rafael Reyes Prieto”.
- Álvarez, C., Murillo, S., Hernández, J., & Urbina, J. (2019). El Poder Espacial y la Seguridad Multidimensional. En C. Álvarez, & C. Corredor (Edits.), *El Espacio Exterior: Una Oportunidad Infinita para Colombia* (págs. 19-82). Bogotá: Escuela Superior de Guerra “General Rafael Reyes Prieto” y Fuerza Aérea Colombiana.
- Baquero, F. (2022). *PODER AÉREO, ESPACIAL Y CIBERESPACIAL frente a desafíos y amenazas multidimensionales que afectan al Estado colombiano*. Bogotá: Sello Editorial Escuela Superior de Guerra.
- Barrero, D., & Baquero, F. (2022). Operaciones Espaciales de Colombia: enfoque en seguridad y desarrollo. En J. H. (ed), *Visión Aeroespacial Colombiana* (págs. 43-70). Bogotá: Sello Editorial Escuela Superior de Guerra.
- Barrero, D., Baquero, F., & Gaitán, A. (2018). La Seguridad Multidimensional y el Poder Aéreo: doctrinas de la OEA y Fuerza Aérea para fortalecer el desarrollo de la seguridad y la defensa. ¿Cuál es el nuevo panorama de Colombia? *Ciencia Y Poder Aéreo*, 13(1), 72-81. doi:<https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaereo.587>
- Becerra, J. (2014). Colombias space policy: An analysis of six years of progress and challenges. *Acta Astronáutica*, 100(1), 94-100.
- Belward, A. S., & Skoien, J. O. (2015). Who launched what, when and why; trends

- in global land-cover observation capacity from civilian earth observation satellites. ISPRS. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*(103), 115-128.
- Board, S. S., & Council, N. R. (2014). *Landsat and Beyond: Sustaining and Enhancing the Nation's Land Imaging Program*. National Academies Press.
- Bolaño-Ortiz, T. P.-F.-N. (2019). Assessment of absorbing aerosols on austral spring snow albedo reduction by several basins in the Central Andes of Chile from daily satellite observations (2000–2016) and a case study with the WRF-Chem model. *SN Applied Sciences*, 13. doi:<https://doi.org/10.1007/s42452-019-1256-z>
- Burton, J., Thompson, D., Papa, A., & Wong, A. (2022). *INTERNATIONAL SPACE COLLABORATION AND SECURITY*. Brussels, Belgium: A JOURNAL OF STRATEGIC AIRPOWER & SPACEPOWER.
- Campbell, J., Wynne, R., & Thomas, V. (2011). *Introduction to remote sensing*. Guilford Press.
- Camps, A. (2019). *Nanosatellites and Applications to Commercial and Scientific Missions*. IntechOpen.
- Capderou, M. (2014). *Handbook of Satellite Orbits*. Pasadena, California: Springer.
- Cappelletti, C., Battistini, S., & Malphrus, B. K. (2021). *Cubesat Handbook from mission desing to operations*. London: Elsevier. Recuperado el 23 de Julio de 2021, de <https://www.elsevier.com/books-and-journals>
- Center Langley Research, N. (2021). *S'COOL: Satélites observando la tierra*. Obtenido de <https://scool.larc.nasa.gov/Spanish/sats-sp.html>.
- Chandrika, N. (2006). *MILITARY USES OF SPACE*. London: The Parliamentary Office of Science and Technology.
- China National Space Administration. (2018). China National Space Administration. Obtenido de <http://www.cnsa.gov.cn/english/n6465652/index.html>
- Clemente, J. (2016). *Sistemas de iluminación de altas prestaciones aplicados a bienes de Universidad Complutense de Madrid*. Madrid, España: Facultad de óptica y optometría.
- CMMI Product Team. (2002). *Capability Maturity Model*. Integration (CMMI), Version 1.1. , Carnegie Mellon University, Software Engineering Institute.
- Congreso de la República de Colombia. (2023). *Ley 2302 de 2023 Congreso de la República*. Bogotá D.C.
- Consejo Nacional de Política Económica y Social. (2020). *POLÍTICA DE DESARROLLO ESPACIAL: CONDICIONES HABILITANTES PARA EL IMPULSO DE LA COMPETITIVIDAD NACIONAL*. Bogotá D.C.: CONPES.
- Córdoba, J., & Gago, C. (2012). Globalización, movilidad y el análisis de conectividad aérea: una herramienta para la práctica interdisciplinar. *Revista de Antropológia Social*, 111-315.
- Cortés, L. (2014). Historia espacial: Recuento histórico de su evaluación y desarrollo [en línea]. *Revista de Derecho, Comunicaciones y Nuevas Tecnologías*(12). doi:<http://dx.doi.org/10.15425/redecom.12.2014.05>
- Council of Managers of National Antarctic Programs, C. (2017). *Antartic Station Catalogue*. Christchurch, New Zealand: COMNAP and contributors.
- Dallamuta, J. P., & Rocha de Oliveira, M. (2023). Space missions in South America: Profile and evolutionary perspective of their development. *Acta Astronautica*, 9-17. doi:<https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2023.02.008>
- Defense Intelligence Agency. (2022). *CHALLENGES TO SECURITY IN SPACE*.
- Departamento de Seguridad Nacional, Presidencia de Gobierno de España. (2019). *Estrategia de Seguridad Aeroespacial Nacional*. Catálogo de Publicaciones de la Administración General de Estado.

- Dirección de Ciencia y Tecnología FAC. (2020). Anexo A. Información Cuantificable del Problema. Colombia: Fuerza Aérea Colombiana.
- Doran, T. (15 de MAY de 2006). IEEE 220: for practical systems engineering. *Computer*, 39(5), 92-94. doi:doi: 10.1109/MC.2006.164
- Duarte Muñoz, C. (02 de Abril de 2018). *Hacia el Espacio*. Recuperado el 22 de Agosto de 2021, de <http://haciaelespacio.aem.gob.mx/revistadigital/articul.php?interior=780>
- EATC. (2024). *Fact Sheet*. EATC 2024.
- ECSS. (2017). *Ingeniería Espacial - Requerimientos generales de Sistemas de ingeniería*. Noordwijk, Holanda: ESA Requirements and Standards Division. doi:<https://ecss.nl/standard/ecss-e-st-10c-system-engineering-general-requirements/>
- EIA632A. (2021). *Processes for Engineering a System*. Information Report, SAE International. doi:<https://doi.org/10.4271/EIA632A>
- Elm, J. P., Goldenson, D. R., El Emam, K., Donatelli, N., & Neisa, A. (2008). *A Survey of Systems Engineering Effectiveness - Initial Results (with detailed survey response data)*. SPECIAL REPORT CMU/SEI-2008-SR-034, Software Engineering Institute -SEI; National Defense Industrial Association - NDIA;) Systems Engineering Effectiveness Committee (SEEC) , National Defense Industrial Association. Obtenido de <http://www.sei.cmu.edu/>
- EO Sharing Earth Observation Resources. (18 de 06 de 2023). *EO Portal Directory*. Recuperado el 31 de 03 de 2020, de <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions>
- ESA, E. S. (01 de 07 de 2024). *European Space Agency, eduspace*. Obtenido de https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_ES/SEMO1U3FEXF_o.html
- ESA, ECSS-E-ST-10C. (2009). *SESS - Systems Engineering Standards And Specifications*. Norma, ECSS, Requirements & Standards Division, Noordwijk, The Netherlands. Obtenido de <http://everyspec.com/ESA/download.php?spec=ECSS-E-ST-10C.047801.pdf>
- ESA, TEC-SY/128/2013/SPD/RW. (2016). *Tailored ECSS Engineering Standards for In-Orbit. Demonstration CubeSat Projects*. ESA. TEB. Obtenido de https://copernicus-masters.com/wp-content/uploads/2017/03/IOD_CubeSat_ECSS_Eng_Tailoring_Iss1_Rev3.pdf
- Escuela Superior de Guerra “Rafael Reyes Prieto”, & Fuerza Aeroespacial de Colombia. (2019). *Volumen 2. El Espacio Exterior: Una Oportunidad Infinita para Colombia. El Cielo no es el Límite: El Futuro Estelar de Colombia*. Bogotá: Escuela Superior de Guerra “General Rafael Reyes Prieto” y Fuerza Aérea Colombiana.
- Espíndola, J. M. (2011). *Assembly and Deployment of a Ground Station for Tracking Low Earth Orbit Satellites*. II encuentro internacional y VI Nacional de Investigación en Ingeniería de Sistemas e Informática-EIISI 2011.
- Estrada, C. (21 de marzo de 2023). Se calcula que más de 80% del oro que exporta Colombia proviene del mercado ilegal [en línea]. *La República*. Obtenido de <https://www.larepublica.co/economia/se-calcula-que-mas-de-80-del-oro-que-exporta-colombia-proviene-del-mercado-ilegal-3572072>
- European Space Agency. (2019). Our activities. Obtenido de https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Transportation/Our_activities
- European Space Agency. (18 de 06 de 2023). *CEOS DATABASE*. Recuperado el 11 de 04 de 2020, de <http://database.eohandbook.com/>
- Firesmith, D. (2009). The Method-Framework for Engineering System Architectures (MFESA). *In System and Software Technology Conference (SSTC)*, 1, pág. 153. Pittsburgh, Pensilvania. Obtenido de https://resources.sei.cmu.edu/asset_files/Presentation/2009_017_001_23622.pdf

- Flemes, D. (2012). Actores estatales y regionalismo estratégico: Brasil y Colombia en el orden multipolar. En E. Pastrana, S. Jost, & D. Flemes, *Colombia y Brasil: ¿ socios estratégicos en la construcción de Sudamérica?* (págs. 25-48). Bogotá D.C.: Pontificia Universidad Javeriana .
- Fuerza Aérea Colombiana. (30 de 12 de 2020). *Estrategia para el Desarrollo Aéreo y Espacial Fuerza Aérea Colombiana 2042*. Obtenido de <https://www.fac.mil.co/edaesfac2042>
- Fuerza Aérea Colombiana. (2024). Ficha Técnica SAT - “Chiribiquete”. Bogotá, Colombia.
- Fuerza Aérea Colombiana. (2023). *Tamaño de Fuerza*. Bogotá D.C.
- Fuerza Aérea Colombiana. (08 de 06 de 2023). *Fuerza Aérea Colombiana*. Obtenido de <https://www.fac.mil.co/es/node/49725>
- Fuerza Aérea Colombiana. (12 de 06 de 2023). *Poder Espacial FAC*. Obtenido de <https://poderespacial.fac.mil.co/jefatura-de-operaciones-espaciales>
- Fuerza Aérea Colombiana. (2022). Blanco: Afectación Recursos Naturales y Medio Ambiente. Bogotá, Colombia: FAC.
- Fuerza Aérea Colombiana. (2021). *FACSAT-1 Dos años en el espacio al servicio del país*. Obtenido de <https://www.fac.mil.co/es/estamos-en-el-espacio>
- Fuerza Aérea Colombiana. (2020). *Manual de Confiabilidad Aeronáutica-MACOA*-. Bogotá D.C.: Fuerzas Militares República de Colombia.
- Fuerza Aérea Colombiana. (2020). *Manual de Doctrina Básica, Aérea, Espacial y Ciberespacial*. Bogotá: FAC.
- Fuerza Aérea, C. (2020). *Estrategia para el Desarrollo Aéreo y Espacial de la FAC*. Bogotá: Oficina de Doctrina FAC.
- Fuerza Aérea, Colombiana. (2020). *Doctrina Básica Aérea, Espacial y Ciberespacial - DBAEC*. Bogotá: Oficina de Doctrina de la FAC.
- Funes, M. (2017). *El Transporte Aéreo Estratégico como una necesidad del Nivel Operacional para el siglo XXI*. Buenos Aires: Escuela Superior de Guerra Conjunta de las Fuerzas Armadas.
- Garzón , G. (2021). Implementación de la Prueba de Vibración Aleatoria para Estructuras a Escala de Micro satélites con base en el Estandar General de Verificación de la NASA. *Tesis de grado para optar al título de Magister en Ingeniería*. Universidad del Valle.
- Giroux, H. (1997). .La pedagogía de frontera y la política del postmodernismo. *Revista Intrínquis*(6), 96.
- Greenland, S., & Clark, C. (2010). Cubesatplatformsasanon-orbit. *European Small Satellite Service Symposium*. 2010.
- Grest, H. (2022). *National Military Space Operations Centres - Requirements on National Centres with Respect to NATO Needs*. Kalkar Germany: Joint Air Power Competence Centre.
- Harvey, B., Smid, H., & Pirard, T. (2010). *Emerging Space Powers: The New Space Programs of Asia, the Middle East and South-America*. Springer.
- Hernández Sampieri, R., Fernández, C., & Baptista, M. (2014). *Metodología de la Investigación* (Sexta Edición ed.). México D.F., México: McGrawHill Education.
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la Investigación*. México: Mc Graw Hill.
- Herrera, J. F. (2011). Identification of priority themes in management of technology. In *20th International Conference For The International Association Of Management Of Technology Iamot*. Miami: North South Center University Of Miami.

- IEEE P1220. (1992). *Standard for system engineering-a commercial standard for improving competitiveness*. Norma, IEEE, Fort Worth, TX, USA. doi:<https://doi.org/10.1109/DASC.1993.283580>
- INACH. (01 de 07 de 2024). *Instituto Antártico Chileno, Ministerio de Relaciones Exteriores Gobierno de Chile*. Obtenido de <https://www.inach.cl/expedicion-antartica/bases-chilenas-en-antartica-2/base-bernardo-ohiggins/>
- INCOSE. (30 de julio de 2015). *Introduction To Model-Based System Engineering (MBSE) and SysML*. doi:<https://www.incose.org/docs/default-source/delaware-valley/mbse-overview-incose-30-july-2015.pdf>
- INCOSE. (2015). *Systems Engineering Handbook* (Cuarta ed.). (D. Walden, G. Roelder, K. Forsberg, D. Hamelin, & T. Shortell, Edits.) San Diego, California, EEUU: Wiley. Obtenido de <https://img1.wsimg.com/blobby/go/a430a7ae-a333-4c88-af76-fd5624bfbddd/downloads/INCOSE%20Systems%20Engineering%20Handbook%204e%202015%2007.pdf?ver=1604878104477>
- International Telecommunication Union. (2021). *Radio Regulations*. Obtenido de <https://www.itu.int/pub/R-REG-RR>
- INTERPOL. (28 de abril de 2022). *Los efectos devastadores de la extracción ilegal de oro en América Latina*. Obtenido de <https://www.interpol.int/es/Noticias-y-acontecimientos/Noticias/2022/Los-efectos-devastadores-de-la-extraccion-ilegal-de-oro-en-America-Latina#:~:text=La%20extracci%C3%B3n%20ilegal%20de%20oro%20destruye%20el%20medio%20ambiente%2C%20provocando,liberaci%C3%>
- IPCC, I. P. (2012). *Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC)*. Obtenido de https://archive.ipcc.ch/home_languages_main_spanish.shtml
- JAXA. (2013). *Research on the technology of space systems*. Documento informativo, Japan Aerospace Exploration Agency -JAXA. Obtenido de <https://www.kenkai.jaxa.jp/eng/research/system/system.html>
- Jimenez R, R. S. (2019). FACSAT-1 Ground Station Performance. *Instituto de Astrofísica de Canarias - IAC-19-F1.2.3*, 21-25.
- Juárez, F. (2016). La minería ilegal en Colombia: un conflicto de narrativas [en línea]. *El Ágora USB*, 16(1), 135-146. Obtenido de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1657-80312016000100007&lng=en&tlng=es
- Khlystov, N. (2023). *Space Industry Debris Mitigation Recommendations*. World Economic Forum.
- King, J. T., Kolbeck, J., Kang, J. S., Sanders, M., & Keidar, M. (2021). Performance analysis of nano-sat scale μ CAT electric propulsion for 3U CubeSat attitude control. (E. Ltda, Ed.) *Acta Astronautica*, 178, 722-732. doi:<https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.10.006>
- Kotter, J. P. (2007). *Que Hacen Los Lideres*. (G. Planeta, Ed.)
- Krebs, G. (2024). "FACSAT 2 (Chibiriquete)". *Gunter's Space Page*. Obtenido de https://space.skyrocket.de/doc_sdat/facsat-2.htm
- Lilo, J. (2020). *Impactos de la minería en el medio natural*. Obtenido de <https://www.ucm.es/data/cont/media/www/pag-15564/Impactos%20de%20la%20miner%C3%ADa%20-%20Javier%20Lillo.pdf>
- López, L. (2010). La seguridad aeroespacial en América del Norte. *Norteamérica [online]*, 5(1), 173-219. Obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-35502010000100007&lng=es&tlng=es
- Margalef, L., & Arenas, A. (2006). ¿Qué entendemos por innovación Educativa? A proposito del desarrollo curricular. *Perspectiva Educativa*, 1(47), 13-31.
- Masson-Delmotte, V. P. (2021). *Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the*

- Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University: IPCC.
- Mesa, L. R. (2019). Sistema de monitoreo de señales en tierra usando la Estación Terrena Satelital UPTC. *Artículos científicos, INGE CUC*.
- Minenergía, & UNODC. (Junio de 2023). Informe EVOA 2022. Bogotá, Colombia.
- Minenergía, Embajada de Estados Unidos, & UNODC. (2020). Colombia. Explotación de orro de aluvión. Evidencias a partir de percepción remota 2019. Bogotá, Colombia.
- Moliner González, J. A. (2023). Dimensión ética y moral de posibles conflictos militares en el espacio exterior. *Revista Iberoamericana de Filosofía, Política, Humanidades y Relaciones Internacionales*, 25(53), 335-356. doi:<https://dx.doi.org/10.12795/araucaria.2023.i53.13>
- Nanosats. (11 de 06 de 2023). *Nanosats Data Base*. Recuperado el 10 de 04 de 2020, de <https://www.nanosats.eu/>
- NASA. (2020). About NASA. Obtenido de <https://www.nasa.gov/about/index.html>
- NASA. (12 de Diciembre de 2019). *Nasa*. Recuperado el 30 de Agosto de 2021, de https://www.nasa.gov/seh/2-1_technical-processes
- NASA. (2014). *What Is a Satellite?* Obtenido de <https://www.nasa.gov/audience/forstudents/5-8/features/>
- NASA. (2007). *Systems Engineering Handbook*. Washington, D.C., Estados Unidos: National Aeronautics and Space Administration. doi:https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/nasa_systems_engineering_handbook.pdf
- Navarro, E., Jiménez, E., Rappoport, S., & Thoilliez, B. (2017). *Fundamentos de la investigación y la innovación educativa*. Universidad Internacional de la Rioja. Obtenido de https://www.unir.net/wp-content/uploads/2017/04/Investigacion_innovacion.pdf
- Navarro, V. M. (2011). European Air Transport Command: ¿ hacia unas Fuerzas Armadas europeas ? *Documento de opinion del IEEE No.14/2011*, 2-4.
- Oficina de Información científica y tecnológica para el Congreso de la Unión. (Marzo de 2023). Satélites Pequeños. (038). Ciudad de Mexico. Obtenido de https://foroconsultivo.org.mx/INCYTU/documentos/Completa/INCYTU_20-038.pdf
- Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito - UNODC. (11 de noviembre de 2023). *Colombia: Explotación de Oro de Aluvión EVOA 2022*. Obtenido de https://www.unodc.org/documents/colombia/2023/noviembre-11/Resumen_Ejecutivo_EVOA_2022.pdf
- Ortega, G. (14 de Octubre de 2009). <https://www.gr.ssr.upm.es/>. Recuperado el 22 de Agosto de 2021, de Grupo de Radiación: https://www.gr.ssr.upm.es/docencia/grado/csat/picosatelites/LN11_Sesion2_Analysis_of_Space_Missions_GOrtega.pdf
- Ospina, L., & Cabrera, F. (2021). *Estrategia de Seguridad Aérea y Espacial Nacional*. Bogotá: Escuela Superior de Guerra "General Rafael Reyes Prieto" - ESDEG.
- Planeación, D. N. (2023). *Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026*. Bogotá: Imprenta Nacional de Colombia.
- Planton, S. S.-K. (2013). *Cambio Climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* . Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América: IPCC.
- Portilla, J. (2012). LA ÓRBITA DEL SATÉLITE LIBERTAD 1. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 36(141), 491-500.

- Quiroga, R., Gutiérrez, N., Núñez, J., & Rico, Y. (2019). La Fuerza Aérea Colombiana y la Evolución del Pensamiento Estratégico del Poder Espacial. En C. Álvarez, & C. Corredor (Eds.), *Volumen 2. El Espacio Exterior: Una Oportunidad Infinita para Colombia. El Cielo no es el Límite: El Futuro Estelar de Colombia* (págs. 19-52). Bogotá: El Cielo no es el Límite: El Futuro Estelar de Colombia.
- Rendón, O. (04 de octubre de 2022). *Datos y tecnología para saber trazabilidad del oro*. Obtenido de <https://www.elcolombiano.com/negocios/datos-y-tecnologia-para-saber-trazabilidad-del-oro-DJ18774564>
- Restrepo, J. (2019). Extracción ilegal o el dinero por sobre todas las formas de vida [en línea]. *Elmundo.com*, 17, mayo. Obtenido de <https://www.elmundo.com/noticia/Extraccion-ilegal-o-el-dinero-por-sobre-todas-las-formas-de-vida/376594>
- Rincón U, S. R., Bastidas B, E. J., & Rodriguez A, C. A. (2023). *Factibilidad del desarrollo del FACSAT-2* (Vol. I). Cali, Valle del Cauca, Colombia: FAC.
- Rincón, S., Cárdenas, J., Pirazán, K., Acero, I., Hurtado, R., & Cortés, D. (2023). Critical Design of the FACSAT-2 mission CubeSat for the observation and analysis of the Colombian Territory. *Revista UIS Ingenierías*, 22(3), 69-86. Obtenido de <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistausingenierias>
- Rincón, S., Cárdenas, J., Virginia, H., & Pirazan, K. (2022). *Simposio de la IAA sobre misiones de pequeños satélites*. Congreso Astronáutico Internacional 2022.
- Rincón-Urbina, S. R., Cardenas-García, J. M., Pirazán-Villanueva, K. N., Acero-Niño, I. F., Hurtado-Velasco, R. H., & Cortés-García, E. D. (2023). Diseño crítico del nanosatélite de la misión FACSAT-2 para la observación y análisis del territorio Colombiano. *RUI*, 22(3), 68-86.
- Robledo Asencio, J. C., Rincón Urbina, S. R., Cardenas Garcia, J. M., Mendez Gomez, J. E., & Salek Chaves, D. Z. (2023). System Engineering Approach for the Implementation Project of the Colombian Aerospace Force's (FAC) Assembly, Integration, and Testing (AIT) Laboratory. *14° WETE Workshop em Engenharia e Tecnologia Espaciais*, (págs. 1-10). Brasil.
- Rodriguez A., C. A. (2019). *Implementación de una estrategia sistémica de los proyectos del programa espacial de la FAC*. Propuesta Postdoctoral, Centro de investigación en Estudios Aeroespaciales -CITAE, I+D+i, Cali.
- Rodríguez, G., Sofrony, J., Cortés, E., & Rueda, K. (2020). *Diseño de misión, síntesis de factores operacionales y representaciones del segmento espacial, caso facsat y emff*. Bogotá DC: Revista Ciencia y Poder Aéreo.
- Rodríguez-Pirateque, G. W., Sofrony E., J., Cortés G., E. D., & Rueda, K. (19 de Septiembre de 2020). Diseño de misión, síntesis de factores operacionales y representaciones del segmento espacial, caso FACSAT y EMFF. *Ciencia y Poder Aéreo*, 15(2), 143-165. doi:<https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaereo.678>
- Rojas, A. (09 de septiembre de 2023). *Con tecnología geoespacial se puede controlar la minería ilegal en Colombia*. Obtenido de <https://www.las2orillas.co/con-tecnologia-geoespacial-se-puede-controlar-la-mineria-ilegal-en-colombia/>
- Roscosmos. (2022). State Corporation for Space Activities ROSCOSMOS. Obtenido de <https://www.roscosmos.ru/29189/>
- 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.
- Salazar, A. N. (2018). *Manual de operación de estación terrena: centro de control y Monitoreo "Rodrigo Noguera Laborde"* (pág 16). Bogotá: Fondo de publicaciones de la Universidad Sergio Arboleda.
- Santé, J. M. (2017). La doctrina aeroespacial y la estrategia de seguridad aeroespacial.

- Cuadernos de estrategia*(192), 105-146. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/6268236.pdf>
- Sarafin, T. P., Doukas, P. G., McCandless, J. R., & Britton, W. R. (2007). Structures and Mechanisms. En J. R. Wertz, & W. J. Larson, *Space Mission Analysis and Design* (págs. 459–518).
- Sellers, J. J. (2007). *Understanding space: an introduction to astronautics* (Tercera ed.). (D. Kirkpatrick, Ed.) New York, New York, EEUU: McGraw-Hill.
- Sellers, J., Astore, W., Grifen, R., Larson, W., Kirkpatrick, D., Shute, A., . . . Tostanoski, M. (2015). *Understanding space: An introduction to astronautics*. McGraw-Hill Companies.
- Selva, D., & Krejci, D. (2012). A survey and assessment of the capabilities of Cubesats for Earth observation. *Acta Astronautica*, 74, 50–68. doi:<https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2011.12.014>
- Selva, D., & Krejcl, D. (2012). *A survey and assessment of the capabilities of Cubesats for Earth observation*. Cambridge, MA: ELSEVIER. *Acta Astronautica*.
- Sheard, S. A. (2000). Three Types of Systems Engineering Implementation. *Proceedings of the Tenth International Symposium of the International Council on Systems Engineering* (pág. 9). Minneapolis: INCOSE International Symposium. Obtenido de All three types. Figure 1 shows how the three types
- Shiotani, B. (2018). *Project life-cycle and implementation for a class of small satellites*. Florida, Estados Unidos: University of Florida. Recuperado el 31 de Agosto de 2021, de https://s3vi.ndc.nasa.gov/ssri-kb/static/resources/SHIOTANI_B.pdf
- Silva, C. F., Corredor, C., & Álvarez, C. (2019). Análisis de la Política Espacial Colombiana: Una perspectiva de defensa y seguridad. En Escuela Superior de Guerra “Rafael Reyes Prieto”, & Fuerza Aérea Colombiana, *El Espacio Exterior Volumen 2* (págs. 53-82). Escuela Superior de Guerra y Fuerza Aérea Colombiana.
- Silva, C., Corredor, C., & Álvarez, C. (2019). Capítulo VIII. Análisis de la política espacial colombiana: una perspectiva de defensa y seguridad. En *El espacio exterior: Una oportunidad infinita para Colombia* (Vol. 2, págs. 53-82). Bogotá, Colombia: Escuela Superior de Guerra “General Rafael Reyes Prieto”.
- Slavin, R. (2002). *Aprendizaje cooperativo: Teoría, investigación y práctica*. AIQUE.
- STARLINK. (2024). *STARLINK*. Obtenido de <https://www.starlink.com/roam>
- Tahseen HU, Y. L. (2021). X. Design of FSS-antenna-radome system for airborne. *IET Communications*, 9. doi:DOI: 10.1049/cmu2.12181
- THOT, T. (2018). *ARGUS 2000 IR spectrometer kit*. Canada: Owner´s Manual.
- Torrijos, V., & Carvajal, A. (2014). Geopolítica sistémica aplicada: un modelo para entender las dinámicas cambiantes del sistema internacional. *Revista Científica General José María Córdova*, 35-56.
- Tubio Pardavila, R. (2012). *Ingeniería de Sistemas basada en Estándares ECSS aplicada al diseño, fabricación, integración, validación y operación de pico, nano y microsátélites. Aplicación a la Constelación HUMSAT*. Vigo, España: Universidad de Vigo. doi:<https://core.ac.uk/download/pdf/54205042.pdf>
- United States Air Force. (Julio de 2019). *Air Mobility Operations*. Montgomery: Curtis E. Lemay Center. Obtenido de <https://www.af.mil/About-Us/Fact-Sheets/Display/Article/104566/air-mobility-command/>
- Universidad del Rosario. (05 de diciembre de 2022). *URosario lanza plataforma creada con el apoyo de Google.org para monitorear minería a cielo abierto usando imágenes satelitales y machine learning*. Obtenido de <https://urosario.edu.co/periodico-nova-et-vetera/urosario-lanza-plataforma->

- creada-con-google-org-para-monitorear-mineria-a-cielo-abierto
- UNODC. (julio de 2021). Colombia. Explotación de oro de aluvión. Evidencias a partir de percepción remota 2020. Colombia.
- Urbina, J. (2017). El espacio, futuro de la Fuerza Aérea Colombiana. *Ciencia y Poder Aéreo*, 12, 202-208.
- USAF. (27 de 06 de 2024). *Air Mobility Command*. Obtenido de <https://www.amc.af.mil/>
- Vergara-Escobar, F. P. (2021). Corpolaridades: cuerpos producidos en una cuidadosa Antártica. *Revista Latinoamericana de Estudios sobre Cuerpos, Emociones y Sociedad*, 24. Obtenido de [Www.relaces.com.ar](http://www.relaces.com.ar)
- Wallis, S., & David, F. (2008). *Space Observations: An Australian Perspective*. Commonwealth of Australia.
- Wasson, C. S. (2012). *Formulation and Development of the Wasson System Engineering Process Model*. ASEE Southeast Section Conferen.
- Wertz, J. R., & Larson, W. J. (2007). *Space Mission Analysis and Design*. El segundo, California, Estados Unidos: Space Technology Library. Recuperado el 30 de Agosto de 2023
- Wickramatunga, R. (2023). *United Nations Office for Outer Space Affairs*. Obtenido de The outer space treaty: <https://www.unoosa.org/oosa/en/ourwork/spacelaw/treaties/introouterspacetreaty.html>
- Woellert, K., Ehrenfreund, P., Ricco, A., & Hertzfeld, H. (2011). Cubesats: cost-effective science and technology platforms for emerging and developing nations. *Adv. Space.Res.*, 47(4), 663–684.
- Ziarnick, B. (2005). The Militarization and Weaponization of Space. *Air & Space Power Journal*, 19(2), 103. doi:<https://link.gale.com/apps/doc/A135843283/AONE?u=anon~2593f224&sid=googleScholar&xid=497dcc9e>

CAPÍTULO 9.

EL DESARROLLO ESPACIAL EN LA LUCHA CONTRA LA EXPLOTACIÓN ILEGAL DE ORO EN COLOMBIA EN EL MARCO DE LA SEGURIDAD Y DEFENSA NACIONAL

Mayor Juan Pablo Amador Pinilla

Fuerza Aeroespacial Colombiana (FAC)

<https://orcid.org/0000-0003-2004-7466>

juan.amador@fac.mil.co

1. INTRODUCCIÓN

Para el ser humano, el espacio no es un tema nuevo; por el contrario, siempre ha sido un área de profundo interés, buscando comprenderlo y alcanzarlo. Por esa razón, la humanidad ha trabajado en la creación de instrumentos para acercarse a lo que podría ser un territorio inexplorado. Las civilizaciones antiguas sentaron las bases para esa exploración, y, con el tiempo y la evolución de la humanidad, la investigación espacial se vinculó al contexto bélico. Un ejemplo de ello es la construcción del cohete V2 durante la Segunda Guerra Mundial, un misil que, aunque no tenía el objetivo de explorar el espacio, fue considerado un avance en esa dirección. Sin embargo, fue durante la Guerra Fría cuando el espacio adquirió protagonismo, en un contexto de rivalidad entre Estados Unidos y la Unión Soviética. Para estos países, la conquista del espacio se convirtió en un símbolo de superioridad tecnológica y de poder, con la luna como su principal objetivo y, más tarde, Marte, ampliando sus metas y visiones (Cortés, 2014).

A lo largo del tiempo, la naturaleza de las confrontaciones internacionales cambió. La guerra tradicional, tal como se conocía, dio paso a nuevos escenarios, en los que las armas de fuego fueron sustituidas por otros tipos de recursos, tales como la información, el conocimiento y la tecnología. Estas herramientas se convirtieron en fundamentales para obtener ventaja en los conflictos, dando origen a conceptos como el poder espacial y la seguridad multidimensional. Estos elementos pasaron a ocupar un lugar central en las agendas gubernamentales, pues la supremacía en el espacio se convirtió en una necesidad para algunos Estados, transformándose incluso en una prioridad (Álvarez, Murillo, Hernández, & Urbina, 2019).

En Colombia, la carrera espacial ha estado vinculada a la búsqueda de oportunidades para el envío de satélites de telecomunicaciones, una iniciativa que no tuvo resultados

tangibles hasta 2014 (Cortés, 2014). Aunque inicialmente se percibieron limitaciones en la capacidad espacial del país, Colombia, influenciada por tendencias externas, continuó con la intención de comprender y aprovechar el poder espacial. Así, surgió una cultura de cooperación en la que confluyeron las Fuerzas Militares, el Gobierno, la sociedad civil, la academia y los empresarios. Esta colaboración llevó a la creación de satélites y otros instrumentos espaciales. Sin embargo, Colombia aún enfrentaba desventajas en cuanto a recursos y apoyo en el ámbito espacial, lo que limitaba su capacidad frente a posibles amenazas que podrían afectar la seguridad multidimensional del país. Ante esta situación, la Fuerza Aérea Colombiana empezó a desarrollar estrategias y herramientas para hacer frente a estos nuevos riesgos, distintos a los de los campos de batalla tradicionales (Álvarez et al., 2019, p. 58).

Fue en 2006 cuando la creación de la Comisión Colombiana del Espacio marcó un hito en el país, al establecerse como el punto de coordinación para las actividades nacionales espaciales. Con el tiempo, se impulsó el desarrollo de una agenda espacial nacional, que culminó con la creación del Programa Presidencial para el Desarrollo Espacial Colombiano. Posteriormente, la investigación y el desarrollo espacial en las instituciones se fortalecieron, basándose en lo dispuesto en el Plan Nacional de Desarrollo y la Política de Defensa y Seguridad del 2019. En este contexto, la Fuerza Aérea Colombiana fue designada como la responsable de desarrollar y liderar las capacidades de poder aéreo y espacial del país, con el objetivo de enfrentar los desafíos y riesgos que amenazan el territorio nacional (Quiroga, Gutiérrez, Núñez, & Rico, 2019).

El concepto de seguridad multidimensional ha cobrado relevancia en este proceso, debido al aumento de amenazas como el cambio climático, las migraciones, las pandemias y los problemas sociales como el narcotráfico, la pobreza y la minería ilegal (Barrero, Baquero, & Gaitán, 2018). Esta última es una de las principales problemáticas que enfrenta Colombia, especialmente la minería ilegal de oro, que representa el mayor porcentaje de las transacciones en este sector. Se estima que el 80% del oro exportado por Colombia proviene de fuentes ilegales (Estrada, 2023). Este fenómeno muestra la necesidad urgente de desarrollar estrategias que utilicen el poder espacial para combatir la minería ilegal y mitigar sus efectos negativos. Los avances tecnológicos del desarrollo espacial de la Fuerza Aérea Colombiana, enfocados en la investigación, el desarrollo y la innovación, permiten una respuesta más efectiva ante estos desafíos.

La pregunta central de esta investigación surge a partir de la problemática relacionada con la minería ilegal de oro en Colombia y los avances en el desarrollo espacial de la Fuerza Aérea: ¿Cómo contribuye el desarrollo espacial a la lucha contra la explotación ilegal de yacimientos mineros de oro en Colombia en el marco de la seguridad y defensa nacionales? Este estudio busca abordar esta cuestión a través del objetivo general: Revisar la contribución del desarrollo espacial como una herramienta de la seguridad y defensa nacional en la lucha contra la explotación ilegal de oro en Colombia.

Los objetivos específicos que guían esta investigación son: Identificar las tecnologías espaciales disponibles para la detección de la explotación ilegal de oro en Colombia, analizar los avances tecnológicos en infraestructura espacial de la Fuerza Aérea Colombiana y su aplicación en la lucha contra la minería ilegal de oro, y explicar los efectos ambientales de esta minería ilegal entre 2019 y 2022, en el contexto de la seguridad y defensa nacionales.

La metodología utilizada es cualitativa y se apoya en la revisión documental, lo cual es fundamental para entender la situación de la minería ilegal en Colombia y cómo el desarrollo espacial puede contribuir a reducir su impacto en los diferentes ámbitos del país, incluyendo la seguridad y la integridad del territorio colombiano.

Palabras clave: daños medioambientales, desarrollo sostenible, minería ilegal, poder espacial, seguridad y defensa nacionales.

2. REVISIÓN DE LA LITERATURA

Investigaciones sobre la relación entre el espacio y la seguridad multidimensional

Diversas investigaciones y publicaciones han abordado el tema de la seguridad multidimensional y su relación con los avances espaciales. Algunas de estas investigaciones exploran ambos conceptos en conjunto, mientras que otras se enfocan en uno de los temas, aunque indirectamente los conectan. Un estudio clave de (Robledo Asencio, Rincón Urbina, Cárdenas García, Méndez Gómez y Salek Chaves, 2023) trata sobre la implementación de tecnologías en la Fuerza Aeroespacial Colombiana (FAC) y la Escuela Militar de Aviación (EMAVI), además de la gestión de actividades AIT (Assembly Integration and Testing) en sistemas espaciales.

En esta investigación, los autores destacan las mejoras técnicas de la fuerza laboral nacional y la identificación de necesidades para el desarrollo de capacidades tecnológicas espaciales. El estudio también menciona que el avance del sector espacial colombiano está vinculado al desarrollo del aire y el espacio, con una proyección para 2042 de la FAC. Asimismo, resaltan la importancia del Laboratorio AIT de la FAC, que, según los autores, es fundamental para acelerar la industria aeroespacial del país y sus programas espaciales. No obstante, subrayan que es esencial aplicar un enfoque de ingeniería de sistemas para concretar el funcionamiento del laboratorio AIT de la FAC.

Por otro lado, el artículo “Critical Design of the FACSAT-2 mission CubeSat for the observation and analysis of the Colombian Territory” (Rincón, Cárdenas, Pirazán, Acero, Hurtado y Cortés, 2023) presenta el diseño del CubeSat FACSAT-2, que forma parte de la misión espacial FACSAT-2. Este CubeSat tiene como función la observación y análisis georreferenciado del territorio colombiano. La misión contribuye al monitoreo de los gases de efecto invernadero mediante la recolección de imágenes espectrales.

En la investigación, los autores detallan las especificaciones técnicas del nanosatélite y el desarrollo de una Placa de Circuito Impreso (PCB), lo que facilita la producción de placas espaciales en el país. Además, mencionan que la información obtenida por el satélite es asegurada por un software especializado (AES) para cumplir con las medidas pictográficas de la misión FACSAT-2. Con esta misión, se complementa el sistema aeroespacial de Colombia (Rincón et al., 2023).

Un tema similar es abordado por Rincón, Cárdenas, Virginia y Pirazán (2022) en relación con el programa FACSAT. Este programa, propuesto por la FAC como parte de COLAF (Colombian Air Force), lanza en órbita el CubeSat 3U FACSAT-1, lo que marca el inicio de la FAC como operador satelital. Según los autores, COLAF busca dar continuidad al programa FACSAT-1 mediante la autonomía en el diseño de la misión, lo cual se

facilita con la transferencia de conocimientos proporcionada por GomSpace al Centro de Investigación de Tecnologías Aeroespaciales (CITAE). Además, se verifica y valida la producción de productos espaciales nacionales, como el laboratorio AIT CUBO-2.

Durante el simposio, los autores exponen que sus estudios se enfocan en la investigación, desarrollo e innovación (I+D+i), lo que resulta en el CubeSat 6U FACSAT-2. Este CubeSat cuenta con herramientas especializadas para la medición y análisis de gases de efecto invernadero, entre ellas, un sensor electroóptico y una carga secundaria. Como resultado de este proceso, se desarrollan placas electrónicas de grado espacial, junto con un software de cifrado y otro de control de misión, que permiten la planificación y el seguimiento de satélites en órbita (Rincón, Cárdenas, Virginia y Pirazán, 2022).

Finalmente, los autores resaltan la capacidad de transferir conocimientos sobre plataformas satelitales y la planeación de instalaciones para el desarrollo de productos espaciales altamente funcionales. También abogan por la promoción de estrategias que fortalezcan la capacidad del Centro de Investigación y el Programa Espacial Colombiano, con el fin de generar nuevas misiones (Rincón et al., 2022).

La Escuela Superior de Guerra “Rafael Reyes Prieto” y la FAC publicaron en 2019 dos volúmenes que analizan el poder aeroespacial y la seguridad multidimensional desde distintas perspectivas. El primer volumen, titulado *“El Espacio Exterior: Una oportunidad infinita para Colombia”*, aborda temas como la geopolítica del espacio exterior y su relación con la seguridad multidimensional. El segundo volumen, *“El espacio Exterior: El Cielo no es el Límite: El Futuro Estelar de Colombia”*, se centra en las políticas públicas y la política espacial colombiana, así como en los resultados de investigaciones sobre el Programa Espacial Colombiano.

En otro estudio, Silva, Corredor y Álvarez (2019) presentan un caso hipotético sobre la importancia de los servicios satelitales para la seguridad nacional, y cómo la falta de un satélite en órbita geostacionaria puede afectar las comunicaciones y poner a Colombia en desventaja frente a sus adversarios. Estos autores argumentan que la autonomía de capacidades espaciales es una necesidad urgente para la seguridad y defensa nacional, y analizan las iniciativas gubernamentales para evaluar su efectividad, sugiriendo que el gobierno debe impulsar el desarrollo de recursos espaciales autónomos.

Por último, Álvarez, Murillo, Hernández y Urbina (2019) abordan cómo el espacio exterior ha estado vinculado con las primeras guerras mundiales y la Guerra Fría, y cómo ha evolucionado hasta convertirse en un componente clave de la seguridad multidimensional. En su estudio, se enfoca en la seguridad multidimensional, tomando en cuenta la influencia del poder espacial, y revisa cómo las amenazas actuales como el cambio climático, el narcotráfico, el terrorismo y la minería ilegal deben ser abordadas desde una perspectiva de seguridad más amplia (Álvarez et al., 2019).

3. METODOLOGÍA

Tomando como punto de referencia el objetivo de la investigación, se determinó que el enfoque de la misma es de tipo cualitativo. Este enfoque busca comprender la realidad de una situación y promover su transformación. Es importante mencionar que, en este enfoque, la realidad se filtra a través del investigador (Navarro, Jiménez, Rappoport, & Thoilliez, 2017). En este caso, se aplica dicho enfoque para entender la realidad

del desarrollo espacial en el país y, por ende, de la minería ilegal, particularmente en los yacimientos ilegales de oro. Una vez comprendidas estas realidades, se busca transformar esta problemática a través del análisis y la explicación de la contribución que realiza la Fuerza Aérea Colombiana (FAC) con sus instrumentos y desarrollos tecnológicos, los cuales representan el poder espacial en la lucha contra la extracción ilegal de oro en el país.

Se aplicó un método cualitativo de lógica inductiva, el cual utiliza el análisis y el razonamiento para obtener deducciones que conduzcan a conclusiones generales (Hernández Sampieri, Fernández, & Baptista, 2014). En esta situación particular, esto implica analizar la explotación ilegal de yacimientos mineros de oro en Colombia y el desarrollo espacial logrado por la FAC para mitigar este fenómeno. Posteriormente, se generarán conclusiones que permitirán al investigador definir cuál es la contribución de dicho desarrollo y avances en el área espacial.

La técnica de investigación utilizada fue la revisión documental, la cual se apoyó en una matriz de revisión en Excel, donde se filtraron las fuentes que cumplieran con los criterios de inclusión, tales como el año de publicación, el tema, la pertinencia y el objeto de estudio. Estas fuentes secundarias fueron obtenidas de bases de datos y motores de búsqueda académicos como Scielo, Dialnet, repositorios de universidades, EBSCO, Google Académico, entre otros. Finalmente, se aplicó la técnica de entrevista a personal que labora en unidades relacionadas con el desarrollo espacial de la FAC. Estas entrevistas serán semiestructuradas y la información obtenida se incorporará en el documento final.

4. DESARROLLO Y RESULTADOS

4.1 Tecnologías espaciales utilizadas en la detección de la explotación ilegal de oro en Colombia

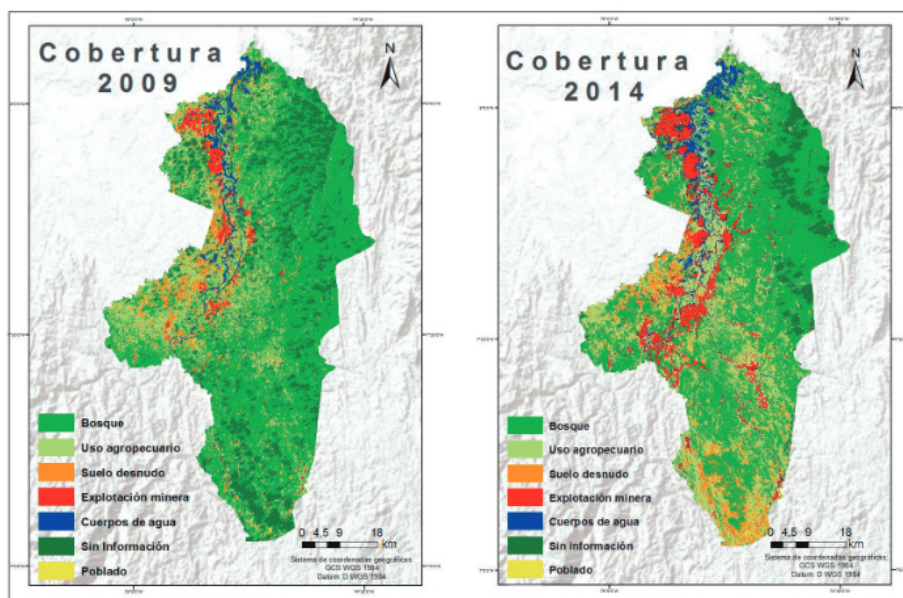
De la misma forma que ocurre en otros países, Colombia ha enfrentado un conflicto armado caracterizado por una evolución constante, resultado de la inversión en material bélico y el fomento de actividades que, a largo plazo, forman parte de la financiación de economías ilegales, generalmente manejadas por estructuras criminales que ejercen algún tipo de dominio en diversas zonas del país (Dirección de Ciencia y Tecnología FAC, 2020).

Según Lilo (2020), una de las consecuencias de la expansión de este tipo de economías ilícitas en el país es la afectación de varios ecosistemas acuáticos y terrestres. Como consecuencia, el desarrollo social y la economía del país también deben enfrentar los efectos generados por estas economías ilícitas, que han evolucionado de manera constante, incluso después de la firma del Acuerdo de Paz con las extintas FARC-EP en 2016. En ese momento, se suponía que este flagelo llegaría a su fin y que actividades como la extracción ilegal de oro dejarían de ser una problemática nacional.

- ***La evolución de la minería ilegal en Colombia en el periodo 2009 y 2014***

El crecimiento del número de minas o yacimientos ilegales, entre ellos los de oro, ha dado inicio a una campaña que, a pesar de los cambios de gobierno, continúa siendo una prioridad. Este aumento y la evolución del flagelo se evidencian en el informe del estudio “Cambio de cobertura del suelo por minería aluvial en el río Nechí, Antioquia (Colombia)” (Monroy y Armenteras, 2017), el cual describe que, en 2014, los bosques en la zona circundante al río Nechí, en Antioquia, presentaron una reducción del 7% como consecuencia de la instalación de actividades agropecuarias y de explotación minera a cielo abierto. Esta actividad creció aproximadamente 35.070 hectáreas, lo que genera una alarma para la creación de políticas públicas orientadas a mitigar el impacto de la minería en esta zona y evitar la pérdida de los recursos naturales del país, como se muestra en la Figura 1.

Figura 1. *Evolución de la presencia de explotación minera en la región*



Fuente: (Monroy y Armenteras, 2017, p.54).

Es evidente que este fenómeno ha ido en ascenso durante este periodo, con un aumento notable en la región antioqueña. Sin embargo, en términos generales y a nivel nacional, la minería ilegal presenta un panorama complicado. Para el año 2012, alcanzaba el 80% de la actividad minera en el país, y para 2015, el 65 % de los territorios mineros eran ilegales, lo que indica que, en ese mismo año, la cobertura de la minería ilegal alcanzaba el 92 % (Juárez, 2016).

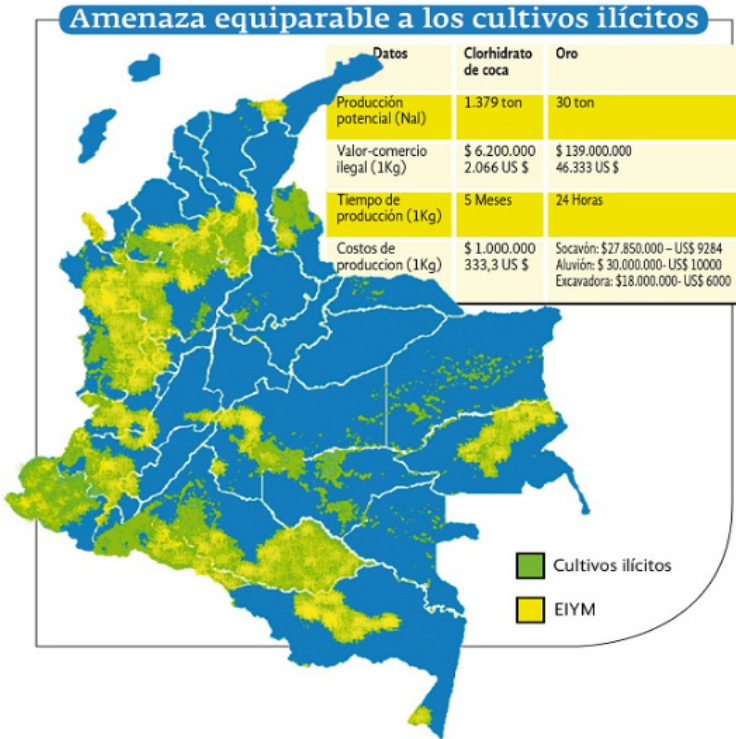
- ***La minería ilegal entre 2016 y 2020***

Hasta el año 2019, la extracción ilícita de minerales alcanzó un 81,25 %, lo que evidencia el crecimiento constante de este fenómeno a lo largo del país. Este panorama también muestra que el problema podría seguir incrementándose debido a la ausencia de una normativa o herramienta jurídica adecuada para enfrentarlo (Restrepo, 2019). Después de 2015, 26 de los 32 departamentos y 340 municipios de Colombia reportaron problemas relacionados con la extracción ilegal de minerales. Esto marcó lo que podría interpretarse como el primer antecedente de la intervención de las Fuerzas Armadas, un cuerpo militar destinado a recuperar los territorios ocupados por los grupos armados para la minería ilegal, y además, a proteger los recursos naturales para evitar que el impacto de esta actividad ilícita se extendiera al ecosistema (Restrepo, 2019).

En términos de cifras, entre 2017 y 2019, la minería ilegal se expandió a 25 nuevos municipios, pasando de 315 a 340 municipios, lo que representa un aumento del 7,35% en comparación con 2017. De estos, 187 municipios practicaban la explotación aurífera, 98 la extracción de material de arrastre, y 55 la minería de carbón (Restrepo, 2019). Según Restrepo (2019), la extracción de oro fue la más común durante este periodo, y su impacto es comparable con la amenaza que representan los cultivos ilícitos. De los 340 municipios, 187 presentan zonas de extracción de oro, un fenómeno que entre 2015 y 2019 creció un 45% (Figura 2).

La extracción ilegal de oro forma parte de la economía ilícita vinculada a los grupos armados organizados. Este metal genera mayores ganancias, ya que mientras estas organizaciones recibían al menos seis millones de pesos por un kilo de clorhidrato de cocaína, un kilo de oro representa aproximadamente 140 millones de pesos. Por esta razón, la minería ilegal se ha convertido en una opción preferida para financiar las actividades de estos grupos armados (Restrepo, 2019).

Figura 2. Producción y ganancias del clorhidrato de Coca vs. Oro en Colombia



Fuente: (Restrepo, 2019).

- ***La exploración de yacimientos mineros ilícitos en Colombia después del 2021***

De acuerdo con el “Informe sobre la Explotación de Oro de Aluvión 2022” (2023) de la Oficina de las Naciones Unidas Contra la Droga y el Delito (UNODC), en 2021, 98.567 hectáreas fueron ocupadas por actividades mineras en Colombia (tanto legales como ilegales). En 2022, la superficie ocupada por la minería ilegal alcanzó las 69.123 hectáreas de un total de 94.733, lo que refleja una reducción en la ocupación general de la minería. Sin embargo, cuando se analiza específicamente la minería ilícita, se observa un aumento aproximado del 73% con respecto al año anterior, lo que equivale a un incremento de al menos 5.000 hectáreas más (p. 4).

En el país, las cifras son descritas de la siguiente manera:

- Los resultados muestran que 13 de los 32 departamentos presentan Explotación de Oro de Aluvión (EVOA) en tierra, con un total de 94.733 hectáreas, concentrándose principalmente en tres departamentos: Chocó, Antioquia y Bolívar, que agrupan el 85% del total nacional. Chocó ocupa el primer lugar con 37.841 hectáreas, lo que representa el 40% del total consolidado, siendo

también la región con mayor concentración de explotación ilícita, con 33.938 hectáreas. Los departamentos de Putumayo, Valle del Cauca, Córdoba y Nariño muestran incrementos superiores al 11%.

- En el ámbito municipal, 101 municipios (9%) de los 1.122 del país registraron EVOA en tierra. Diez municipios concentran el 56% del total nacional (52.896 hectáreas): Nechí, Zaragoza, El Cantón de San Pablo, Nóvita, Cáceres, Ayapel, Istmina, El Bagre, Río Quito y Unión Panamericana, de los cuales se extrajo el 21% de la producción nacional. El 70% de la explotación de oro de aluvión con maquinaria en tierra en estos diez municipios se realizó fuera de cualquier marco legal o dentro de la categoría de explotación ilícita (36.872 hectáreas). (Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito - UNODC, 2023, p. 4)

Como se evidencia en el párrafo anterior, las cifras presentadas en el informe de la UNODC revelan que esta problemática sigue en aumento, a pesar de la firma del Acuerdo de Paz y de las negociaciones que se llevan a cabo con otros grupos criminales. La minería ilegal ha monopolizado la economía ilícita en ciertas regiones representativas del país, lo que está contribuyendo al crecimiento constante de este fenómeno, cuyas consecuencias no solo afectan la economía nacional, sino también el medio ambiente. Los efectos producidos por los químicos y otros métodos utilizados en la minería afectan gravemente los ecosistemas y las fuentes hídricas.

Además, la seguridad también se ve impactada por este fenómeno, ya que la minería ilegal constituye una de las principales fuentes de financiación para los grupos armados ilegales. Esto les permite fortalecer su poder con mayor fuerza y armamento, lo que a su vez perpetúa una cadena de violencia en la que estos grupos buscan dominar territorios, afectando la seguridad y la soberanía nacional. Es en este contexto cuando las Fuerzas Militares adquieren protagonismo, enfocándose en la protección de la población, el medio ambiente, los recursos naturales, así como en salvaguardar la soberanía y la seguridad del país.

- ***Tecnologías espaciales en Colombia útiles en la detección de yacimientos ilegales de oro***

Como parte de la lucha contra la minería ilegal, especialmente la de oro en diferentes zonas del país, el gobierno nacional, junto con diversas autoridades ambientales y administrativas, ha implementado estrategias para frenar este flagelo. En este contexto, se ha identificado la necesidad de seguir la trazabilidad del oro para determinar quiénes están involucrados en esta actividad ilícita (Rendón, 2022).

El interés en utilizar la tecnología para eliminar las minas ilegales de oro y otros minerales extraídos ilegalmente, los cuales posteriormente son exportados, surge de la consolidación del negocio y del incremento de las toneladas exportadas sin ningún tipo de legalidad. Es por ello que los gobiernos han recurrido a la tecnología para facilitar esta tarea. Investigaciones como “Tras el oro turbio” se han enfocado en identificar características específicas para entender cómo funciona este negocio en el país (Rendón, párr. 2).

Uno de los avances más recientes en este ámbito ocurrió en 2021 con la creación de una plataforma para establecer la trazabilidad de la minería ilegal en Colombia. Sin embargo, inicialmente no contaba con la capilaridad necesaria, lo que dificultó su

implementación. La posterior creación de un “Sandbox” permitió establecer las bases de un ejercicio experimental en el que participaron más de 7.000 personas, incluidas autoridades mineras, comerciales, financieras y del Estado (Rendón, párr. 3).

Como resultado de esta colaboración, 35 empresas tecnológicas formaron un consorcio de 10 Operadores Tecnológicos de Trazabilidad de Minerales (OTTM), desarrollando 10 plataformas que buscan obtener datos transaccionales que deben ser aprobados por el gobierno nacional. De esta manera, se valida la identidad de los mineros, evitando la suplantación en este negocio ilegal (Rendón, párr. 4-5).

A pesar de los esfuerzos, hasta 2022 aún se consideraba un reto el establecimiento de un mecanismo para localizar y detener el origen de la explotación, debido a la imposibilidad de utilizar un GPS, según lo estipulado en la Ley de Habeas Data (párr. 6). Si bien se reconoce la necesidad de este tipo de tecnología, aún no se había implementado una herramienta aeroespacial capaz de identificar el trazado de los productos.

Sin embargo, en 2022, un grupo de estudiantes de la Universidad del Rosario presentó lo que podría considerarse el inicio de la tecnología geoespacial para la localización de yacimientos. La plataforma “CoMiMo” (abreviatura de “Colombian Mining Monitoring”), creada con el apoyo de Google.org, se convirtió en una herramienta de libre acceso que, mensualmente, busca minas a cielo abierto en el país y determina su ubicación (Universidad del Rosario, 2022).

El acceso a esta plataforma, administrada por la Facultad de Economía del Claustro Universitario, se puede realizar a través de un PC o dispositivo móvil. Utiliza imágenes de alta resolución proporcionadas por el Gobierno de Noruega, bajo la iniciativa “Norway’s International Climate and Forest Initiative” (NICFI), que las autoridades nacionales utilizan para planificar, tomar decisiones y ejecutar acciones en la lucha contra la minería ilegal (Universidad del Rosario, párr. 4-5).

Esta iniciativa de la Universidad del Rosario sienta las bases para continuar explorando el uso de la tecnología geoespacial como una herramienta clave en la lucha contra la minería ilegal y, por ende, en la protección del medio ambiente. De hecho, en 2023, las cifras revelaron que el Comando contra el Narcotráfico y Amenazas Transnacionales del Ejército Nacional de Colombia intervino 163 yacimientos ilegales en el país, los cuales habían afectado el medio ambiente (Rojas, 2023).

Los avances hasta ahora obtenidos demuestran los beneficios del uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), que emplean mapas geoespaciales para localizar nuevos yacimientos, determinar las minas con cobertura vegetal y georreferenciar la fauna y flora presentes en las regiones a intervenir (Rojas, párr. 5). Así, se destaca la capacidad del Sistema Geoespacial ArcGIS para crear modelos tridimensionales del terreno, procesar imágenes, realizar análisis espaciales y colaborar interinstitucionalmente, mostrando la importancia de la tecnología geoespacial en la identificación y control de la minería ilegal, con un enfoque en la preservación del medio ambiente y la toma de decisiones (Rojas, párr. 6).

Es evidente que, en Colombia, la incorporación de la tecnología geoespacial ha avanzado mediante el uso de herramientas como el SIG de Esri Colombia, que desde 2022 ha sido reconocida como la herramienta más efectiva para prevenir impactos ambientales causados por la minería ilegal.

Simultáneamente a los avances de las universidades, la Fuerza Aérea Colombiana (FAC) ha tomado la iniciativa en la aplicación de tecnología satelital y software, considerando la evolución del conflicto armado en Colombia. Esta innovación generó una disrupción con las plataformas de inteligencia aérea (aeronaves equipadas con sensores especializados que realizan inteligencia técnica, de señales e imágenes). A finales de los años 90, la FAC comenzó a utilizar estas tecnologías para identificar el uso ilícito de territorios, como las pistas ilegales utilizadas por narcotraficantes y grupos armados en zonas de distensión asignadas a las FARC. Esta situación crítica aceleró la evolución de la inteligencia aérea, con la adquisición de sistemas como Erdas, ArcGIS y Global Maps, así como radares de apertura sintética, sensores ADS-40 y Lidar, que fueron cruciales para neutralizar a los líderes de las FARC.

A partir de 2007, la FAC comenzó a adquirir imágenes satelitales de empresas canadienses e italianas, con el objetivo de obtener productos en tiempo real, lo que garantizó la sorpresa estratégica sobre el enemigo (imágenes tomadas sin necesidad de aviones, evitando ruido y facilitando bombardeos).

A finales de 2012, en el marco de las negociaciones de paz con las FARC, la minería ilegal de oro se convirtió en un fenómeno en auge, especialmente en departamentos como Bolívar, Antioquia, Córdoba y Chocó. Estos departamentos, afectados por grupos armados organizados como las FARC, ELN y el Clan del Golfo, vieron en la inteligencia aérea de la FAC una herramienta esencial para abordar este fenómeno ambiental, en colaboración con la Policía Nacional y la Fiscalía General de la Nación. Esta evolución condujo a la creación del Centro Nacional de Observación Ambiental (CENOA), que, junto con el Centro de Investigación y Tecnologías Espaciales (CITAE), impulsó el uso de capacidades satelitales para la detección de deforestación, explotación ilegal de yacimientos mineros y análisis de gases de efecto invernadero en Colombia.

Actualmente, la Fuerza Aérea Colombiana (FAC), a través del Centro Nacional de Observación Aeroespacial (CENOA), dependiente de la Subdirección de Inteligencia Aérea, cuenta con una capacidad estratégica destacada para la adquisición oportuna de imágenes satelitales multispectrales, ópticas y de radar. Estas imágenes se obtienen mediante la estación terrena satelital, la cual permite obtener información del territorio nacional directamente desde el espacio, generando presencia nacional y regional en temas geoespaciales. Este sistema cumple con los requerimientos especializados de diversas entidades del Estado, abarcando áreas como el desarrollo urbano, la seguridad social, el crecimiento rural, las actividades agrícolas, la prevención de desastres y el monitoreo de áreas protegidas, entre otros fines del Estado.

Además, la FAC dispone de 23 plataformas de Inteligencia Aérea tripuladas y seis bases de lanzamiento para aeronaves no tripuladas, que realizan misiones de inteligencia, vigilancia y reconocimiento. Estas plataformas están equipadas con tecnologías avanzadas como sensores LIDAR, tecnología FLIR, y aerofotografía vertical de alta definición con resolución espacial submétrica de hasta cinco centímetros. Estos equipos han permitido a la FAC tomar decisiones estratégicas, desarrollar planes tácticos y operativos, y gestionar de manera eficiente las emergencias y amenazas emergentes, contribuyendo al cuidado de la infraestructura urbana y rural, así como al monitoreo del medio ambiente y de la infraestructura crítica de la nación. Todo esto en cumplimiento con su misión de defender la soberanía, independencia, integridad del territorio nacional y el orden constitucional (SUINA, 2023).

En este contexto, se destacan dos importantes softwares desarrollados para la detección de actividades mineras. El primero es el software creado por la Universidad del Rosario, que permite el monitoreo y detección de minería a cielo abierto y la atención a fenómenos ambientales. Paralelamente, en julio de 2024, se lanzó el software GEOMASK, creado por el CITAE-FAC, el cual utiliza inteligencia artificial e imágenes georreferenciadas tomadas por el satélite FACSAT-2. Este software está diseñado para detectar y hacer seguimiento a las áreas afectadas por la explotación ilegal de oro, facilitando el planeamiento de operaciones estatales para neutralizar este daño ambiental.

La FAC también mantiene el seguimiento de la actividad minera ilegal mediante sensores especializados a bordo de aeronaves de inteligencia y el satélite SATFAC-2. Ambos dependen de tecnología espacial avanzada para generar productos de monitoreo precisos. Además, la FAC cuenta con el software “Kairos”, que permite analizar la telemetría recibida desde el satélite, graficarla y brindar herramientas para el análisis y procesamiento de la información, identificando patrones en las variables satelitales que generan alertas (CITAE, 2024).

4.2 Avances en infraestructura espacial de la Fuerza Aérea Colombiana y su aplicación en la lucha contra la explotación ilegal de oro en Colombia

Figura 3. Capacidades de Inteligencia Aérea, Espacial y Ciber Espacial de la FAC



Fuente: (SUINA, 2023), (subdirección de Inteligencia y Espacial).

Paralelamente a los avances educativos generados en las universidades y la Fuerza Aérea Colombiana (FAC), esta última lideró un convenio con Ecopetrol y CODALTEC (Corporación de Alta Tecnología), con el objetivo de desarrollar, para el año 2023, el proyecto de monitoreo mediante el nanosatélite SAT2 “Chiribiquete”. Este satélite está

diseñado para abordar el territorio nacional colombiano, especialmente las áreas donde Ecopetrol lleva a cabo sus operaciones. Su propósito principal es identificar cambios en el terreno, detectar la deforestación, observar las alteraciones en los ecosistemas y monitorear las emisiones de gases de efecto invernadero para poder implementar medidas de mitigación.

- ***El Programa Espacial y la Política Colombiana del Espacio como Antecedentes para los Avances de la infraestructura espacial de la FAC***

No obstante, para alcanzar el convenio que se concretó en 2023, primero fue necesario establecer un programa espacial en el país, orientado a responder a retos inéditos en comparación con los ya conocidos, y enfocados en la seguridad y la defensa. Estos nuevos desafíos están relacionados con la identificación de recursos o medios para prevenir la degradación ambiental, fortalecer la educación y generar competitividad, lo que permitiría al país ponerse a la vanguardia de naciones con mayor desarrollo en áreas como la economía, telecomunicaciones, transporte y relaciones internacionales (Álvarez, Corredor, Quiroga, & Molano, 2019).

La globalización y la evolución del conflicto armado en Colombia muestran al espacio exterior como una zona llena de oportunidades para desarrollar tecnologías espaciales, que traen consigo nuevos actores, retos y objetivos. Esto permite al país explorar y generar conocimiento a partir de su posición geoestratégica, promoviendo la transferencia de conocimiento teórico a un campo más práctico.

Sin embargo, para lograr competitividad en el espacio exterior, fue necesario que se creara la Comisión Colombiana del Espacio (CCE), cuya misión es “coordinar, planificar y liderar la implementación de políticas nacionales para el desarrollo y aplicación de tecnologías espaciales, así como la generación de planes y programas en el sector” (p.273). Así nació la Política Espacial Nacional, que establece las acciones y estrategias que guían a las agencias civiles y militares, las cuales deben colaborar de manera sincrónica para satisfacer las necesidades y prioridades del país en términos de seguridad y desarrollo.

A pesar de estos esfuerzos, como se evidenció en el título anterior, el país aún enfrenta importantes vacíos en el ámbito espacial y en el desarrollo de infraestructura relacionada. Por ello, la Política Espacial ha sido objeto de varias críticas, señalando la debilidad derivada de la falta de lineamientos claros sobre los procesos administrativos necesarios para generar conocimiento a través de la investigación en temas relacionados con el espacio exterior (Becerra, 2014).

Estas debilidades, identificadas a lo largo de los años, han llevado a diferentes gobiernos a considerar como parte fundamental de sus Planes de Desarrollo la investigación y la innovación en el ámbito espacial. Sin embargo, como ha sucedido históricamente, la ausencia de inversión en este tipo de proyectos ha obstaculizado el progreso. Esto se reflejó en las oportunidades previas en las que se intentó concretar la adquisición de satélites de telecomunicaciones y observación de la Tierra, pero no se lograron concretar debido a la falta de inversión (Álvarez, Corredor, Quiroga, & Molano, 2019).

• ***Evolución de la infraestructura espacial de la FAC***

En Colombia, el peligro latente de una posible invasión de la soberanía por parte del gobierno nicaragüense o los ataques que podrían ser perpetrados por los grupos armados organizados desde el otro lado de la frontera venezolana representa una de las razones por las que se reconoce la inminente necesidad de invertir en la investigación y la tecnología espacial que contribuya a la seguridad y la defensa del país (Silva, Corredor, & Álvarez, 2019). Estas amenazas se suman a los vacíos encontrados en materia de inversión en la investigación de tecnología y en el espacio exterior, lo que ha impulsado y orientado los cambios en el desarrollo espacial, los cuales se evidencian en el Plan Estratégico de Desarrollo Espacial colombiano, diseñado para aprovechar las ventajas que la tecnología espacial puede proporcionar, incluso, en la seguridad del territorio nacional.

Es en este contexto donde la Fuerza Aérea asume una de sus responsabilidades más importantes, al crear en 2012 el Departamento de Asuntos Espaciales y, posteriormente:

llevó a cabo el lanzamiento de un nanosatélite de observación de la Tierra en el año 2018 (...). Con este sistema, adquirido en su totalidad con recursos propios, busca dar inicio al desarrollo de capacidades y uso de tecnologías espaciales con fines de seguridad y defensa. La FAC es un usuario continuo de servicios satelitales de terceros, bajo la modalidad de contratación de servicios para fines de inteligencia y georreferencia, que se viene utilizando en el marco del conflicto interno y constituye un inmenso valor para proporcionar ventajas estratégicas y tácticas ante un potencial adversario. (Silva et., 2019, p.63)

Sin embargo, las aspiraciones de la Fuerza Aérea van más allá. Para el año 2021, planeaban enviar un segundo nanosatélite para la observación, y a este se suman los avances tecnológicos evidentes en la estructura implementada por la FAC como parte de su planificación y del desarrollo de capacidades alcanzadas hasta ahora.

• ***Proyecto FACSAT-I***

Figura 4. Imagen de FACSAT-I

IMAGEN	CARACTERÍSTICA	VALOR
	Masa	2.4 kg
	Cubesat	3U
	Sistema de Orientación	3 ejes activos
	Resolución Espectral	RGB
	Resolución Radiométrica	256 DN
	Resolución Espacial	20-25 m/pixel
	Resolución Temporal	4 días (landmark mode)
	Comunicación	UHF Band <1 MBPS
	Apunte de precisión	1 deg
	Orbita	SSO
	Altitud	504 km
	Tiempo de vida	≥ 3 years

Fuente: (CITAE, 2017).

El FACSAT-1 fue el primer satélite colombiano puesto en órbita, lanzado en noviembre de 2018. Este nanosatélite de observación terrestre fue construido en Dinamarca por la empresa GomSpace, y cuenta con una cámara con resolución de 30 metros por píxel. El FACSAT-1 se ha utilizado para monitorear el territorio colombiano, contribuyendo al desarrollo urbano, la atención temprana de desastres naturales, la vigilancia de recursos naturales terrestres y marítimos, y una amplia gama de otras aplicaciones (Portilla y Murcia, 2021).

El desarrollo del FACSAT-1 permitió a Colombia adquirir capacidades en ciencia y tecnología espacial, abarcando áreas como mecánica orbital, ingeniería de sistemas, sensores remotos y procesamiento de imágenes. El proyecto involucró a entidades académicas, privadas y públicas, capacitando a oficiales, suboficiales y personal civil. Este satélite fue considerado un referente en la región e inspiró otros proyectos de pequeños satélites en países vecinos (Fuerza Aérea Colombiana, 2021).

- **Proyecto FACSAT-II “Chibiriquete”**

Figura 5. Imagen de FACSAT-II

IMAGEN	CARACTERÍSTICA	VALOR
	Masa	10 kg
	Cubesat	6U
	Sistema de Orientación	3 ejes activos
	Resolución Espectral	RGB + NIR
	Resolución Radiométrica	256 DN
	Resolución Espacial	5 m/píxel
	Comunicación	Banda UHF < 1MBPS Band s < 10 MBPS
	Apunte de precisión	< 0.1 deg
	Órbita	SSO
	Altitud	550 km
	Tiempo de vida	≥ 3 years

Fuente: (Krebs, 2024).

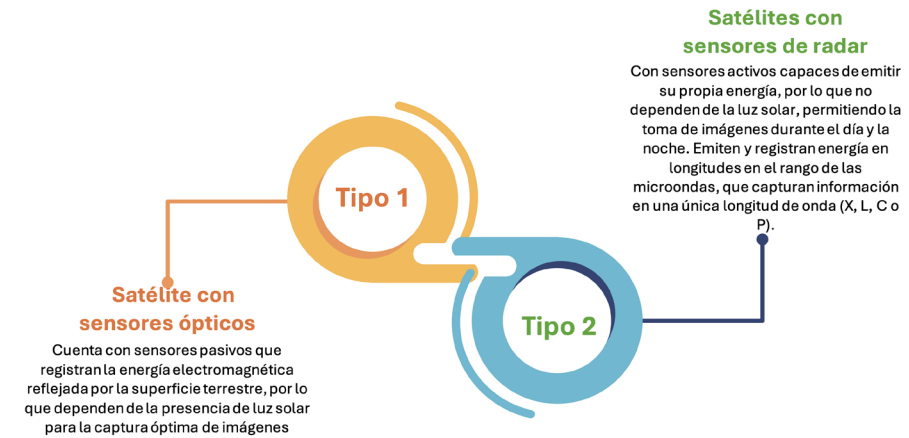
Teniendo en cuenta la trascendencia que ha adquirido el espacio para el ámbito militar y la necesidad que los Estados han manifestado para desarrollar proyectos en torno a este, como parte de la búsqueda de los beneficios existentes en el espacio exterior y de los que la industria espacial puede aportar a los países, el gobierno nacional y la Fuerza Aérea Colombiana han creado el Programa FACSAT. Este programa está enfocado en el desarrollo y apoyo del proyecto FACSAT-2-Benchmarking, cuya finalidad es generar beneficios que se reflejen en la economía espacial y fortalecer las capacidades obtenidas hasta ahora mediante el uso de satélites y aplicaciones satelitales, fundamentadas en políticas y normas relacionadas con el tema espacial (Jairt y Bonilla, 2022).

En el país, entre los principales avances logrados en los sectores público y privado, se encuentran las aplicaciones de imágenes satelitales para la meteorología, las ciencias astronómicas, la navegación satelital y la observación de la tierra. También se ha logrado desarrollar mecanismos y herramientas para la medición de gases de efecto

invernadero desde plataformas satelitales. Estos avances tecnológicos han mostrado la proyección del país y de la FAC en el contexto espacial. Sin embargo, cada una de las plataformas y recursos aplicados para obtener las imágenes y medir los gases se ha logrado gracias a la infraestructura que la Fuerza Aérea ha desarrollado.

En primer lugar, la obtención de imágenes satelitales se realiza mediante los sistemas satelitales de observación de la tierra, que están compuestos por tres elementos: el segmento espacial, el segmento terrestre y el centro de procesamiento. Además, existen diferentes tipos de sistemas satelitales que se utilizan para la observación de la tierra mediante las imágenes que estos capturan. Estos tipos de satélites son:

Figura 6. Tipos de sistemas de satélites empleados para la observación de la tierra



Fuente: Elaboración propia con información obtenida de (Jairt y Bonilla, 2022).

En segundo lugar, la implementación de plataformas para la medición de gases de efecto invernadero utiliza una infraestructura que, en cierta medida, puede ser similar. No obstante, su importancia radica en la capacidad de estas plataformas para proporcionar y almacenar los datos necesarios para formular estrategias y planes que permitan hacer frente al cambio climático y a otros efectos derivados de este tipo de gases. Los satélites y sus características son:

Tabla 1. Lista de satélites y sus principales características

Satélite Sensor	GEI	Agencia	Res al Nadir	Ciclo de repetición Orbital	Disponibilidad de datos
GOSAT TANSO-FTS	CO ₂ , CH ₄ y H ₂ O	JAXA/MOE	10.5 Km (diámetro)	3 días	2009-Presente

9. EL DESARROLLO ESPACIAL EN LA LUCHA CONTRA LA EXPLOTACIÓN ILEGAL DE ORO EN COLOMBIA EN EL MARCO DE LA SEGURIDAD Y DEFENSA NACIONAL

Satélite Sensor	GEI	Agencia	Res al Nadir	Ciclo de repetición Orbital	Disponibilidad de datos
GOSAT TANSO-FTS-2	CO ₂ , CH ₄ , H ₂ O y CO	JAXA/MOE	9.7 Km (diámetro)	6 días	2018-Presente
OCO-2	CO ₂	NASA	2.25 Km (along-track) 1.29 Km (cross-track)	16 días	2014-Presente
ISS OCO-3	CO ₂	NASA, CSA, ESA, JAXA, ROSCOS- MOS	2.25 Km (along track) 1.29 Km (cross-track)	N/A	2019-Presente
TanSat (carbonSat) CDS+CAPI	CO ₂	MOST/ CAS/CMA	N/A	16 días	2016-Presente
Sentinel-5P TOPROMI	CO, HCHO, CH ₄ , NO ₂ , SO ₂ , O ₃ , aerosoles	ESA/NSO	7x 3.5 Km ² 7x7 Km ² (SWIR bands) y UV1 bands (7x28 Km ²)	16 días	2017-Presente
Aqua AIRS	CO, CH ₄ , SO ₂ , H ₂ O, O ₃ , CO ₂	NASA	13.5 Km x 13.5 Km	16 días	2002-Presente
Aura MLS	O ₃ , CO, CH ₄ , H ₂ O, N ₂ O, BrO	NASA	5 Km (Cross track) x 500 Km (along- track) x 3 Km vertical	16 días	2004-Presente
Aura TES	CFCS, CH ₄ , CO, CO ₂ , H ₂ O, N ₂ O, NO ₂ , O ₃ , SO ₂	NASA	053 km x 5.3 Km	16 días	2004-Presente
Aura OMI	O ₃ , NO ₂ , SO ₂ , HCHO, aerosoles	NASA	13 km x 24 km	16 días	2004-Presente
MetOp-A/B/C IASI	CO, CH ₄ , O ₃ , NH ₃ , SO ₂ , CO ₂ , H ₂ O, NO ₂ , HCCOH, aerosoles	EUMET- SAT/CNES	12 km (diámetro)	29 días	*
MetOp-A/B/C GOME-2	O ₃ , NO ₂ , SO ₂ , H ₂ O, BrO, HCHO, aerosoles	EUMET- SAT/ESA	40 x 40 km ² (MetOp-A), 80 x 40 km ² (MetOp-B/C)	29 días	*
Terra MOPITT	CO y CH ₄	NASA	22 km x 22 km	16 días	1999-Presente

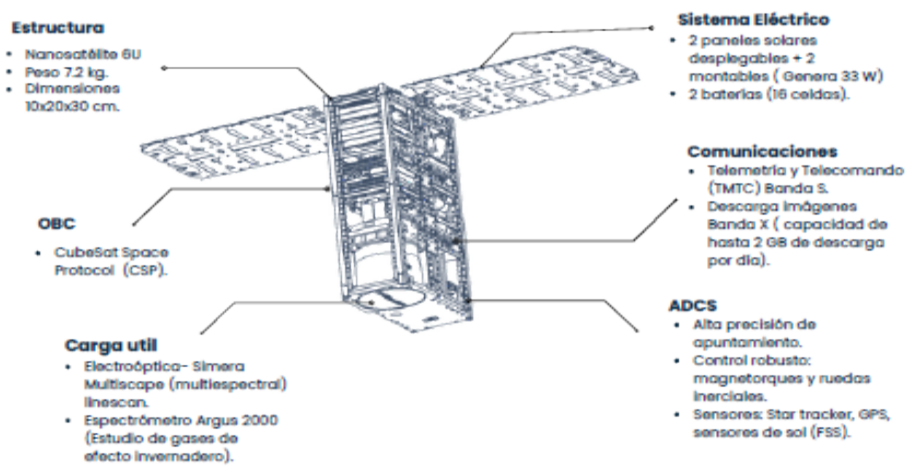
Satélite Sensor	GEI	Agencia	Res al Nadir	Ciclo de repetición Orbital	Disponibilidad de datos
SNPP NOAA-20 OMPS	O3, BrO, HCHO, NO2, SO2, aerosoles	NOAA/ NASA	50 km (mapper) 250 km (profiler)	16 días	**

Fuente: Elaboración propia con información obtenida de (Jairt y Bonilla, 2022).

El FACSAT-2 es un proyecto cuyo objetivo es obtener y proporcionar imágenes satelitales del territorio colombiano, que luego son utilizadas para análisis y toma de decisiones por parte de entidades gubernamentales y de la Fuerza Aérea Colombiana. Además, según las especificaciones técnicas del satélite, estos nanosatélites son útiles en la adquisición de información espectrométrica que permite conocer la realidad atmosférica y, posteriormente, analizar los gases de efecto invernadero (Fuerza Aérea Colombiana, 2024).

El SAT “Chiribiquete”, lanzado en 2023 por la empresa SpaceX, es el segundo satélite tipo CubeSat de 6U de la Fuerza Aérea Colombiana, desarrollado como resultado de la alianza entre la FAC y GomSpace. Este satélite se utiliza para la observación de la tierra y la obtención de información para el análisis de gases de efecto invernadero (Fuerza Aérea Colombiana, 2024). Las especificaciones técnicas de este satélite evidencian su capacidad y los complementos que contribuyen al cumplimiento de sus funciones (Figura 7). Se espera que su vida útil sea de al menos cinco años (p.3).

Figura 7. Especificaciones técnicas del SAT - “CHIRIBIQUETE”



Fuente: Imagen tomada de (Fuerza Aérea Colombiana, 2024).

Así mismo, los elementos que apoyan la función del SAT – “Chiribiquete” son el Sensor MultiScape 100CIS y el Sensor Argus2000, este último implementado para las aplicaciones del espectrómetro, las especificaciones técnicas de cada uno de ellos muestran que:

Tabla 2. *Especificaciones técnicas de las cargas útiles del FACSAT-2*

Sensor:	MultiScape 100 CIS
Formato de Imagen:	.PNG
Resolución Espacial:	4.75 m/pixel
Resolución Espectral:	8 bandas (R, G, B, NIR, Pan)
Resolución Radiométrica:	12-bit
Tamaño Imagen:	19 km x tiempo de exposición
Peso de una Imagen de 1440 Km²:	500 MB
Campo de vista:	2.22° (across); 1.66° (along)
Active Pixels (Horizontal):	4,096 Píxeles
Active Pixels (Vertical):	3,072 Píxeles
Swath:	19 km
Formato de Imagen:	.TXT con firma espectral
Resolución Espectral:	1000 nm - 1650 nm
Resolución Radiométrica:	10-bits
Tamaño Imagen:	1.6 km x 1.6 km
Peso de una Imagen de 1440 Km²:	1MB
Swath:	1.6 km
Canales espectrales:	100 (typical)
Tiempos de integración:	500 μs a 4.096 sec

Fuente: Tomada de (Fuerza Aérea Colombiana, 2024).

Se espera que estos equipos, al igual que el software con el que operan, sean mejorados continuamente mediante la inversión en investigación, desarrollo e innovación (I+D+i), lo que contribuirá al fortalecimiento de estos sistemas e incorporará nuevas capacidades que permitan obtener imágenes de mejor calidad y datos más precisos, útiles para la toma de decisiones y la formulación de políticas públicas.

● ***La importancia de la infraestructura espacial de la FAC en la seguridad y Defensa nacional***

Cuando se habla de seguridad y defensa en relación con la protección proporcionada por la infraestructura espacial, se está abordando un concepto diferente al que tradicionalmente se entiende en la sociedad internacional y, especialmente, en

el país. En un contexto que involucra el espacio exterior, se hace referencia a la seguridad aeroespacial.

De manera similar a la definición de seguridad en un conflicto caracterizado por una guerra “tradicional”, la seguridad aeroespacial cuenta con varios enfoques proporcionados por autores, quienes, desde su experiencia y conocimiento, buscan dar significado a este nuevo concepto, que explica las formas de guerra que la humanidad ha desarrollado en los últimos años. Estas formas de guerra están intrínsecamente relacionadas con la tecnología, los paradigmas innovadores y una sociedad en constante evolución.

Santé (2017) es uno de esos autores que ha estudiado la doctrina y el concepto de seguridad y defensa en el ámbito aeroespacial. Indica que la situación del mundo contemporáneo ha llevado a la creación de un nuevo paradigma, que sirve como punto de partida para hablar de una estrategia de seguridad aeroespacial. Esta estrategia requiere la reformulación de la doctrina, que debe ser conocida por la sociedad en general, mostrando que la seguridad es un tema que concierne a todos, sin distinciones.

Este autor basa su escrito en la estrategia de seguridad espacial de Estados Unidos y Europa, destacando la importancia de alinear la estrategia de seguridad espacial de cada país con la región en la que se encuentra. Además, Santé (2017) menciona que pensar en una nueva forma de seguridad implica considerar imprescindible realizar cambios en la doctrina, la cual guía el actuar de los seres humanos y de las instituciones en un ámbito que aún está siendo explorado. Este ámbito presenta nuevos retos y, como sucedió en otros momentos de la historia, se busca la superioridad aeroespacial sobre otras naciones, especialmente en un lugar que aún no se conoce completamente y en el que se requiere una nueva forma de proceder.

En el análisis de la seguridad aeroespacial centrado en América del Norte, se toma como referencia a López (2010), quien señala que la seguridad aeroespacial hace referencia al uso libre y seguro del espacio aéreo. Este concepto, en otras palabras, se explica como “acceso seguro, continuo y sustentable a los usos y aplicaciones de este espacio, así como a la ausencia de amenazas provenientes de esta región” (López, 2010, p. 1).

Para este autor, las amenazas pueden ser de tipo militar, ambiental, comercial, civil o legal. Estas áreas son vulnerables cuando se trata de un fenómeno casi desconocido, que puede afectar a un país debido a la influencia global que tiene el espacio exterior. Esto se debe a que en el espacio no existen fronteras delimitadas, todos pueden acceder a él, y la falta de investigación previa lo convierte en un territorio deseado por todos, especialmente cuando se trata de algo inexplorado, en el que se puede obtener supremacía y, por lo tanto, “poder futuro”.

Considerando los puntos de vista de los dos autores citados, la seguridad y la defensa en el ciberespacio se convierten en elementos con un alto nivel de vulnerabilidad, derivado de la falta de investigaciones previas y de la curiosidad humana por explorarlo. En el caso de esta investigación, la seguridad y la defensa se miden en la capacidad de instituciones como la FAC para crear infraestructura que les permita acceder a zonas donde la explotación de oro está generando problemas ambientales, los cuales a su vez producen situaciones que representan inseguridad. Estas situaciones incluyen el financiamiento de grupos armados ilegales, el dominio económico, político y social sobre un territorio específico, y amenazas contra la soberanía nacional. Por ello, la vigilancia constante de un territorio mediante medios satelitales y otras herramientas

de este tipo será útil para obtener información que sirva como base para tomar decisiones que protejan al territorio nacional y a su población.

4.3 Efectos ambientales producidos por la minería ilegal de oro en Colombia desde 2019 hasta 2022 en el contexto de la Seguridad y Defensa Nacionales

Como menciona López (2010), la seguridad y la defensa nacionales desde el ámbito aeroespacial no solo atañen al ámbito militar, sino que también se relacionan con los sectores político, económico y ambiental. Este último, el sector ambiental, es uno de los más afectados por la extracción ilegal de oro, y al mismo tiempo, constituye una de las principales causas por las que la seguridad y la defensa se encuentran vulneradas. La extracción ilegal de oro no solo provoca daños ecológicos significativos, sino que también está vinculada al financiamiento de grupos armados ilegales, lo que agrava las situaciones de inseguridad en diversas regiones. Este contexto pone en evidencia la necesidad de fortalecer las capacidades de vigilancia y monitoreo del territorio mediante la infraestructura aeroespacial, a fin de proteger los recursos naturales, garantizar la seguridad nacional y frenar las actividades ilícitas que comprometen la soberanía del país.

- ***Efectos ambientales causados por la extracción ilegal de oro en Colombia***

Hasta el año 2022, según la INTERPOL (2022), los efectos devastadores de la extracción ilegal de oro en el país se concentraban en la destrucción del medio ambiente, que se materializaba en la pérdida de biodiversidad, la destrucción del hábitat y la contaminación de fuentes hídricas, del aire y del suelo debido al uso de sustancias químicas y tóxicas.

Sin embargo, estas afectaciones han fluctuado en los últimos cinco años. Por ejemplo, en 2019, 12 de los 32 departamentos de Colombia presentaban extracción ilegal de oro. Según las cifras, Antioquia tenía el mayor número de hectáreas afectadas (40.201 ha), seguida por Chocó (35.105 ha). En 2019, se observó una tendencia al incremento de hectáreas con casos de EVOA, con un aumento del 6% respecto al año anterior, alcanzando las 98.028 hectáreas (Minenergía, Embajada de Estados Unidos, & UNODC, Colombia. Explotación de oro de aluvión. Evidencias a partir de percepción remota 2019, 2020).

Para 2020, la situación no cambió; nuevamente, 12 de los 32 departamentos presentaron casos de EVOA. No obstante, las cifras mostraron un incremento del 3% en las hectáreas afectadas, alcanzando las 100.752 hectáreas. Este año, fue alarmante observar que casi la mitad de las zonas detectadas se encontraban en territorios protegidos que forman parte del patrimonio ambiental, donde no debe llevarse a cabo esta actividad (UNODC, 2021). Ese año, Antioquia y Chocó continuaron ocupando los primeros lugares, y Bolívar se sumó para completar entre los tres el 87% de la minería ilegal de oro en el país (UNODC, 2021, p. 9).

En 2021, aunque la pandemia marcó un punto de irrupción para la economía y la estabilidad mundial, las economías ilegales, como los cultivos ilícitos y la EVOA, no se vieron afectadas. Al contrario, en el ámbito de la minería y extracción de oro, 13 de los 32 departamentos del país tenían hectáreas asignadas a esta actividad. Paradójicamente, se registró una reducción del 2% en el territorio utilizado para ello, ya que en ese año solo se reportaron 98.567 hectáreas. Además, hubo un cambio en el ranking: Chocó pasó al primer lugar, Antioquia al segundo y Bolívar se mantuvo en el tercero. Juntos, estos tres departamentos representaron el 88% de la minería ilegal en el país (UNODC y Minenergía, 2022).

Figura 8. Situación de las economías ilegales en 2021



Fuente: Imagen obtenida de (Fuerza Aérea Colombiana, 2022).

En 2022, se observó un avance, ya que solo se registraron 94.733 hectáreas, de las cuales el 73% se definieron como actividad minera ilícita. Paradójicamente, esto representó un incremento de 5.000 hectáreas en relación con esta actividad, pero ejecutada de forma ilícita (Minenergía & UNODC, 2023). La concentración de la minería ilegal se mantuvo en 13 de los 32 departamentos de Colombia, y nuevamente se centró en tres de ellos: Chocó, Antioquia y Bolívar, que concentraron el 85 % de la EVOA. Solo Chocó acumuló el 40% de las hectáreas, lo que representa casi la mitad de todo el porcentaje del país (Minenergía & UNODC, 2023, p. 4).

• Efectos en la seguridad y Defensa de la extracción ilegal de oro

A primera vista, la minería y la seguridad pueden no parecer tener conexión, sin embargo, la INTERPOL (2022) encuentra que:

América Latina se ve especialmente afectada por este ámbito delictivo, ya que experimenta una de las mayores tasas de extracción ilegal de oro del mundo, según las conclusiones de INTERPOL. Su análisis de la extracción ilícita de oro en Bolivia, Colombia, Ecuador, Panamá y Perú —así como los

resultados del apoyo habitual a las fuerzas del orden brasileñas en materia de investigaciones– pone de manifiesto cómo el aumento de la demanda de oro ha actuado como un “factor de atracción” para los delincuentes de la región, incluidos los grupos de delincuencia organizada que también están involucrados en la trata de personas, las violaciones de los derechos humanos y los delitos financieros.

La extracción ilegal de oro destruye el medio ambiente, provocando la deforestación, la pérdida de biodiversidad y la destrucción del hábitat, así como la contaminación del agua, el aire y los suelos por la liberación de sustancias químicas tóxicas. Las comunidades locales también sufren por los desplazamientos forzados de población, la corrupción, las violaciones de los derechos humanos y los problemas de salud asociados a la minería ilegal.

La elevada implicación de sofisticadas redes delictivas en la extracción ilegal de oro y la dimensión transnacional de la minería ilegal y los delitos conexos plantean igualmente un problema para las fuerzas del orden, que a veces carecen de los recursos necesarios para combatir con eficacia esta amenaza delictiva. (INTERPOL, párr. 3-5)

Las explicaciones presentadas por la INTERPOL demuestran la influencia que la minería ilegal y la EVOA, vistas como medio de financiación de grupos criminales, pueden tener en la seguridad de un país, especialmente en Colombia, que se encuentra en medio de un conflicto armado. La tendencia de incrementar las amenazas a la seguridad y al medio ambiente se mantiene latente debido a economías ilícitas como la cadena del narcotráfico y la extracción ilegal de oro.

5. CONCLUSIONES

La implementación del programa espacial colombiano ha contribuido a una vigilancia constante y detallada de las áreas afectadas por la explotación ilegal de oro. Esta capacidad de observación desde el espacio ha sido útil no solo para obtener datos precisos y actualizados, sino también para proteger a las comunidades más vulnerables del país y salvaguardar la biodiversidad de los impactos devastadores de la minería ilegal. La información recolectada facilita la toma de decisiones estratégicas y la formulación de políticas públicas orientadas a la protección del territorio nacional, garantizando la seguridad y el bienestar de las personas que habitan estas áreas vulnerables. Sin embargo, aún es necesario invertir y fomentar más la investigación en infraestructura espacial para que el país esté a la vanguardia de las exigencias del espacio exterior y de las nuevas formas de actuar de las organizaciones criminales que se financian con la extracción ilegal de oro.

El análisis de los avances tecnológicos en infraestructura espacial de la FAC y su aplicación en la lucha contra la explotación ilegal de oro en Colombia permite reconocer que la alianza entre la Fuerza Aérea Colombiana y empresas tecnológicas internacionales, como GomSpace, para el lanzamiento de satélites tipo CubeSat, ha contribuido al fortalecimiento de la infraestructura aeroespacial del país. Estos

satélites, equipados con sensores avanzados, permiten la observación detallada de la tierra y el monitoreo de gases de efecto invernadero. Al identificar y mitigar los impactos ambientales de la minería ilegal, se contribuye directamente a la seguridad y defensa nacional al reducir las economías ilícitas y los factores de inestabilidad generados por los Grupos Armados Organizados, protegiendo así la soberanía y estabilidad del país.

En cuanto a la identificación de los efectos ambientales producidos por la minería ilegal de oro en Colombia, se concluye que la explotación ilegal de oro ha tenido efectos devastadores en el medio ambiente, incluyendo la deforestación, las afectaciones a la biodiversidad y la contaminación de fuentes hídricas, del aire y del suelo. Estos problemas ambientales repercuten directamente en la seguridad y defensa nacional. La revisión de la relación existente entre la extracción ilegal de oro, la seguridad y la defensa nacional muestra que esta actividad, además de financiar a los grupos armados al margen de la ley, también les proporciona el capital para continuar delinquir en zonas estratégicas del país. Además, la minería y sus dirigentes son la causa de los enfrentamientos entre los Grupos Armados Organizados y otras estructuras criminales. Sumado a esto, la presencia de estos grupos evidencia la necesidad de fortalecer la gobernabilidad.

El uso dual del espacio en Colombia, con el satélite FAC-2, fortalece la seguridad multidimensional al integrar aplicaciones civiles y militares. Esto permite monitorear actividades ilegales, proteger recursos naturales y mejorar la toma de decisiones estratégicas en seguridad y defensa, con un factor transversal como la seguridad humana.

Entre otros aspectos, se concluye que el desarrollo e implementación de software especializado es esencial para el procesamiento y análisis de los datos recolectados por los satélites. Estos softwares permiten identificar patrones y actividades ilegales, proporcionando información crítica para las operaciones de seguridad y defensa. Es necesario entender que, al integrar estas tecnologías, se espera mejorar la capacidad del Estado para responder rápidamente y de manera efectiva a las amenazas de la explotación ilegal de oro, protegiendo tanto a las comunidades más vulnerables como los recursos naturales del país.

A través de esta investigación, se han formulado una serie de recomendaciones orientadas a impulsar el progreso acelerado en el ámbito espacial para contrarrestar la explotación ilegal de yacimientos mineros de oro en Colombia. A partir de los hallazgos obtenidos en esta investigación, se propone la creación del modelo “multi hélice” (4 hélices), donde cada una representa a una entidad y la unión entre universidades, Fuerza Pública, empresas privadas y el Gobierno colombiano para maximizar el potencial de las tecnologías espaciales. Con ello, se implementarán soluciones innovadoras que permitirán una vigilancia y monitoreo constante de las áreas afectadas, proporcionando datos precisos y en tiempo real.

De la misma forma, la lucha contra la explotación ilegal de yacimientos mineros de oro no puede abordarse de manera aislada. La colaboración con organizaciones internacionales como la ONU e INTERPOL es fundamental para combatir las redes delictivas transnacionales involucradas en la minería ilegal, ya que estas organizaciones aportan recursos, conocimientos y apoyo estratégico necesario para enfrentar de manera efectiva esta amenaza, que afecta no solo a Colombia, sino a toda la región. Esto demuestra que la cooperación internacional refuerza las capacidades nacionales

y promueve un enfoque coordinado y global para proteger la seguridad y la defensa nacional frente a estas actividades ilícitas.

Es preciso reconocer que este enfoque cooperativo, tanto a nivel nacional como internacional, fortalecerá significativamente la seguridad y defensa nacional al dotar a las Fuerzas Militares de infraestructura espacial avanzada para identificar y neutralizar actividades ilegales. Además, contribuirá a proteger el medio ambiente de los daños graves causados por la minería ilegal, promoviendo la conservación de la biodiversidad y la salud de los ecosistemas.

Finalmente, el impacto positivo también se extenderá a las comunidades locales, mejorando su calidad de vida al reducir la contaminación y la degradación ambiental (mercurio y cianuro), y generando nuevas oportunidades de desarrollo económico sostenible. Con la integración del conocimiento académico, la capacidad operativa de la fuerza pública, la innovación tecnológica del sector privado y la acción unificada del Estado, se construirá una respuesta integral y efectiva para enfrentar uno de los mayores desafíos ambientales y de seguridad de la Nación.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- EIA632A. (2021). *Processes for Engineering a System*. Information Report, SAE International. doi: <https://doi.org/10.4271/EIA632A>
- AEM. (2016). *Mejores prácticas para el diseño de Cubesats*. Foro, Secretaría de Comunicaciones y Transportes -SCT, Agencia Espacial Mexicana -AEM, Jalisco 2016. Recuperado el 12 de Julio de 2021, de <https://docplayer.es/77363921-Mejores-practicas-para-el-diseno-de-cubesats.html>
- AEM. (2019). *Secretaria de comunicacion y transportes*. Obtenido de http://www.educacionespacial.aem.gob.mx/images/normateca/pdf/CURSO_ISE/Modulo_3.pdf
- Agencia Espacial Europea. (31 de Marzo de 2022). *ESA*. Obtenido de CubeSats: https://www.esa.int/Enabling_Support/Preparing_for_the_Future/Discovery_and_Preparation/CubeSats
- Álvarez, C., & Corredor, C. (2019). *El Espacio Exterior: Una Oportunidad Infinita para Colombia*. Bogotá: Sello editorial Escuela Superior de Guerra.
- Álvarez, C., Corredor, C., Quiroga, R., & Molano, Á. (2019). Programa Espacial Colombiano. En C. Álvarez, & C. Corredor (Edits.), *El Espacio Exterior: Una Oportunidad Infinita para Colombia* (Vol. 2, p. 265-291). Bogotá: Escuela Superior de Guerra “General Rafael Reyes Prieto”.
- Álvarez, C., Murillo, S., Hernández, J., & Urbina, J. (2019). El Poder Espacial y la Seguridad Multidimensional. En C. Álvarez, & C. Corredor (Edits.), *El Espacio Exterior: Una Oportunidad Infinita para Colombia* (págs. 19-82). Bogotá: Escuela Superior de Guerra “General Rafael Reyes Prieto” y Fuerza Aérea Colombiana.
- Baquero, F. (2022). *PODER AÉREO, ESPACIAL Y CIBERESPACIAL frente a desafíos y amenazas multidimensionales que afectan al Estado colombiano*. Bogotá: Sello Editorial Escuela Superior de Guerra.
- Barrero, D., & Baquero, F. (2022). Operaciones Espaciales de Colombia: enfoque en seguridad y desarrollo. En J. H. (ed), *Visión Aeroespacial Colombiana* (págs. 43-70). Bogotá: Sello Editorial Escuela Superior de Guerra.

- Barrero, D., Baquero, F., & Gaitán, A. (2018). La Seguridad Multidimensional y el Poder Aéreo: doctrinas de la OEA y Fuerza Aérea para fortalecer el desarrollo de la seguridad y la defensa. ¿Cuál es el nuevo panorama de Colombia? *Ciencia Y Poder Aéreo*, 13(1), 72-81. doi:<https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaereo.587>
- Becerra, J. (2014). Colombias space policy: An analysis of six years of progress and challenges. *Acta Astronáutica*, 100(1), 94-100.
- Belward, A. S., & Skøien, J. O. (2015). Who launched what, when and why; trends in global land-cover observation capacity from civilian earth observation satellites. *ISPRS. Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*(103), 115-128.
- Board, S. S., & Council, N. R. (2014). *Landsat and Beyond: Sustaining and Enhancing the Nation's Land Imaging Program*. National Academies Press.
- Bolaño-Ortiz, T. P.-F.-N. (2019). Assessment of absorbing aerosols on austral spring snow albedo reduction by several basins in the Central Andes of Chile from daily satellite observations (2000–2016) and a case study with the WRF-Chem model. *SN Applied Sciences*, 13. doi:<https://doi.org/10.1007/s42452-019-1256-z>
- Burton, J., Thompson, D., Papa, A., & Wong, A. (2022). *INTERNATIONAL SPACE COLLABORATION AND SECURITY*. Brussels, Belgium: A JOURNAL OF STRATEGIC AIRPOWER & SPACEPOWER.
- Campbell, J., Wynne, R., & Thomas, V. (2011). *Introduction to remote sensing*. Guilford Press.
- Camps, A. (2019). *Nanosatellites and Applications to Commercial and Scientific Missions*. IntechOpen.
- Capderou, M. (2014). *Handbook of Satellite Orbits*. Pasadena, California: Springer.
- Cappelletti, C., Battistini, S., & Malphrus, B. K. (2021). *Cubesat Handbook from mission desing to operations*. London: Elsevier. Recuperado el 23 de Julio de 2021, de <https://www.elsevier.com/books-and-journals>
- Center Langley Research, N. (2021). *S'COOL: Satélites observando la tierra*. Obtenido de <https://scool.larc.nasa.gov/Spanish/sats-sp.html>.
- Chandrika, N. (2006). *MILITARY USES OF SPACE*. London: The Parliamentary Office of Science and Technology.
- China National Space Administration. (2018). China National Space Administration. Obtenido de <http://www.cnsa.gov.cn/english/n6465652/index.html>
- Clemente, J. (2016). *Sistemas de iluminación de altas prestaciones aplicados a bienes de Universidad Complutense de Madrid*. Madrid, España: Facultad de óptica y optometría.
- CMMI Product Team. (2002). *Capability Maturity Model*. Integration (CMMI), Version 1.1. , Carnegie Mellon University, Software Engineering Institute.
- Congreso de la República de Colombia. (2023). *Ley 2302 de 2023 Congreso de la República*. Bogotá D.C.
- Consejo Nacional de Política Económica y Social. (2020). *POLÍTICA DE DESARROLLO ESPACIAL: CONDICIONES HABILITANTES PARA EL IMPULSO DE LA COMPETITIVIDAD NACIONAL*. Bogotá D.C.: CONPES.
- Córdoba, J., & Gago, C. (2012). Globalización, movilidad y el análisis de conectividad aérea: una herramienta para la práctica interdisciplinar. *Revista de Antropológia Social*, 111-1315.
- Cortés, L. (2014). Historia espacial: Recuento histórico de su evaluación y desarrollo [en línea]. *Revista de Derecho, Comunicaciones y Nuevas Tecnologías*(12). doi:<http://dx.doi.org/10.15425/redecom.12.2014.05>

- Council of Managers of National Antarctic Programs, C. (2017). *Antartic Station Catalogue*. Christchurch, New Zealand: COMNAP and contributors.
- Dallamuta, J. P., & Rocha de Oliveira, M. (2023). Space missions in South America: Profile and evolutionary perspective of their development. *Acta Astronautica*, 9-17. doi:<https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2023.02.008>
- Defense Intelligence Agency. (2022). *CHALLENGES TO SECURITY IN SPACE*.
- Departamento de Seguridad Nacional, Presidencia de Gobierno de España. (2019). *Estrategia de Seguridad Aeroespacial Nacional*. Catálogo de Publicaciones de la Administración General de Estado.
- Dirección de Ciencia y Tecnología FAC. (2020). Anexo A. Información Cuantificable del Problema. Colombia: Fuerza Aérea Colombiana.
- Doran, T. (15 de May de 2006). IEEE 220: for practical systems engineering. *Computer*, 39(5), 92-94. doi:[doi:10.1109/MC.2006.164](https://doi.org/10.1109/MC.2006.164)
- Duarte Muñoz, C. (02 de Abril de 2018). *Hacia el Espacio*. Recuperado el 22 de Agosto de 2021, de <http://haciaespacio.aem.gob.mx/revistadigital/articul.php?interior=780>
- EATC. (2024). *Fact Sheet*. EATC 2024.
- ECSS. (2017). *Ingeniería Espacial - Requerimientos generales de Sistemas de ingeniería*. Noordwijk, Holanda: ESA Requirements and Standards Division. doi:<https://ecss.nl/standard/ecss-e-st-10c-system-engineering-general-requirements/>
- EIA632A. (2021). *Processes for Engineering a System*. Information Report, SAE International. doi:<https://doi.org/10.4271/EIA632A>
- Elm, J. P., Goldenson, D. R., El Emam, K., Donatelli, N., & Neisa, A. (2008). *A Survey of Systems Engineering Effectiveness - Initial Results (with detailed survey response data)*. SPECIAL REPORT CMU/SEI-2008-SR-034, Software Engineering Institute -SEI; National Defense Industrial Association - NDIA;) Systems Engineering Effectiveness Committee (SEEC) , National Defense Industrial Association. Obtenido de <http://www.sei.cmu.edu/>
- EO Sharing Earth Observation Resources. (18 de 06 de 2023). *EO Portal Directory*. Recuperado el 31 de 03 de 2020, de <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions>
- ESA, E. S. (01 de 07 de 2024). *European Space Agency, eduspace*. Obtenido de https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_ES/SEMO1U3FEXF_o.html
- ESA, ECSS-E-ST-10C. (2009). *SESS - Systems Engineering Standards And Specifications*. Norma, ECSS, Requirements & Standards Division, Noordwijk, The Netherlands. Obtenido de <http://everyspec.com/ESA/download.php?spec=ECSS-E-ST-10C.047801.pdf>
- ESA, TEC-SY/128/2013/SPD/RW. (2016). *Tailored ECSS Engineering Standards for In-Orbit. Demonstration CubeSat Projects*. ESA. TEB. Obtenido de https://copernicus-masters.com/wp-content/uploads/2017/03/IOD_CubeSat_ECSS_Eng_Tailoring_Iss1_Rev3.pdf
- Escuela Superior de Guerra “Rafael Reyes Prieto”, & Fuerza Aeroespacial de Colombia. (2019). *Volumen 2. El Espacio Exterior: Una Oportunidad Infinita para Colombia. El Cielo no es el Límite: El Futuro Estelar de Colombia*. Bogotá: Escuela Superior de Guerra “General Rafael Reyes Prieto” y Fuerza Aérea Colombiana.
- Escuela Superior de Guerra, & Fuerza Aeroespacial de Colombia. (2019). *El Espacio Exterior: Una Oportunidad Infinita Para Colombia*. Escuela Superior de Guerra “General Rafael Reyes Prieto” y Fuerza Aérea Colombiana.
- Espíndola, J. M. (2011). *Assembly and Deployment of a Ground Station for Tracking Low Earth Orbit Satellites*. II encuentro internacional y VI Nacional de

- Investigación en Ingeniería de Sistemas e Informática-EIISI 2011.
- Estrada, C. (21 de marzo de 2023). Se calcula que más de 80% del oro que exporta Colombia proviene del mercado ilegal [en línea]. *La República*. Obtenido de <https://www.larepublica.co/economia/se-calcula-que-mas-de-80-del-oro-que-exporta-colombia-proviene-del-mercado-ilegal-3572072>
- European Space Agency. (2019). Our activities. Obtenido de https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Transportation/Our_activities
- European Space Agency. (18 de 06 de 2023). *CEOS DATABASE*. Recuperado el 11 de 04 de 2020, de <http://database.eohandbook.com/>
- Firesmith, D. (2009). The Method-Framework for Engineering System Architectures (MFESA). In *System and Software Technology Conference (SSTC)*, 1, pág. 153. Pittsburgh, Pensilvania. Obtenido de https://resources.sei.cmu.edu/asset_files/Presentation/2009_017_001_23622.pdf
- Flemes, D. (2012). Actores estatales y regionalismo estratégico: Brasil y Colombia en el orden multipolar. En E. Pastrana, S. Jost, & D. Flemes, *Colombia y Brasil: ¿socios estratégicos en la construcción de Sudamérica?* (págs. 25-48). Bogotá D.C.: Pontificia Universidad Javeriana.
- Fuerza Aérea Colombiana. (2024). Ficha Técnica SAT - “Chiribiquete”. Bogotá, Colombia.
- Fuerza Aérea Colombiana. (08 de 06 de 2023). *Fuerza Aérea Colombiana*. Obtenido de <https://www.fac.mil.co/es/node/49725>
- Fuerza Aérea Colombiana. (12 de 06 de 2023). *Poder Espacial FAC*. Obtenido de <https://poderespacial.fac.mil.co/jefatura-de-operaciones-espaciales>
- Fuerza Aérea Colombiana. (2023). *Tamaño de Fuerza*. Bogotá D.C.
- Fuerza Aérea Colombiana. (2021). *FACSAT-1 Dos años en el espacio al servicio del país*. Obtenido de <https://www.fac.mil.co/es/estamos-en-el-espacio>
- Fuerza Aérea, C. (2020). *Estrategia para el Desarrollo Aéreo y Espacial de la FAC*. Bogotá: Oficina de Doctrina FAC.
- Fuerza Aérea Colombiana. (2022). Blanco: Afectación Recursos Naturales y Medio Ambiente. Bogotá, Colombia: FAC.
- Fuerza Aérea Colombiana. (30 de 12 de 2020). *Estrategia para el Desarrollo Aéreo y Espacial Fuerza Aérea Colombiana 2042*. Obtenido de <https://www.fac.mil.co/edaesfac2042>
- Fuerza Aérea Colombiana. (2020). *Manual de Confiabilidad Aeronáutica-MACOA*-. Bogotá D.C.: Fuerzas Militares República de Colombia.
- Fuerza Aérea Colombiana. (2020). *Manual de Doctrina Básica, Aérea, Espacial y Ciberespacial*. Bogotá: FAC.
- Fuerza Aérea, Colombiana. (2020). *Doctrina Básica Aérea, Espacial y Ciberespacial - DBAEC*. Bogotá: Oficina de Doctrina de la FAC.
- Funes, M. (2017). *El Transporte Aéreo Estratégico como una necesidad del Nivel Operacional para el siglo XXI*. Buenos Aires: Escuela Superior de Guerra Conjunta de las Fuerzas Armadas.
- Garzón , G. (2021). Implementación de la Prueba de Vibración Aleatoria para Estructuras a Escala de Micro satélites con base en el Estandar General de Verificación de la NASA. *Tesis de grado para optar al título de Magister en Ingeniería*. Universidad del Valle.
- Giroux, H. (1997). .La pedagogía de frontera y la política del postmodernismo. *Revista Intrínsecos*(6), 96.
- Greenland, S., & Clark, C. (2010). Cubesatplatformsasanon-orbit. *European Small Satellite Service Symposium*. 2010.
- Grest, H. (2022). *National Military Space Operations Centres - Requirements on National Centres with Respect to NATO Needs*. Kalkar Germany: Joint Air

- Power Competence Centre.
- Harvey, B., Smid, H., & Pirard, T. (2010). *Emerging Space Powers: The New Space Programs of Asia, the Middle East and South-America*. Springer.
- Hernández Sampieri, R., Fernández, C., & Baptista, M. (2014). *Metodología de la Investigación* (Sexta Edición ed.). México D.F., México: McGrawHill Education.
- Herrera, J. F. (2011). Identification of priority themes in management of technology. In *20th International Conference For The International Association Of Management Of Technology Iamot*. Miami: North South Center University Of Miami.
- IEEE P1220. (1994). *Standard for system engineering-a commercial standard for improving competitiveness*. Norma, IEEE, Fort Worth, TX, USA. doi:<https://doi.org/10.1109/DASC.1993.283580>
- INACH. (01 de 07 de 2024). *Instituto Antártico Chileno, Ministerio de Relaciones Exteriores Gobierno de Chile*. Obtenido de <https://www.inach.cl/expedicion-antartica/bases-chilenas-en-antartica-2/base-bernardo-ohiggins/>
- INCOSSE. (30 de julio de 2015). *Introduction To Model-Based System Engineering (MBSE) and SysML*. doi:<https://www.incose.org/docs/default-source/delaware-valley/mbse-overview-incose-30-july-2015.pdf>
- INCOSSE. (2015). *Systems Engineering Handbook* (Cuarta ed.). (D. Walden, G. Roelder, K. Forsberg, D. Hamelin, & T. Shortell, Edits.) San Diego, California, EEUU: Wiley. Obtenido de <https://img1.wsimg.com/blobby/go/a430a7ae-a333-4c88-af76-fd5624bfdbdd/downloads/INCOSSE%20Systems%20Engineering%20Handbook%204e%202015%2007.pdf?ver=1604878104477>
- International Telecommunication Union. (2021). *Radio Regulations*. Obtenido de <https://www.itu.int/pub/R-REG-RR>
- INTERPOL. (28 de abril de 2022). *Los efectos devastadores de la extracción ilegal de oro en América Latina*. Obtenido de <https://www.interpol.int/es/Noticias-y-acontecimientos/Noticias/2022/Los-efectos-devastadores-de-la-extraccion-illegal-de-oro-en-América-Latina#:~:text=La%20extracci%C3%B3n%20ilegal%20de%20oro%20destruye%20el%20medio%20ambiente%2C%20provocando,liberaci%C3%>
- IPCC, I. P. (2012). *Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC)*. Obtenido de https://archive.ipcc.ch/home_languages_main_spanish.shtml
- JAXA. (2013). *Research on the technology of space systems*. Documento informativo, Japan Aerospace Exploration Agency -JAXA. Obtenido de <https://www.kenkai.jaxa.jp/eng/research/system/system.html>
- Jimenez R, R. S. (2019). FACSAT-1 Ground Station Performance. *Instituto de Astrofísica de Canarias - IAC-19-F1.2.3*, 21-25.
- Juárez, F. (2016). La minería ilegal en Colombia: un conflicto de narrativas [en línea]. *El Ágora USB*, 16(1), 135-146. Obtenido de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1657-80312016000100007&lng=en&tln=es
- Khlystov, N. (2023). *Space Industry Debris Mitigation Recommendations*. World Economic Forum.
- King, J. T., Kolbeck, J., Kang, J. S., Sanders, M., & Keidar, M. (2021). Performance analysis of nano-sat scale µCAT electric propulsion for 3U CubeSat attitude control. (E. Ltda, Ed.) *Acta Astronautica*, 178, 722-732. doi:<https://doi.org/10.1016/j.actastro.2020.10.006>
- Kotter, J. P. (2007). *Que Hacen Los Líderes*. (G. Planeta, Ed.)
- Krebs, G. (2024). "FACSAT 2 (Chibiriquete)". *Gunter's Space Page*. Obtenido de https://space.skyrocket.de/doc_sdat/facsat-2.htm

- Lilo, J. (2020). *Impactos de la minería en el medio natural*. Obtenido de <https://www.ucm.es/data/cont/media/www/pag-15564/Impactos%20de%20la%20miner%C3%ADa%20-%20Javier%20Lillo.pdf>
- López, L. (2010). La seguridad aeroespacial en América del Norte. *Norteamérica [online]*, 5(1), 173-219. Obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-35502010000100007&lng=es&tlng=es.
- Margalef, L., & Arenas, A. (2006). ¿Qué entendemos por innovación Educativa? A proposito del desarrollo curricular. *Perspectiva Educacional*, 1(47), 13-31.
- Masson-Delmotte, V. P. (2021). *Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University: IPCC.
- Mesa, L. R. (2019). Sistema de monitoreo de señales en tierra usando la Estación Terrena Satelital UPTC. *Articulos científicos, INGE CUC*.
- Minenergía, & UNODC. (Junio de 2023). Informe EVOA 2022. Bogotá, Colombia.
- Minenergía, Embajada de Estados Unidos, & UNODC. (2020). Colombia. Explitación de oro de aluvión. Evidencias a partir de percepción remota 2019. Bogotá, Colombia.
- Moliner González, J. A. (2023). Dimensión ética y moral de posibles conflictos militares en el espacio exterior. *Revista Iberoamericana de Filosofía, Política, Humanidades y Relaciones Internacionales*, 25(53), 335-356. doi:<https://dx.doi.org/10.12795/araucaria.2023.i53.13>
- Nanosats. (11 de 06 de 2023). *Nanosats Data Base*. Recuperado el 10 de 04 de 2020, de <https://www.nanosats.eu/>
- NASA. (2020). About NASA. Obtenido de <https://www.nasa.gov/about/index.html>
- NASA. (12 de Diciembre de 2019). *Nasa*. Recuperado el 30 de Agosto de 2021, de https://www.nasa.gov/seh/2-1_technical-processes
- NASA. (2014). *What Is a Satellite?* Obtenido de <https://www.nasa.gov/audience/forstudents/5-8/features/>
- NASA. (2007). *Systems Engineering Handbook*. Washington, D.C., Estados Unidos: National Aeronautics and Space Administration. doi:https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/nasa_systems_engineering_handbook.pdf
- Navarro, E., Jiménez, E., Rappoport, S., & Thoilliez, B. (2017). *Fundamentos de la investigación y la innovación educativa*. Universidad Internacional de la Rioja. Obtenido de https://www.unir.net/wp-content/uploads/2017/04/Investigacion_innovacion.pdf
- Navarro, V. M. (2011). European Air Transport Command: ¿ hacia unas Fuerzas Armadas europeas ? *Documento de opinion del IEEE No.14/2011*, 2-4.
- Oficina de Información científica y tecnológica para el Congreso de la Unión. (Marzo de 2023). Satélites Pequeños. (038). Ciudad de Mexico. Obtenido de https://foroconsultivo.org.mx/INCyTU/documentos/Completa/INCYTU_20-038.pdf
- Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito - UNODC. (11 de noviembre de 2023). *Colombia: Explotación de Oro de Aluvión EVOA 2022*. Obtenido de https://www.unodc.org/documents/colombia/2023/noviembre-11/Resumen_Ejecutivo_EVOA_2022.pdf
- Ortega, G. (14 de Octubre de 2009). <https://www.gr.ssr.upm.es/>. Recuperado el 22 de Agosto de 2021, de Grupo de Radiación: https://www.gr.ssr.upm.es/docencia/grado/csat/picosatelites/LN11_Sesion2_Analysis_of_Space_Missions_GOrtega.pdf
- Ospina, L., & Cabrera, F. (2021). *Estrategia de Seguridad Aérea y Espacial Nacional*. Bogotá: Escuela Superior de Guerra “General Rafael Reyes Prieto” - ESDEG.

- Planeación, D. N. (2023). *Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026*. Bogotá: Imprenta Nacional de Colombia.
- Planton, S. S.-K. (2013). *Cambio Climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América.: IPCC.
- Portilla, J. (2012). LA ÓRBITA DEL SATÉLITE LIBERTAD 1. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 36(141), 491-500.
- Quiroga, R., Gutiérrez, N., Núñez, J., & Rico, Y. (2019). La Fuerza Aérea Colombiana y la Evolución del Pensamiento Estratégico del Poder Espacial. En C. Álvarez, & C. Corredor (Edits.), *Volumen 2. El Espacio Exterior: Una Oportunidad Infinita para Colombia. El Cielo no es el Límite: El Futuro Estelar de Colombia* (págs. 19-52). Bogotá: El Cielo no es el Límite: El Futuro Estelar de Colombia.
- Rendón, O. (04 de octubre de 2022). *Datos y tecnología para saber trazabilidad del oro*. Obtenido de <https://www.elcolombiano.com/negocios/datos-y-tecnologia-para-saber-trazabilidad-del-oro-DJ18774564>
- Restrepo, J. (2019). Extracción ilegal o el dinero por sobre todas las formas de vida [en línea]. *Elmundo.com*, 17, mayo. Obtenido de <https://www.elmundo.com/noticia/Extraccion-ilegal-o-el-dinero-por-sobre-todas-las-formas-de-vida/376594>
- Rincón U, S. R., Bastidas B, E. J., & Rodriguez A, C. A. (2023). *Factibilidad del desarrollo del FACSAT-2* (Vol. I). Cali, Valle del Cauca, Colombia: FAC.
- Rincón, S., Cárdenas, J., Pirazán, K., Acero, I., Hurtado, R., & Cortés, D. (2023). Critical Design of the FACSAT-2 mission CubeSat for the observation and analysis of the Colombian Territory. *Revista UIS Ingenierías*, 22(3), 69-86. Obtenido de <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistauisingenierias>
- Rincón, S., Cárdenas, J., Virginia, H., & Pirazan, K. (2022). *Simposio de la IAA sobre misiones de pequeños satélites*. Congreso Astronáutico Internacional 2022.
- Rincón-Urbina, S. R., Cardenas-García, J. M., Pirazán-Villanueva, K. N., Acero-Niño, I. F., Hurtado-Velasco, R. H., & Cortés-García, E. D. (2023). Diseño crítico del nanosatélite de la misión FACSAT-2 para la observación y análisis del territorio Colombiano. *RUI*, 22(3), 68-86.
- Robledo Asencio, J. C., Rincón Urbina, S. R., Cardenas Garcia, J. M., Mendez Gomez, J. E., & Salek Chaves, D. Z. (2023). System Engineering Approach for the Implementation Project of the Colombian Aerospace Force's (FAC) Assembly, Integration, and Testing (AIT) Laboratory. *14° WETE Workshop em Engenharia e Tecnologia Espaciais*, (págs. 1-10). Brasil.
- Rodriguez A., C. A. (2019). *Implementación de una estrategia sistémica de los proyectos del programa espacial de la FAC*. Propuesta Postdoctoral, Centro de investigación en Estudios Aeroespaciales -CITAE, I+D+i, Cali.
- Rodríguez, G., Sofrony, J., Cortés, E., & Rueda, K. (2020). *Diseño de misión, síntesis de factores operacionales y representaciones del segmento espacial, caso facsat y emff*. Bogotá DC: Revista Ciencia y Poder Aéreo.
- Rodríguez-Pirateque, G. W., Sofrony E., J., Cortés G., E. D., & Rueda, K. (19 de Septiembre de 2020). Diseño de misión, síntesis de factores operacionales y representaciones del segmento espacial, caso FACSAT y EMFF. *Ciencia y Poder Aéreo*, 15(2), 143-165. doi:<https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaereo.678>
- Rojas, A. (09 de septiembre de 2023). *Con tecnología geoespacial se puede controlar la minería ilegal en Colombia*. Obtenido de <https://www.las2orillas.co/con-tecnologia-geoespacial-se-puede-controlar-la-mineria-ilegal-en-colombia/>

- Roscosmos. (2022). State Corporation for Space Activities ROSCOSMOS. Obtenido de <https://www.roscosmos.ru/29189/>
- 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.
- Salazar, A. N. (2018). *Manual de operación de estación terrena: centro de control y Monitoreo “Rodrigo Noguera Laborde”* (pág 16). Bogotá: Fondo de publicaciones de la Universidad Sergio Arboleda.
- Santé, J. M. (2017). La doctrina aeroespacial y la estrategia de seguridad aeroespacial. *Cuadernos de estrategia*(192), 105-146. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/6268236.pdf>
- Sarafin, T. P., Doukas, P. G., McCandless, J. R., & Britton, W. R. (2007). Structures and Mechanisms. En J. R. Wertz, & W. J. Larson, *Space Mission Analysis and Design* (págs. 459–518).
- Sellers, J. J. (2007). *Understanding space: an introduction to astronautics* (Tercera ed.). (D. Kirkpatrick, Ed.) New York, New York, EEUU: McGraw-Hill.
- Sellers, J., Astore, W., Grifen, R., Larson, W., Kirkpatrick, D., Shute, A., . . . Tostanoski, M. (2015). *Understanding space: An introduction to astronautics*. McGraw-Hill Companies.
- Selva, D., & Krejci, D. (2012). A survey and assessment of the capabilities of Cubesats for Earth observation. *Acta Astronautica*, 74, 50–68. doi:<https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2011.12.014>
- Selva, D., & Krejci, D. (2012). *A survey and assessment of the capabilities of Cubesats for Earth observation*. Cambridge, MA: ELSEVIER. *Acta Astronautica*.
- Sheard, S. A. (2000). Three Types of Systems Engineering Implementation. *Proceedings of the Tenth International Symposium of the International Council on Systems Engineering* (pág. 9). Minneapolis: INCOSE International Symposium. Obtenido de All three types. Figure 1 shows how the three types
- Shiotani, B. (2018). *Project life-cycle and implementation for a class of small satellites*. Florida, Estados Unidos: University of Florida. Recuperado el 31 de Agosto de 2021, de https://svi.ndc.nasa.gov/ssri-kb/static/resources/SHIOTANI_B.pdf
- Silva, C. F., Corredor, C., & Álvarez, C. (2019). Análisis de la Política Espacial Colombiana: Una perspectiva de defensa y seguridad. En Escuela Superior de Guerra “Rafael Reyes Prieto”, & Fuerza Aérea Colombiana, *El Espacio Exterior Volumen 2* (págs. 53-82). Escuela Superior de Guerra y Fuerza Aérea Colombiana.
- Silva, C., Corredor, C., & Álvarez, C. (2019). Capítulo VIII. Análisis de la política espacial colombiana: una perspectiva de defensa y seguridad. En *El espacio exterior: Una oportunidad infinita para Colombia* (Vol. 2, págs. 53-82). Bogotá, Colombia: Escuela Superior de Guerra “General Rafael Reyes Prieto”.
- Slavin, R. (2002). *Aprendizaje cooperativo: Teoría, investigación y práctica*. AIQUE.
- STARLINK. (2024). *STARLINK*. Obtenido de <https://www.starlink.com/roam>
- Tahseen HU, Y. L. (2021). X. Design of FSS-antenna-radome system for airborne. *IET Communications*, 9. doi:DOI: 10.1049/cmu2.12181
- THOT, T. (2018). *ARGUS 2000 IR spectrometer kit*. Canada: Owner’s Manual.
- Torrijos, V., & Carvajal, A. (2014). Geopolítica sistémica aplicada: un modelo para entender las dinámicas cambiantes del sistema internacional. *Revista Científica General José María Córdova*, 35-56.
- Tubio Pardavila, R. (2012). *Ingeniería de Sistemas basada en Estándares ECSS aplicada al diseño, fabricación, integración, validación y operación de pico, nano y microsatelites. Aplicación a la Constelación HUMSAT*. Vigo, España:

Universidad de Vigo. doi:<https://core.ac.uk/download/pdf/54205042.pdf>

- United States Air Force. (Julio de 2019). *Air Mobility Operations*. Montgomery: Curtis E. Lemay Center. Obtenido de <https://www.af.mil/About-Us/Fact-Sheets/Display/Article/104566/air-mobility-command/>
- Universidad del Rosario. (05 de diciembre de 2022). *URosario lanza plataforma creada con el apoyo de Google.org para monitorear minería a cielo abierto usando imágenes satelitales y machine learning*. Obtenido de <https://urosario.edu.co/periodico-nova-et-vetera/urosario-lanza-plataforma-creada-con-google-org-para-monitorear-mineria-a-cielo-abierto>
- UNODC. (julio de 2021). Colombia. Explotación de oro de aluvión. Evidencias a partir de percepción remota 2020. Colombia.
- Urbina, J. (2017). El espacio, futuro de la Fuerza Aérea Colombiana. *Ciencia y Poder Aéreo*, 12, 202-208.
- USAF. (27 de 06 de 2024). *Air Mobility Command*. Obtenido de <https://www.amc.af.mil/>
- Vergara-Escobar, F. P. (2021). Corpolaridades: cuerpos producidos en una cuidadosa Antártica. *Revista Latinoamericana de Estudios sobre Cuerpos, Emociones y Sociedad*, 24. Obtenido de Www.relaces.com.ar
- Wallis, S., & David, F. (2008). *Space Observations: An Australian Perspective*. Commonwealth of Australia.
- Wasson, C. S. (2012). *Formulation and Development of the Wasson System Engineering Process Model*. ASEE Southeast Section Conferen.
- Wertz, J. R., & Larson, W. J. (2007). *Space Mission Analysis and Design*. El segundo, California, Estados Unidos: Space Technology Library. Recuperado el 30 de Agosto de 2023
- Wickramatunga, R. (2023). *United Nations Office for Outer Space Affairs*. Obtenido de The outer space treaty: <https://www.unoosa.org/oosa/en/ourwork/spacelaw/treaties/introouterspacetreaty.html>
- Woellert, K., Ehrenfreund, P., Ricco, A., & Hertzfeld, H. (2011). Cubesats: cost-effective science and technology platforms for emerging and developing nations. *Adv. Space.Res.*, 47(4), 663–684.
- Ziarnick, B. (2005). The Militarization and Weaponization of Space. *Air & Space Power Journal*, 19(2), 103. doi:<https://link.gale.com/apps/doc/A135843283/AONE?u=anon~2593f224&sid=googleScholar&xid=497dcc9e>

CAPÍTULO 10.

DESPLIEGUE Y OPERACIÓN DE UNA ESTACIÓN TERRENA EN ANTÁRTICA: CONSIDERACIONES PARA SISTEMAS SATELITALES EN CONDICIONES EXTREMAS

Capitán Germán Dario Saénz Hernández

<https://orcid.org/0000-0002-2054-3251>

german.saenzh@fac.mil.co

Capitán Javier Enrique Méndez Gómez

<https://orcid.org/0000-0002-2410-5400>

javier.mendez@fac.mil.co

Técnico Tercero Jorge Eduardo Rivera Castro

<https://orcid.org/0009-0009-1882-7683>

jorge.rivera@fac.mil.co

Capitán Lorena Paola Cardenas Espinosa

<https://orcid.org/0000-0003-2473-0932>

lorena.cardenas@fac.mil.co

/ Centro de Investigación en Tecnologías Aeroespaciales
Fuerza Aeroespacial Colombiana (FAC)

1. INTRODUCCIÓN

En el marco del Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026 “Colombia potencia mundial de la vida”, se ha propuesto una política nacional para la reindustrialización en actividades vinculadas a la sociedad del conocimiento y el desarrollo espacial. El objetivo es la creación de la Dirección Nacional de Asuntos Espaciales para fortalecer la institucionalidad y el desarrollo espacial del país. Se creará la Agencia Nacional de Seguridad Digital y Asuntos Espaciales como parte de la estructura de la Presidencia de la República, cuya Dirección Nacional de Asuntos Espaciales tendrá como objetivo establecer la gobernanza e institucionalidad del sector espacial en Colombia, y consolidar, planificar, articular y ejecutar programas y estrategias relacionadas con el desarrollo y ejecución de una “Política Espacial Colombiana”, en colaboración con el sector productivo y la academia. Esta Dirección representará al Estado colombiano en asuntos espaciales y liderará su participación en el ámbito internacional. Además,

diseñará e implementará estrategias de desarrollo productivo en el sector espacial, considerando la industria, los procesos de ciencia, tecnología e innovación, y los instrumentos de cooperación internacional (Planeación, 2023).

Durante las últimas dos décadas, Colombia ha logrado avances significativos en el sector espacial, destacándose en el desarrollo de pequeños satélites y en la creación de infraestructuras terrestres para el monitoreo espacial. La Universidad Sergio Arboleda de Bogotá, por ejemplo, desarrolló el primer picosatélite colombiano, Libertad 1.1 (Salazar, 2018). Además, diversas universidades del país han establecido estaciones terrenas para el monitoreo de satélites en órbita baja terrestre (LEO) (Espíndola, 2011).

En este contexto, la Fuerza Aérea Colombiana (FAC), en el marco de la estrategia para el desarrollo aéreo y espacial EDAES, ha adelantado el programa FACSAT en proyectos como el FACSAT-1, un CubeSat para la observación de la Tierra operado por la FAC desde su lanzamiento en 2018 hasta su reingreso en junio de 2023. Además, ha participado un equipo en el diseño, ensamblaje, integración, pruebas y lanzamiento del FACSAT-2, lanzado el 15 de abril de 2023. Este satélite es monitoreado y controlado desde la Estación de Comando y Control ubicada en el Centro de Operaciones Espaciales de la FAC. Asimismo, con la primera expedición antártica de comunicaciones satelitales desarrollada en 2018, la FAC ha proyectado la instalación de una estación de monitoreo y control en la Antártida para fortalecer la capacidad de comunicación con los activos espaciales, con el fin de integrar las capacidades de comando y control de estos activos con la capacidad para capturar datos de espectrometría (Jiménez R, 2019).

La estrategia de la FAC para el desarrollo aéreo y espacial, definida en el EDAES y en el estudio de partes interesadas, resalta la importancia de adquirir y mantener una constelación de satélites con aplicaciones y capacidades en observación de la Tierra, comunicaciones, inteligencia de señales, aplicaciones ambientales, científicas y militares. Esta estrategia reconoce la necesidad de capacidades aeroespaciales avanzadas para el desarrollo y la seguridad nacional de Colombia (Fuerza Aérea, 2020).

La instalación de una estación terrena temporal en la Antártida se realizó en la Base General Bernardo O'Higgins de Chile, evaluando las condiciones logísticas y técnicas del lugar para el despliegue y operación. Este documento presenta una visión general de la operación de la estación terrena prototipo y detalla los componentes de la estación terrena temporal en la Antártida, incluyendo antenas, sistemas de rotores, alimentación, almacenamiento y radios de comunicación. También se exploran los resultados y conclusiones de esta implementación (Council of Managers of National Antarctic Programs, 2017).

En particular, el programa “Capacidades Satelitales FAC en la Antártica” busca emplear los sensores del FACSAT-2 para medir la concentración de gases de efecto invernadero en la región austral, lo cual es crucial para abordar el impacto del cambio climático. El espectrómetro integrado en el FACSAT-2 permite medir las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) (THOT, 2018), complementado por una cámara multispectral de siete bandas que proporciona imágenes georreferenciadas.

Finalmente, al desplegar una estación terrena temporal, se extienden las capacidades de comando y control de la FAC para operar los activos espaciales. La ubicación futura de esta estación en el continente antártico permitirá un acceso más frecuente para la descarga de datos, conforme a la órbita polar del satélite. Una vez descargados y

debidamente almacenados, los datos podrán ser entregados a personal especializado para su análisis y contribución en la generación de mapas de concentración de gases de efecto invernadero a nivel global, proporcionando insumos a la comunidad científica para generar estrategias de mitigación que contribuyan al desafío de frenar el avance de los efectos del cambio climático, especialmente en la región antártica, donde se observan de manera más acentuada los estragos de este fenómeno.

Palabras Clave: Satélites; estación terrestre; comunicaciones; nanosatélite; Antártida.

2. REVISIÓN DE LA LITERATURA

Cambio climático

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) se creó en 1988 para facilitar evaluaciones integrales sobre el estado de los conocimientos científicos, técnicos y socioeconómicos sobre el cambio climático, sus causas, repercusiones y posibles estrategias de respuesta (IPCC, 2012). Según el IPCC, el cambio climático se refiere a la variación del estado del clima identificable (por ejemplo, mediante pruebas estadísticas) en las variaciones del valor medio o en la variabilidad de sus propiedades, que persisten durante períodos prolongados, generalmente décadas o más. Este cambio puede deberse a procesos internos naturales o a forzamientos externos, como modulaciones de los ciclos solares, erupciones volcánicas y cambios antropógenos persistentes de la composición de la atmósfera o del uso de la tierra (Planton, 2013).

El último informe del IPCC, publicado en agosto de 2021, señala que los científicos observan cambios en el clima de la Tierra en todas las regiones y en el sistema climático en su conjunto. Muchos de estos cambios no tienen precedentes en miles, sino en cientos de miles de años. Algunos de estos cambios, como el aumento continuo del nivel del mar, no se podrán revertir hasta dentro de varios siglos o milenios (Masson-Delmotte, 2021).

Nanosatélite de observación terrestre

Un satélite artificial es un vehículo espacial puesto en órbita alrededor de la Tierra (o de algún otro astro), equipado con tecnología para recopilar y retransmitir información. Los satélites artificiales pueden orbitar alrededor de otros cuerpos como asteroides, planetas y estrellas. Al final de su vida útil, pueden quedar orbitando como basura espacial.

Según su funcionalidad, los satélites pueden tener una órbita baja, media, elíptica o geoestacionaria. Están compuestos por una plataforma de servicios e instrumentos a bordo (carga útil). El satélite artificial es una de las herramientas más útiles que el ser humano ha creado, diseñado como un conglomerado de instrumentos situados en una plataforma espacial. Permite obtener el mejor punto de vista para observar y controlar la Tierra, así como para visualizar el cosmos sin la interposición de la atmósfera.

Los satélites de observación terrestre varían según el tipo de órbita que describen, la carga útil a bordo y los instrumentos de generación de imágenes, como la resolución

espacial, las características espectrales y la amplitud de franja de los sensores. Estos parámetros se definen al inicio de la misión, dependiendo de la aplicación para la que se destine el satélite (Center Langley Research, 2021).

Teledetección

La teledetección es la capacidad de un sensor para capturar información. La Agencia Espacial Europea lo define como un modo de obtener información acerca de objetos tomando y analizando datos sin que los instrumentos empleados para adquirir los datos estén en contacto directo con el objeto. Se divide en cuatro elementos esenciales: (1) una plataforma para sostener el instrumento, (2) un objeto a observar, (3) un instrumento o sensor para observar el objeto y (4) la información obtenida con los datos de la imagen y cómo se emplea y almacena esta información (ESA, 2024).

Espectrometría satelital

La espectrorradiometría solar surge dentro de las aplicaciones de las técnicas de espectroscopía óptica, en las cuales se pueden inferir propiedades fisicoquímicas de un medio o sustancia bajo estudio, a partir del análisis de los cambios experimentados en las propiedades de un haz de luz luego de interactuar con dicha sustancia (Clemente, 2016). En este caso, el medio a estudiar es la atmósfera terrestre, y la fuente de luz utilizada para este estudio es la radiación solar (Bolaño-Ortiz, 2019).

En comparación con las mediciones en tierra, la principal ventaja de las mediciones por satélite es su capacidad para proporcionar una cobertura global. Las mediciones por satélite derivan las concentraciones atmosféricas de los gases utilizando las propiedades de estos para absorber la radiación electromagnética en longitudes de onda específicas. Los instrumentos emplean principalmente la radiación solar reflejada en la superficie terrestre, aunque algunos pueden usar la radiación emitida por la Tierra o los láseres a bordo del satélite. Un instrumento que mide la radiación en longitudes de onda específicas se conoce como espectrómetro.

Estación terrena satelital

El segmento terrestre está conformado por las estaciones terrenas y el Centro de Operaciones de Misión (MOC), que permiten realizar actividades desde Tierra para establecer el enlace de comunicaciones adecuado y enviar y recibir los datos del satélite. Este proceso incluye la adquisición, el procesamiento y la elaboración de los productos.

- *Estación terrena: está conformada por los equipos y componentes necesarios para permitir las comunicaciones de un punto en Tierra y el satélite.*
- Centro de Operaciones de Misión: la función principal es la de ejercer control, operación, mantenimiento, comprobación y cuidado del satélite durante su vida útil.

Estación Terrena Satelital

Según Mesa (2019), la estación terrena satelital comprende una infraestructura tecnológica conformada por dispositivos de hardware y software que permiten la

comunicación desde la Tierra con un satélite. De manera general, el término estación terrena hace referencia al conjunto de hardware y software instalados en tierra necesarios para la transmisión y recepción de señales entre la estación y el segmento espacial.

Sistema de Protección Radomo

Los sistemas de protección son aquellos que protegen los sistemas satelitales terrestres de las condiciones medioambientales. La estación terrena que se empleará en el despliegue temporal en territorio antártico debe contar con un sistema de protección para su correcta operación. Estos sistemas pueden ser radomos, cortavientos o mantas térmicas. Según Tahseen (2021), el radomo (derivado de RADAR + Dome) se define como “un elemento para proteger el elemento radiante (antena) de condiciones tales como viento, lluvia, rayos, hielo y temperaturas extremas. El radomo actúa como una ventana electromagnética que protege las partes expuestas de una antena”, permitiendo la correcta transmisión y recepción de señales gracias a sus bajas pérdidas.

Estructura Cortaviento

Una estructura cortaviento está diseñada para proteger los productos expuestos directamente a condiciones climáticas extremas, como vientos intensos, material suelto en el suelo y ráfagas de nieve. Estas estructuras reducen el riesgo de impactos por el material suelto y el balanceo debido a las fuertes corrientes de aire.

Mantas Térmicas

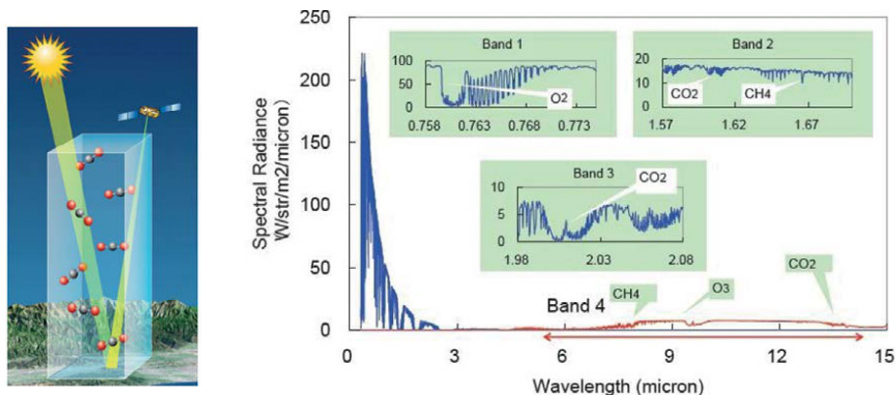
Cubrir los componentes esenciales de la antena con mantas térmicas en la Antártida es crucial para preservar su integridad y funcionalidad en un entorno tan hostil. Estas mantas protegen contra las temperaturas extremas, los vientos fuertes, la humedad, la corrosión y la radiación solar, lo que asegura el rendimiento y la durabilidad a largo plazo. Este sistema mejora los tiempos de instalación y reduce costos sin la necesidad de una estructura adicional, como un cortaviento o un radomo.

Mediciones Satelitales de las Concentraciones de Gases de Efecto Invernadero

La principal ventaja de las mediciones por satélite frente a las mediciones en tierra es su capacidad para proporcionar cobertura global. Estas mediciones derivan las concentraciones atmosféricas de los gases utilizando las propiedades de los mismos para absorber radiación electromagnética en longitudes de onda específicas. Los instrumentos de medición, en su mayoría, utilizan la radiación solar reflejada por la superficie de la Tierra, aunque algunos también pueden utilizar la radiación emitida por la Tierra o los láseres a bordo del satélite. Un instrumento que mide la radiación en longitudes de onda específicas se conoce como espectrómetro. Los espectrómetros acondicionados como carga útil en satélites emplean varias longitudes de onda para medir el CO₂ y el CH₄ según sus espectros de absorción. Los satélites que observan las longitudes de onda más cortas del infrarrojo cercano son sensibles a las concentraciones de CO₂ cerca de la superficie y han demostrado

ser los más útiles para investigar las emisiones de la superficie. Otros satélites, como los satélites AIRS e IASI, detectan concentraciones de CO₂ en la troposfera media, aproximadamente entre 6 y 11 km por encima de la superficie de la Tierra, utilizando longitudes de onda infrarrojas térmicas más largas.

Figura 1. Ilustración de la detección de la radiación solar reflejada por el satélite OCO-2 y líneas de absorción observadas por GOSAT debidas a CO₂ y CH₄



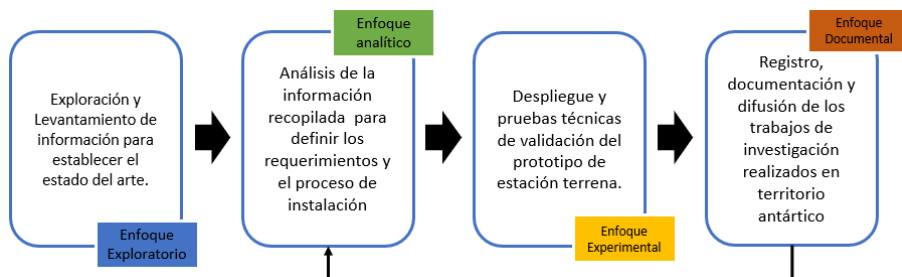
Fuente: NASA-JPL / JAXA.

3. METODOLOGÍA

En función del propósito con el que se desarrollará el trabajo de investigación, este se enmarca metodológicamente en un tipo de investigación aplicada, ya que no se pretende explicar una variedad de situaciones, sino abordar el problema mediante la exploración de la teoría e investigaciones previas, con el fin de generar conocimiento práctico sobre las capacidades del segmento terrestre en una base temporal en la Antártica. Esto permitirá garantizar la telemetría, telecomando y descarga de datos del FACSAT-2, y generar productos útiles para el análisis de gases de efecto invernadero y su impacto en el continente antártico.

Para su ejecución, se emplearán cuatro enfoques: el primero es un enfoque exploratorio, que tiene como objetivo obtener la información y establecer el estado del arte; el segundo es un enfoque analítico, que permitirá procesar la información recopilada para definir los requerimientos funcionales y los procesos de instalación del segmento terrestre; el tercero es un enfoque experimental, destinado a realizar el despliegue y las pruebas técnicas de validación del prototipo de estación terrena; y el último es un enfoque documental, cuyo propósito es registrar, documentar y difundir los resultados de los trabajos de investigación realizados en territorio antártico.

Figura 2. Enfoques para el desarrollo de la metodología



4. DESARROLLO

Cuando se trata de llevar a cabo una instalación en uno de los entornos más extremos y desafiantes, como lo es la Antártica, se plantean una serie de desafíos únicos y críticos que requieren una planificación y ejecución meticulosas.

El propósito de este capítulo es explicar el proceso de ensamblaje, integración y pruebas del despliegue de la estación terrena prototipo instalada temporalmente en territorio antártico, para la operación de activos espaciales, con el fin de validar el funcionamiento de la interfaz de radio de banda S para telecomando, telecontrol y descarga de datos de espectrometría entre la estación terrena desplegada y el FACSAT-2, con un sistema de protección integrado que permita su operación en las condiciones ambientales y climáticas de la Antártica.

4.1. Lugar de la Misión

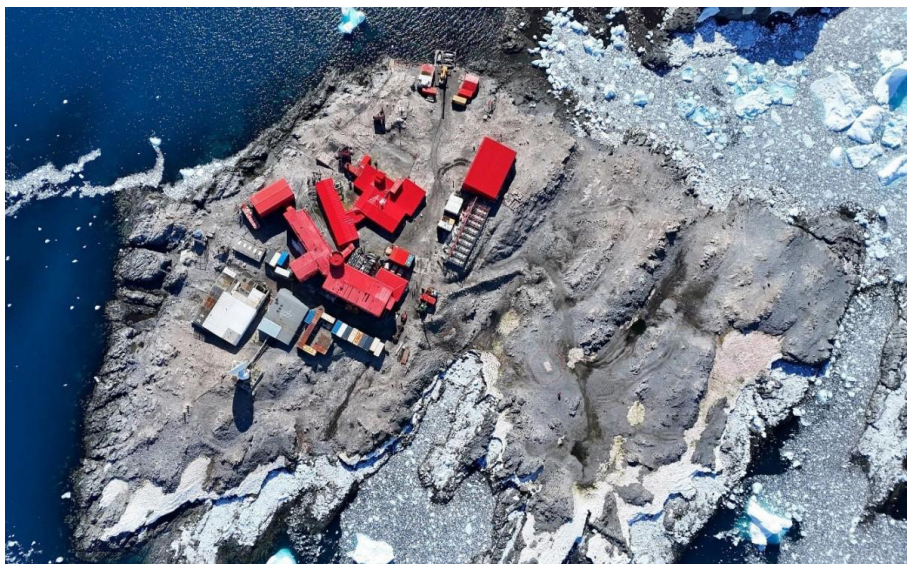
La Base General Bernardo O'Higgins, perteneciente al Ejército de Chile, es la segunda base en la historia del país establecida en el continente blanco, adaptada a condiciones extremas (INACH, 2024). Es una importante instalación de investigación que ha contribuido significativamente al conocimiento científico de esta región remota. Además de sus actividades de investigación, desempeña un papel crucial en la logística y el apoyo a otras bases chilenas en la Antártica.

La base se utiliza para realizar investigaciones científicas en meteorología, geología, biología marina y oceanografía. Cuenta con varias instalaciones, incluidos laboratorios, alojamiento para investigadores y personal, áreas de almacenamiento, y una pista de aterrizaje para aviones pequeños. Dependiendo de la estación del año, la base alberga a un número considerable de científicos, personal de apoyo y personal de mantenimiento. El personal debe tener en cuenta que promover la comunicación y el trabajo en equipo es esencial para optimizar y garantizar la seguridad y eficiencia durante la instalación, operación y mantenimiento de la misión.

Por otra parte, los proyectos de investigación varían en disciplinas, y van desde estudios de la fauna local hasta investigaciones sobre el cambio climático. Como lo describe Vergara-Escobar (2021) en su artículo *Corporalidades: cuerpos producidos en una cuidadosa Antártica*:

Según el Tratado Antártico, el territorio se regula a partir de los principios de paz y ciencia, configurando un continente libre de relaciones bélicas, funcionando por acuerdos internacionales, respaldo nacional y protocolos para la vida científica. Todo lo militar que pueda encontrarse debe estar dirigido al apoyo científico, y los cuerpos que habitarán el espacio serán científicos y logísticos. (p.13)

Figura 3. *Base General Bernardo O'Higgins*



Fuente: FAC (2021).

4.2 Capacitación y elementos de seguridad en la Base O'Higgins

Una de las capacitaciones recibidas por el personal de la FAC antes de partir hacia la comisión Antártica se lleva a cabo en Cartagena, a cargo de la Comisión Colombiana del Océano, donde se capacita al personal en procesos de evacuación de botes, uso de chalecos salvavidas, manejo de recursos básicos y procedimientos de asistencia a personal herido.

Asimismo, una vez que el personal llega a las instalaciones de la base, recibe una capacitación de seguridad en la Antártica, que incluye la conciencia y preparación para enfrentar condiciones climáticas extremas, protocolos de comunicación, la exposición al frío y la altitud, así como los procedimientos de evacuación en caso de emergencia ya establecidos por el personal en O'Higgins.

Teniendo en cuenta las condiciones de frío a las que se enfrenta el personal en territorio antártico, se hace hincapié en el uso adecuado y correcto de elementos como ropa de protección o trajes para las bajas temperaturas. Es esencial que el personal haga uso de estos elementos mientras realiza actividades en el exterior para

evitar situaciones de congelamiento. Dentro de la vestimenta térmica e impermeable se destacan las siguientes:

- Botas.
- Guantes de primera y segunda capa.
- Gorro.
- Cuello.
- Pasamontañas.
- Chaqueta tercera capa.
- Buso segunda capa.
- Pantalón segunda capa.
- Pantalón primera capa.
- Indumentaria de primera capa completa.
- Gafas (con protección solar y de viento)

Para el desarrollo de una misión en estas condiciones, es importante contar con estos elementos que permitan al personal investigador llevar a cabo sus actividades de manera normal.

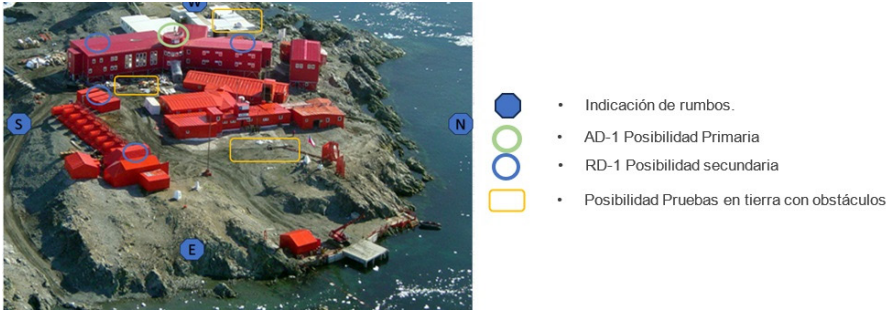
4.3 Preparación del sitio – (Sitesurvey)

De acuerdo con las normas establecidas en la base O'Higgins y la delimitación inicial de las zonas para el montaje, se realizó un estudio de campo conocido como *sitesurvey*, dividido en dos fases. La primera fase tiene como objetivo definir el sitio físico de instalación de la antena, y la segunda, el análisis de interferencias que puedan afectar la comunicación con el activo espacial.

En la fase 1, se llevó a cabo un reconocimiento de campo en los alrededores de la base para determinar los puntos más altos, estables, con fluido eléctrico cercano y logísticamente de fácil acceso para efectuar el procedimiento de instalación de la antena, considerando las dimensiones y el peso de la misma. En esta fase también se evaluó la ubicación, teniendo en cuenta la necesidad de no interferir con las actividades diarias de la base, ya que los trabajos diarios podrían interrumpir la operación en la zona seleccionada. Otro aspecto relevante considerado fue el impacto ambiental, con el fin de generar la menor alteración posible al ecosistema.

Una vez finalizada esta actividad de levantamiento de campo, se realizó el análisis pertinente del área de interés, donde se definieron las opciones de los lugares con mayor altura, menor afectación de fauna y flora, y la no presencia de obstáculos para verificar el seguimiento del satélite. En la Figura 4 se evidencian los sitios considerados como posibles ubicaciones:

Figura 4. Imagen ilustrativa de la base Bernardo O'Higgins con la solicitud de los puntos para la instalación



Fuente: Tomada de la página Web <https://www.ejercito.cl/prensa/visor/base-antartica-del-ejercito-general-bernardo-o-higgins-75-anos-de-presencia-y-servicios-ininterrumpidos>.

La primera opción considerada, AD-1, fue contemplada antes de viajar a la base O'Higgins, basándose en la experiencia de la expedición de 2018, que realizó pruebas de seguimiento al activo espacial FACSAT-1. Sin embargo, una vez se inspeccionó el lugar, se verificó que la estructura podría no ser lo suficientemente fuerte como para soportar el peso de la antena de la estación terrena prototipo. Adicionalmente, se encontraron sistemas de comunicaciones y satelitales instalados para soportar los servicios de la base, lo que limitaba el espacio de maniobra para una instalación en este punto.

Teniendo en cuenta las observaciones realizadas por la base Bernardo O'Higgins, también se consideraron los techos de la unidad. Sin embargo, estos fueron descartados debido a que no contaban con puntos fijos para anclar la antena y evitar los fuertes vientos. Por lo tanto, se definió que la zona de contenedores era la que menor impacto tendría en las actividades logísticas de la unidad, y adicionalmente se lograría ganar la altura necesaria para evitar los obstáculos alrededor.

Figura 5. Lugar para instalación de la Antena



Fuente: Elaboración propia.

La Figura 5 muestra el sitio seleccionado para realizar el despliegue. Se procede a fijar la antena sobre la superficie de uno de los contenedores, los cuales proporcionan una altura adecuada para superar obstáculos y garantizar una mejor ubicación para la antena. Durante el proceso de instalación, se contó con la colaboración logística del personal de la base y con el apoyo de una grúa para elevar la antena desde el suelo hasta la parte superior del contenedor, lo cual disminuyó los tiempos de instalación al contar con equipo especializado para esta actividad.

Sin embargo, debido a las necesidades logísticas de la base, se realizó un movimiento de contenedores, lo que hizo necesario detener las actividades y esperar el movimiento final para iniciar con el proceso de instalación. Estos movimientos no generaron un gran impacto, y después de tres días se logró completar la instalación del sistema.

Figura 6. *Lugar fijo establecido para la instalación de la antena*



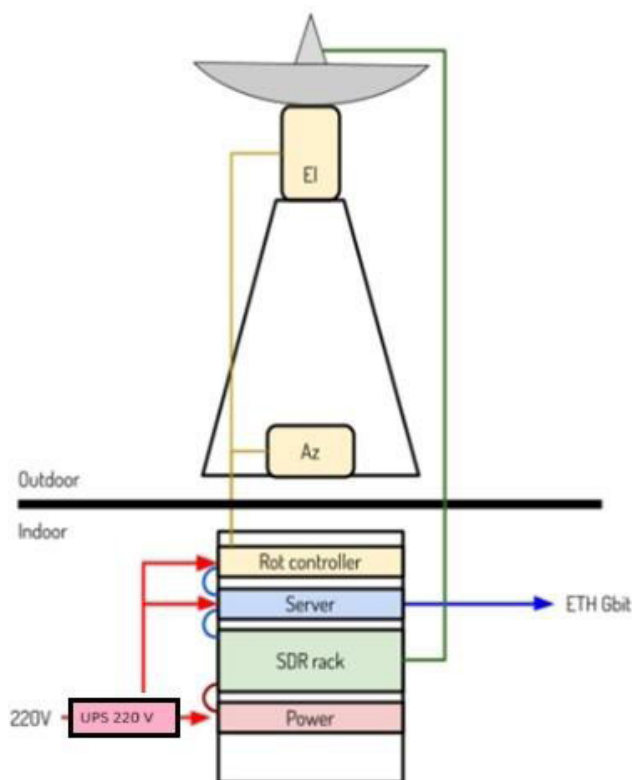
Fuente: Elaboración propia

Para la segunda fase de reconocimiento del sitio, se lleva a cabo un análisis de interferencia electromagnética utilizando un analizador de espectro, con el fin de identificar si en el área de despliegue existen frecuencias o comunicaciones en banda S que puedan afectar la recepción de las señales provenientes del FACSAT-2. La única señal identificada fue la de 2.4 GHz por el radial 330 desde la posición de la antena, que corresponde al servicio de internet de la base de O'Higgins.

• Arquitectura del Sistema y Componentes

Una vez completado el ensamblaje estructural de la antena y verificada su instalación, es necesario realizar un chequeo de los equipos instalados para confirmar su correcta integración. En esta sección se describe el procedimiento general, considerando el diagrama general del sistema y de sus diferentes componentes (Figura 7).

Figura 7. Diagrama de bloques inicial de Los componentes de la Antena



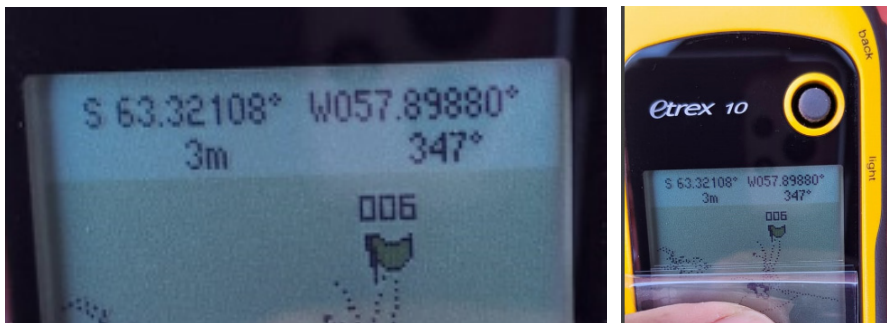
Fuente: GS-Kit S-Band Datasheet.

Los equipos se dividen en aquellos que están expuestos, como los rotores, amplificadores de bajo ruido, antena y estructura, conocidos como equipos **outdoor**, y los que se encuentran dentro de instalaciones, normalmente desde donde se opera el sistema, como el sistema de SDR, sistema UPS, control de rotores y servidores de almacenamiento, denominados equipos **indoor**. A continuación, se presentan algunas de las consideraciones:

- **Alimentación de dispositivos:** Antes de iniciar el seguimiento de la antena, es esencial alimentar todos los dispositivos y componentes con los que la antena interactúa mediante la fuente de voltaje, como el SDR, el monitor o portátil, el control de motores y el servidor (RACK).

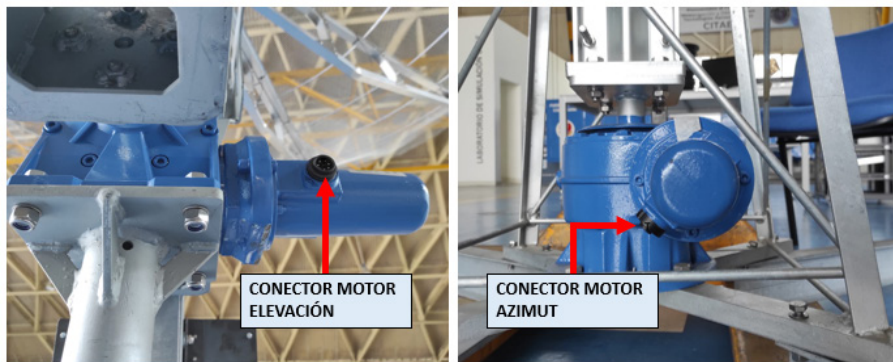
- **Conexiones de conectores:** Se dirigen los cables tipo macho con su respectivo conector existente en cada motor, de elevación y de azimut, como se observa en la siguiente imagen. El otro extremo del cable se conecta al controlador de motores mostrado en la Figura 9.
- **Preparación y planificación:** Antes de iniciar el seguimiento de la antenna, es esencial realizar una planificación cuidadosa. Esto incluye conocer las coordenadas exactas de la ubicación de la antenna en la Antártida y la ubicación del satélite o el objeto que se va a rastrear.

Figura 8. Coordenadas de la ubicación de la antenna en Antártica



Fuente: Elaboración propia.

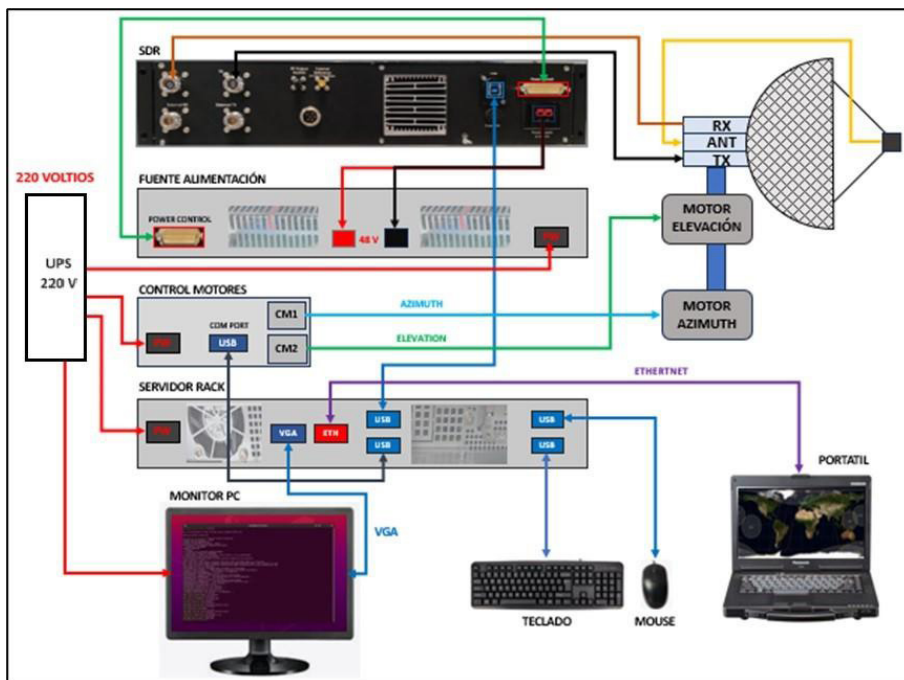
Figura 9. Conexión de motores



Fuente: Elaboración propia.

4.4 Diagramas de conexiones

Para obtener datos óptimos desde la estación terrena, es necesario enrutar correctamente el cableado y las conexiones entre la antenna y los dispositivos. En la Figura 10 se observa el diagrama de conexiones que debe considerarse y revisarse antes de iniciar la operación de la estación terrena satelital:

Figura 10. Diagrama de conexiones

Fuente: Elaboración propia.

Para establecer una operación coherente y eficiente, es esencial comprender las conexiones cruciales entre un SDR (Radio Definida por Software), la antena, la fuente de alimentación, el control de motores y el servidor rack. En primer lugar, la antena se conecta al SDR mediante los cables RX (recepción) y TX (transmisión), que transmiten las señales de radiofrecuencia capturadas o enviadas a través del foco o “feeder” de la antena.

El SDR, a su vez, se alimenta mediante una fuente de alimentación a 48 Voltios, asegurando un suministro constante y estable de energía para su funcionamiento continuo. Este SDR se encarga de los procesos de modulación y demodulación de las señales recibidas o transmitidas, convirtiendo las señales de frecuencia intermedia en señales de banda base para ser enviadas al servidor desde donde se controla la estación y se visualiza la información.

El control de motores, fundamental para ajustar la orientación y dirección de la antena, permite efectuar la calibración en azimut y elevación para realizar el seguimiento correcto del satélite objetivo. Se conecta al servidor rack mediante cable USB.

El servidor actúa como un centro de almacenamiento y procesamiento, recibiendo la información captada por el SDR y garantizando su almacenamiento seguro. En conjunto, estas conexiones forman un sistema de comunicaciones que permite la

recepción, procesamiento y análisis de datos críticos para la planificación y ejecución de la operación de los activos espaciales, que se podrán observar o monitorear mediante el dispositivo portátil. La correcta configuración y mantenimiento de estas conexiones son fundamentales para garantizar el funcionamiento óptimo de todo el sistema y el éxito de la misión.

4.5 Descripción de Software

La estación terrena está equipada con un servidor que opera con el sistema operativo Ubuntu 20.04. Este sistema operativo, conocido por su robustez y su naturaleza de software libre, ofrece una amplia gama de recursos para aprender sobre su funcionamiento y facilita la implementación de soluciones para diversos sistemas que puedan requerirse. En el caso práctico específico, Ubuntu 20.04 se utilizó para ejecutar aplicaciones como Docker y GNU Radio, así como para establecer conexiones de control con los equipos que forman parte de la estación terrena, tales como:

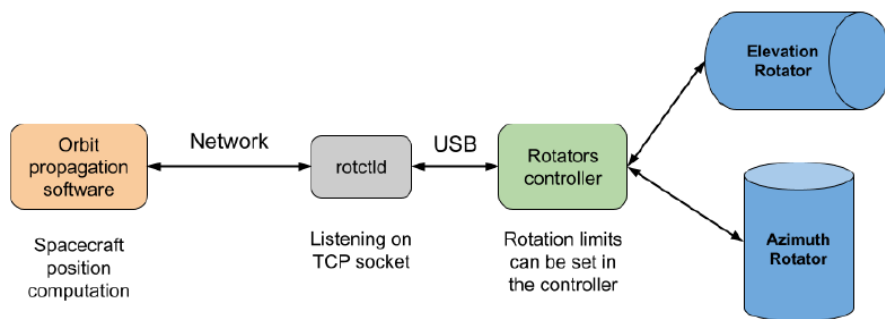
- Control de rotores
- Control de la SDR de Alen Space
- Comunicación con Fortigate
- Internet Satelital Starlink

Dentro del software con que se contaba para realizar las tareas se encuentran:

4.5.1 Control de rotores

El software llamado **rotctld** es un programa de control del rotador **hamlib**, listo para pruebas, que gestiona las solicitudes de los clientes a través de sockets TCP, permitiendo que varios programas controlen los rotores.

El protocolo es simple: los comandos se envían a **rotctld** en una línea y **rotctld** responde a los comandos “**get**” con los valores solicitados, uno por línea, cuando tiene éxito. En caso contrario, responde con una línea “**RPRT x**”, donde **x** es un número negativo que indica el código de error. Los comandos que no devuelven valores responden con la línea “**RPRT x**”, donde **x** es cero cuando tiene éxito; de lo contrario, es un número negativo que indica el código de error. Cada línea se termina con un carácter de nueva línea “**\n**” (Ubuntu, 2019).

Figura 11. Interface de control de rotores

Fuente: Tomado de Gs-kit Software ManuaAX2150

La Figura 11 muestra un diagrama de bloques que visualiza las conexiones y elementos involucrados en el movimiento de los rotores, siguiendo la trayectoria del satélite. Esta configuración es crucial y requiere que los relojes del servidor se mantengan actualizados y sincronizados, evitando discrepancias entre los grados de elevación y azimut con los grados y tiempos previstos para el paso del satélite.

4.5.2 Calibración de Rotores

Para realizar el ajuste de los rotores, se debe conocer la posición exacta de la antena y orientar el feeder de la antena a 0° de elevación y 0° de azimut. Una vez establecido esto, se deben medir las direcciones y realizar la calibración con el software Pro.Sis.Tel Box COMBO, el cual se utiliza para la calibración y ajuste de velocidades.

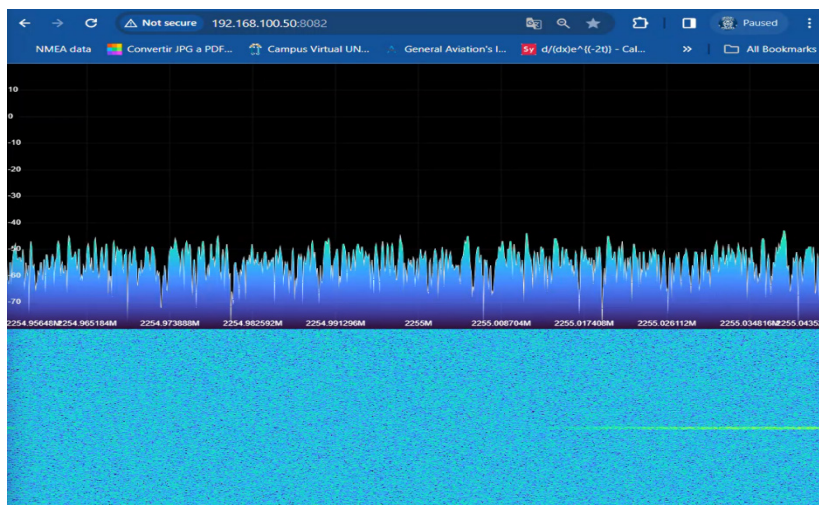
Figura 12. Software de Calibración y ajuste de Elevación y Azimuth

Fuente: Elaboración propia.

4.5.3 Control de la SDR de Alen Space

Para el control de la SDR, se realizan pruebas del software utilizado en el funcionamiento de la antena, como el software llamado “waterfall” (espectrograma), para verificar la señal obtenida por la antena en la frecuencia seleccionada.

Figura 13. *Software analizador de espectro de la SDR*



Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica anterior, se evidencia la señal obtenida en uno de los pases del FACSAT-2, donde se reciben los beacons de transmisión de datos del satélite.

4.6 Sistema de Protección

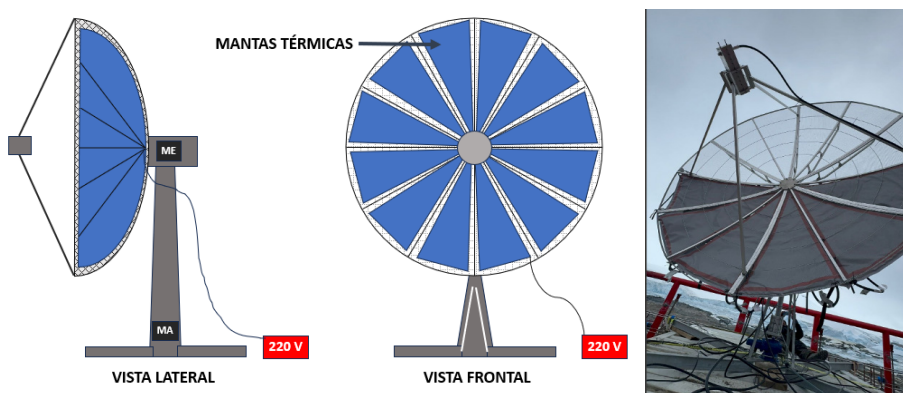
Para las operaciones en condiciones antárticas, se debe considerar un sistema de protección que permita la operación de los componentes dentro de sus parámetros nominales. Este sistema debe garantizar la operación de la antena sin afectar su funcionalidad de seguimiento de satélites, ser desplegable, de fácil instalación y transportable.

Para seleccionar este equipo, se realizó un estudio de viabilidad, en el que se identificaron más de cinco soluciones posibles. Entre ellas, se destacaron el sistema radome fijo, el radome plegable y los sistemas de protección térmica. Después de analizar factores como el costo, los tiempos de instalación, la facilidad de instalación, la no necesidad de personal calificado, el impacto ambiental y la versatilidad para el transporte, se seleccionó el sistema suministrado por la empresa Power Blanket. Este sistema fue diseñado a medida, de acuerdo con el tamaño del plato de la antena (3 metros), y permite, mediante control de temperatura, retirar hielo y nieve de la superficie para asegurar la correcta operación y seguimiento de los activos espaciales.

El diseño se centró en fabricar las mantas según el tamaño de los pétalos, con el objetivo de hacerlas más ligeras y transportables. Por lo tanto, se adquirieron los siguientes componentes, que forman parte del sistema de protección.

- Doce Mantas térmicas con conexión hembra en un extremo y macho en el otro.
- Cable de conexión hembra para conectar el extremo de la última manta con la alimentación a tierra.
- Caja de control de regulación de temperatura.
- Líneas de amarre y sujeción de las mantas.

Figura 14. *Instalación de Mantas*



Fuente: Elaboración propia.

4.7 Objetivos de instalación del Sistema de Protección

- Garantizar la operación continua de la antena para asegurar una comunicación confiable y constante con el satélite FACSAT-2 durante la misión en condiciones extremas.
- Asegurar la integridad y transparencia de los datos recibidos y transmitidos.
- Mantener la antena operativa durante todo el período de la misión.
- Asegurar que todo el personal involucrado en la instalación y operación esté capacitado para adaptar este sistema.
- Implementar medidas y sistemas de protección adecuados para resguardar la antena y todos los equipos relacionados de las condiciones extremas y los riesgos ambientales en la Antártida.
- Contribuir a la generación de datos científicos o técnicos que puedan ser utilizados para investigaciones adicionales y/o mejoras en futuros proyectos de comunicación satelital.

4.7.1 Instalación de sistemas de protección

La instalación de las mantas es un proceso sencillo, ya que el diseño fue concebido para que cada pétalo esté cubierto por una manta. Estas mantas generan la temperatura necesaria para prevenir la formación de hielo o, si este ya se ha formado, derretirlo. Se dispone de un total de 12 mantas que cubrirán todo el plato de la antena. Las mantas deben conectarse en serie para alcanzar las temperaturas configuradas, calentándose paulatinamente hasta alcanzar los 70° Fahrenheit, temperatura que puede ser ajustada por el operador según las necesidades y condiciones de operación. Para una correcta instalación, se deben seguir las siguientes consideraciones:

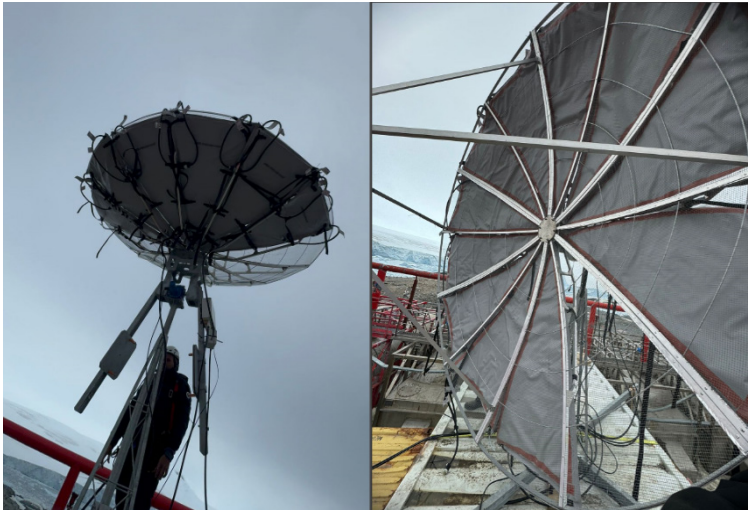
1. Encender el sistema de control de rotación y conectar el computador de configuración. Luego, ingresar al software de la antena para configurarla en azimuth y elevación, permitiendo la rotación de 0 a 360 grados y la elevación de 0 a 90 grados.
2. Calibrar el sistema de acuerdo con las referencias geográficas, configurando el azimuth en cero grados apuntando hacia el norte geográfico. Es importante usar sistemas de ubicación de alta precisión, ya que los sistemas comunes de brújulas pueden verse afectados por la cercanía al polo sur, lo que ocasionaría un error en la calibración del sistema y afectaría la capacidad de seguimiento de los activos espaciales.
3. Considerar la operación a partir de los 10° de elevación, teniendo en cuenta los obstáculos cercanos.

4.7.2 Proceso de instalación de las mantas:

Las mantas térmicas fueron transportadas a la Antártida con el fin de analizar y estudiar su importancia para la operación del sistema de la estación terrena portátil en condiciones extremas. Por esta razón, se definió el procedimiento de instalación para futuros despliegues en territorio austral. El procedimiento consiste en:

1. Seleccionar cualquier manta e iniciar la instalación desde la parte central del pétalo hasta la parte final, asegurando las correas de la manta sobre la superficie del pétalo de la antena.
2. Repetir el proceso hasta cubrir los seis pétalos de la mitad del plato.
3. Encender la antena, asegurándose de que todas las correas estén correctamente sujetas, y realizar un movimiento de elevación hasta alcanzar el rango de cero a 180 grados para cambiar el lado de las mantas.

Figura 15. Giro de la antena de su posición 0° a 180° grados



Fuente: Elaboración propia.

1. Repetir el paso 1, se instalación de las mantas hasta tenerlas instaladas por completo.
2. Realizar ajustes generales de amarrado y sujeción de los conectores.

Este proceso se realiza con el propósito de proteger la antena contra la formación de hielo o para generar calor y derretir el hielo ya formado. Debido al diseño de la antena tipo malla, la formación de hielo tarda más tiempo en comparaci^ón con otras superficies, como los motores. Sin embargo, gracias al diseño de las mantas, estas pueden instalarse tanto sobre los motores como sobre otras superficies, seg^{ún} sea necesario y seg^{ún} la forma en que se fijen al elemento requerido.

4.7.3 Verificación de la funcionalidad del sistema de protección

Una vez finalizada la instalaci^ón del sistema de protecci^ón, es importante comprobar la rotaci^ón y elevaci^ón del sistema para verificar si es necesario realizar calibraciones adicionales en el torque de los rotores. Esto se debe a que las mantas aumentan la superficie de resistencia al viento, lo que puede afectar el movimiento natural de la antena. Por lo tanto, se define un cuadro de verificaci^ón en diferentes posiciones para la antena, como se presenta a continuaci^ón:

Tabla 1. Grado de verificaci^ón de la antena con mantas instaladas

AZIMUTH	AZIMUTH	ELEVACI ^Ó N	ELEVACI ^Ó N
0	20	0	15
20	45	15	30

AZIMUTH	AZIMUTH	ELEVACIÓN	ELEVACIÓN
45	60	30	60
60	80	60	90
80	120	90	0
120	140		
140	200		
200	220		
220	260		
260	320		
320	360		

Fuente: Elaboración propia.

Como resultado de la prueba de verificación, se identificó un movimiento adecuado de la antena. Sin embargo, cuando se presentaron ráfagas de viento, se observó que la antena se detenía de manera instantánea. Al verificar los manuales de los rotores, se determinó que el sistema de rotación tiene una configuración de seguridad que detiene automáticamente los motores cuando sobrepasan la rampa de torque, evitando posibles daños. Teniendo en cuenta esta situación, se tomaron acciones para compensar los pesos. Se añadió aproximadamente 2.2 kg por manta durante la instalación, por lo que se realizó un ajuste en el sistema de contrapesos de la antena para balancear el sistema durante el movimiento de tracking de los satélites.

Figura 16. Mantas instaladas totalmente sobre los pétalos



Fuente: Elaboración propia.

En conclusión, se determinó que:

- Cada Manta por instalar requiere un ajuste en las contrapesas de la antena para garantizar el movimiento en los grados de elevación.
- Los vientos fuertes afectan el comportamiento de la antena, considerando el peso adicional y el aumento en la superficie que generan mayor resistencia.
- Se deben realizar calibraciones en los rotores para darle continuidad al proceso de tracking.

De igual manera, con los datos de meteorología proporcionados por el personal de la Base General Bernardo O'Higgins se determinan dos factores a considerar que son:

- Temperaturas para la formación de hielo.
- Velocidad del viento para movimiento de la antena.

Dentro del rango de temperatura para la formación de hielo, se encuentran temperaturas entre -2°C y -15°C . Es decir, si la temperatura se encuentra en estos valores, es posible que se forme hielo sobre la superficie debido a la lluvia o llovizna, así como escarcha o helada por la congelación del vapor de agua en pequeños cristales de hielo (Argentina S. M.).

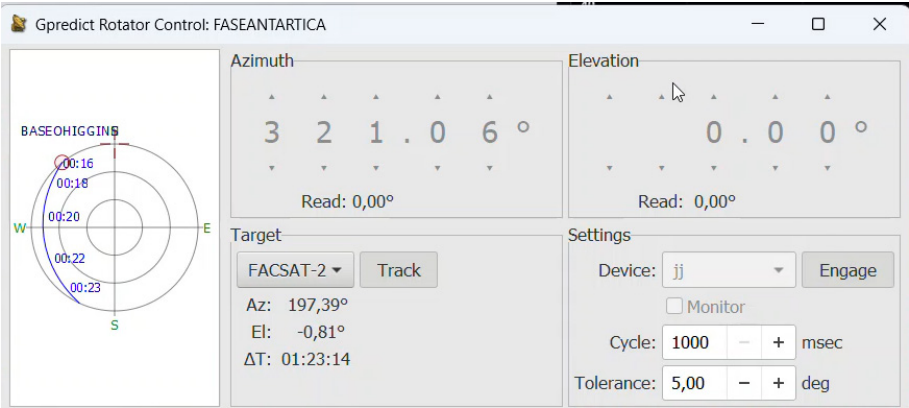
4.8 Calibración del sistema y puesta a punto de la estación terrena

Una vez finalizado el despliegue, las conexiones y la integración del sistema de protección, se inicia el proceso de calibración y puesta a punto de la estación. Este proceso consiste en realizar una verificación completa del sistema, ejecutando un seguimiento (tracking) a diferentes satélites en órbita, con el objetivo de asegurar su correcto funcionamiento para la recepción de datos del FACSAT-2.

El objetivo principal de la prueba es validar el seguimiento de activos espaciales. Para ello, se utiliza el software Gpredict, que permite hacer un seguimiento orbital de diferentes satélites a través de una interfaz visual que muestra información de azimuth y elevación cuando un satélite pasa por una coordenada específica. En este caso, se utiliza la ubicación de la estación terrena desplegada en la Antártida. El propósito es comparar los datos mostrados por Gpredict con los datos visualizados en el control de rotación de la antena, para asegurar que la estación terrena está realizando un correcto apuntamiento hacia el activo espacial. Se debe realizar un monitoreo constante de estos datos durante el pase para verificar si existen desfases en azimuth/elevación o desfases de tiempo durante el tracking.

Para realizar esta comparación, se verifican los pases existentes sobre la estación terrena y se realiza el seguimiento de estos pases con la aplicación Gpredict.

Figura 17. Interfaz Gpredict para comparación de datos con el control de rotores de la antena



Fuente: Gpredict.

Figura 18. Gpredict pases del satélite FASACT 2 mes febrero

Upcoming passes for FACSAT-2									
AOS	TCA	LOS	Duration	Max El	AOS Az	Max El Az	LOS Az	Orbit	Vis
2024/02/20 21:32:09	2024/02/20 21:37:44	2024/02/20 21:43:18	00:11:09	25,76°	346,32°	277,17°	200,92°	4821	V-E
2024/02/20 23:09:05	2024/02/20 23:12:27	2024/02/20 23:15:49	00:06:43	4,33°	288,11°	250,95°	214,21°	4822	V-E
2024/02/21 08:46:08	2024/02/21 08:51:11	2024/02/21 08:56:13	00:10:05	16,14°	156,37°	94,13°	31,07°	4828	-D-
2024/02/21 10:19:17	2024/02/21 10:25:00	2024/02/21 10:30:43	00:11:25	84,13°	163,04°	85,60°	342,56°	4829	-D-
2024/02/21 11:52:41	2024/02/21 11:57:53	2024/02/21 12:03:05	00:10:23	21,36°	165,95°	231,45°	297,71°	4830	-D-
2024/02/21 13:26:01	2024/02/21 13:29:59	2024/02/21 13:33:57	00:07:55	7,30°	165,55°	209,93°	254,41°	4831	-D-
2024/02/21 14:58:44	2024/02/21 15:01:32	2024/02/21 15:04:19	00:05:35	3,02°	157,42°	187,23°	216,99°	4832	-D-
2024/02/21 16:29:47	2024/02/21 16:32:55	2024/02/21 16:36:03	00:06:15	3,95°	130,31°	164,22°	197,94°	4833	-D-
2024/02/21 18:00:10	2024/02/21 18:04:38	2024/02/21 18:09:06	00:08:56	10,81°	89,37°	141,97°	193,79°	4834	-D-
2024/02/21 19:31:33	2024/02/21 19:37:01	2024/02/21 19:42:30	00:10:57	34,97°	45,26°	121,85°	194,84°	4835	VDE
2024/02/21 21:04:40	2024/02/21 21:10:16	2024/02/21 21:15:51	00:11:10	41,89°	359,28°	276,56°	198,94°	4836	VDE
2024/02/21 22:40:13	2024/02/21 22:44:28	2024/02/21 22:48:44	00:08:31	8,42°	307,06°	257,33°	208,45°	4837	VDE
2024/02/22 08:18:48	2024/02/22 08:23:19	2024/02/22 08:27:50	00:09:02	10,10°	152,96°	100,32°	47,18°	4843	-D-
2024/02/22 09:51:46	2024/02/22 09:57:26	2024/02/22 10:03:06	00:11:19	49,64°	161,59°	80,55°	356,27°	4844	-D-
2024/02/22 11:25:08	2024/02/22 11:30:35	2024/02/22 11:36:02	00:10:53	31,01°	165,38°	237,45°	310,79°	4845	-D-
2024/02/22 12:58:32	2024/02/22 13:02:54	2024/02/22 13:07:16	00:08:44	9,93°	166,14°	216,48°	266,98°	4846	-D-
2024/02/22 14:31:31	2024/02/22 14:34:34	2024/02/22 14:37:37	00:06:05	3,69°	161,26°	194,05°	226,78°	4847	-D-
2024/02/22 16:03:06	2024/02/22 16:05:57	2024/02/22 16:08:48	00:05:42	3,16°	140,44°	170,97°	201,37°	4848	-D-
2024/02/22 17:33:28	2024/02/22 17:37:31	2024/02/22 17:41:35	00:08:07	7,95°	102,05°	148,40°	194,23°	4849	-D-
2024/02/22 19:04:26	2024/02/22 19:09:41	2024/02/22 19:14:56	00:10:30	23,64°	58,43°	127,40°	194,21°	4850	-DE
2024/02/22 20:36:59	2024/02/22 20:42:39	2024/02/22 20:48:20	00:11:21	71,67°	13,19°	276,73°	197,37°	4851	V-E
2024/02/22 22:11:42	2024/02/22 22:16:34	2024/02/22 22:21:26	00:09:43	13,85°	323,74°	263,45°	204,61°	4852	V-E
2024/02/23 07:51:35	2024/02/23 07:55:19	2024/02/23 07:59:04	00:07:28	5,63°	148,11°	106,74°	65,09°	4858	-D-
2024/02/23 09:24:15	2024/02/23 09:29:45	2024/02/23 09:35:15	00:11:00	30,11°	159,77°	85,91°	10,41°	4859	-D-
2024/02/23 10:57:33	2024/02/23 11:03:10	2024/02/23 11:08:48	00:11:14	48,27°	164,58°	242,96°	324,00°	4860	-D-

Print Save Close

Fuente: Gpredict.

Una vez conocida la predicción de los pases, se prepara la estación para operar cuando el activo satelital pase sobre el punto de interés. A partir de la tabla obtenida de Gpredict, se filtran aquellos pases con un ángulo de elevación superior a 30 grados, ya que permiten un mayor tiempo de monitoreo, lo que facilita la verificación del correcto apuntamiento. La siguiente Tabla 2 muestra el plan de trabajo y las fechas en las que se realizó el seguimiento al activo espacial FACSAT-2.

Tabla 2. *Valor de Mayor Elevación durante tres días*

ÓRBITA	FECHA	GPREDIT	
		ELEVACIÓN	AZIMUTH
4835	21/02/2024	34.97	121.85
4836	21/02/2024	41.89	276.56
4844	22/02/2024	49.64	161.59
4845	22/02/2024	31.01	165.38
4851	22/02/2024	71.67	13.19
4860	23/02/2024	48.27	242.96

Fuente: Elaboración propia.

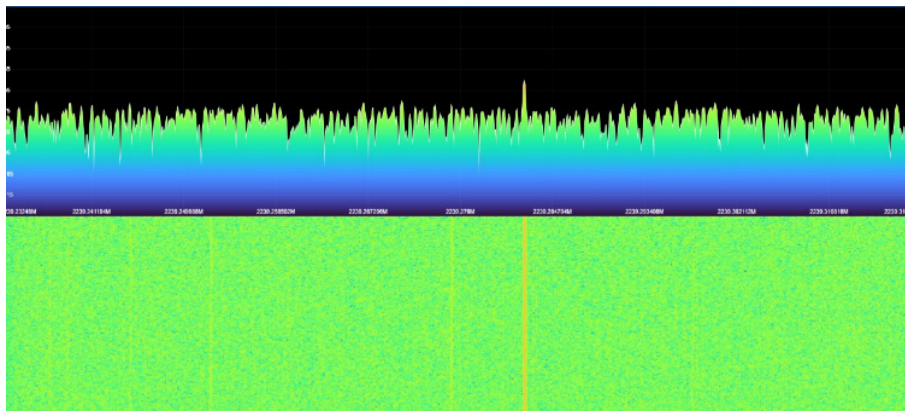
La verificación del comportamiento de los rotores de la antena con el sistema de Gpredict evidencia un desfase en grados respecto al azimut de 2 a 4 grados y en la elevación de 5 a 8 grados. Esto indica que la antena no está realizando un correcto apuntamiento. El equipo alemán que opera la estación terrena de Antártica, perteneciente al Centro Aeroespacial Alemán (DLR), con más de 60 años de experiencia en la operación de estaciones terrenas, recomienda emplear un satélite geoestacionario para calibrar el desfase en azimut y elevación. Esto se debe a que, al estar cerca del polo, los sistemas de ubicación tienden a descalibrarse, lo que genera este tipo de problemas.

4.9 Validación de recepción de Satélite Geo SpainSat

Considerando las fallas en el seguimiento del satélite, se realiza una investigación sobre satélites ubicados en órbitas geoestacionarias. Se selecciona el satélite SpainSat, posicionado a 30 grados oeste, cuya frecuencia de operación se encuentra dentro del rango de recepción de la estación terrena (2239.276 MHz). Se realiza la conversión de 30 grados oeste a valores de elevación y azimut, obteniendo como resultado 30° AZ y 15° ELV.

Una vez obtenidos los valores de azimut y elevación, se procede con la configuración manual de la antena a 30° en azimut y 15° en elevación. Sin embargo, no se obtiene señal en la interfaz del analizador de espectro. Por lo tanto, se comienza a mover manualmente la antena hasta encontrar el punto en el que la señal es más fuerte. Después de realizar este ajuste, se confirma que la señal alcanza su pico máximo a 34 grados en azimut y 21 grados en elevación. Este resultado confirma el desfase en el apuntamiento. En consecuencia, se procede a configurar los parámetros de los rotores con el desfase encontrado de 4 grados en azimut y 6 grados en elevación. Se reinicia el sistema de rotores y se envía la instrucción de 30° AZ y 15° ELV, obteniendo como resultado lo que se presenta a continuación:

Figura 19. Gráfica de la señal del analizador de espectro del satélite Geo SpainSat



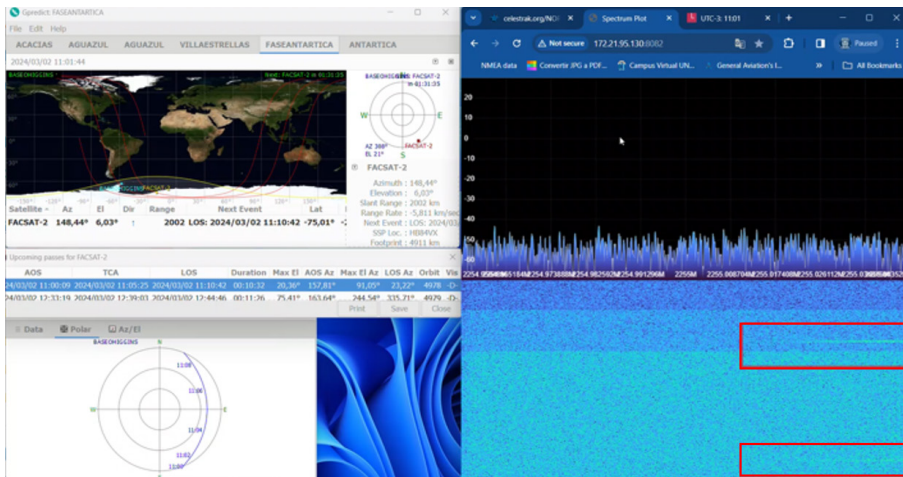
Con este ejercicio se logra finalmente la calibración del sistema para iniciar las pruebas de seguimiento del activo espacial FACSAT-2.

4.10 Prueba de Satélite FACSAT 2

Una vez finalizada la calibración de la antena utilizando el satélite geostacionario, se procede a ajustar la frecuencia del satélite FACSAT-2 para iniciar con las pruebas de seguimiento y descarga de datos. Durante estas pruebas, se observa que el tracking es correcto, pero no se recibe información de beacons del FACSAT-2.

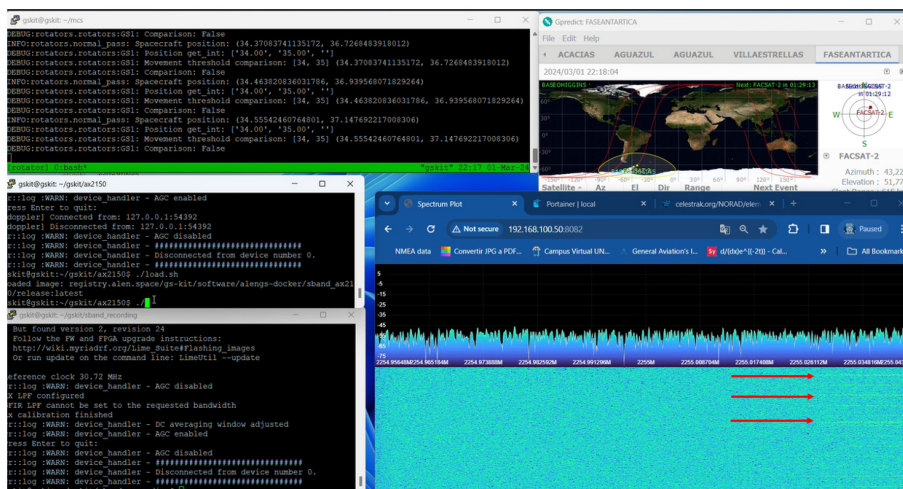
Al realizar un chequeo general del sistema y de sus componentes, se detecta que las pérdidas en los cables de recepción y transmisión eran de 30 dB, lo cual estaba generando que las señales recibidas por la estación terrena no alcanzaran la SDR debido a estas pérdidas. Como solución, se decide cambiar estos cables por otros cuya pérdida medida es de 7.1 dB y 6.8 dB, lo que mejora sustancialmente la ganancia del sistema. Con esta mejora, se logra recibir por primera vez la señal del activo espacial FACSAT-2 desde territorio antártico, como se muestra a continuación:

Figura 20. Inicio del pase del satélite sobre la estación terrena con El 20.33°- 30 segundos beacon



El recuadro rojo que se evidencia en la Figura 20 permite confirmar la recepción de beacons de información del FACSAT-2. De acuerdo con la experiencia obtenida durante la fase LEOP y la puesta a punto de la estación terrena en Cali, se configura el FACSAT-2 para incrementar los tiempos de envío de beacons de 30 a 10 segundos, con el fin de confirmar en el siguiente pase que se trata del activo espacial de la FAC. Se obtiene el siguiente resultado:

Figura 21. Incremento número de beacons de 10 segundos



4.11 Pruebas del Sensor de Espectrometría

La espectrometría es fundamental para la observación terrestre desde el espacio, ya que permite detectar y analizar fenómenos y características del medio ambiente. Los sensores espectrométricos a bordo de satélites desempeñan un papel crucial en esta tarea, ya que proporcionan mediciones de la radiación electromagnética en diferentes longitudes de onda (Japal, 2011). En este contexto, es esencial realizar pruebas para un sensor espectrométrico en un satélite, con el fin de garantizar su funcionamiento óptimo y la calidad de los datos recopilados. Estas pruebas incluyen la verificación del rendimiento del sensor en condiciones de laboratorio y su validación en órbita (Japal, 2011).

Con todos los sistemas de la estación terrena en operación, se llevan a cabo pruebas de comunicación del satélite FACSAT-2. De acuerdo con el plan, el personal encargado del Centro de Operación Espacial SPOC en Colombia brinda apoyo para realizar una toma de muestras espectrométricas. Estas adquisiciones se obtienen a partir de las simulaciones realizadas para el paso del satélite sobre la Antártida.

El espectrómetro ARGUS 2000 es la segunda carga útil de la misión FACSAT-2, un instrumento avanzado utilizado para analizar y medir la composición química de materiales. En la misión FACSAT-2, el rango espectral del sensor va de 1000 a 1700 nm, lo que permite adquirir información útil para el análisis de gases de efecto invernadero (GEI), específicamente CO₂.

4.11.1 Adquisición de Espectrometría

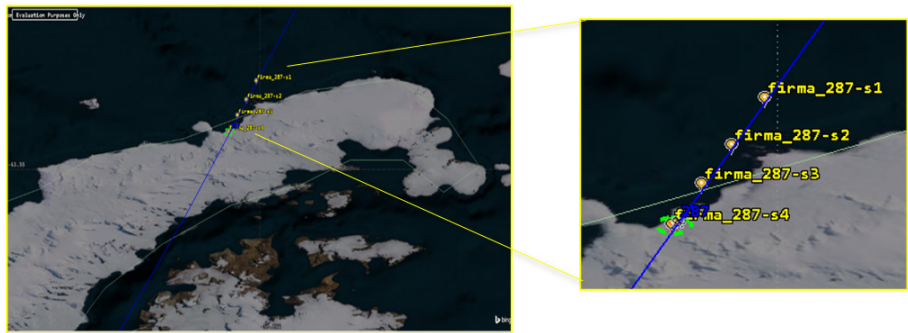
En relación con el espectrómetro ARGUS 2000 y las pruebas realizadas en territorio Antártico, se realizaron dos adquisiciones, identificadas con los números de sesión 278 y 313, que el espectrómetro asigna a cada firma espectral. Para analizar la órbita y el ángulo del satélite durante las adquisiciones y verificar la ubicación de la firma espectral, se utilizó el software Ansys Systems Tool Kit (STK). Para cada sesión se adquirieron varias firmas espectrales.

Una vez adquiridas las firmas espectrales, los datos se procesaron para eliminar el ruido y poder estimar la concentración del gas en la zona de adquisición de la información. A continuación, se presenta la descripción de la información de espectrometría adquirida en territorio Antártico.

4.11.2 Firmas Espectrales de la sesión 287

Para realizar el análisis de la información espectrométrica, se cuenta con dos tipos de archivos: un *.raw con la información del espectrómetro y un *.txt con los metadatos del ADCS del satélite, de los cuales se puede extraer la siguiente información:

Figura 22. Geolocalización de la sesión de firmas espectrales No. 287



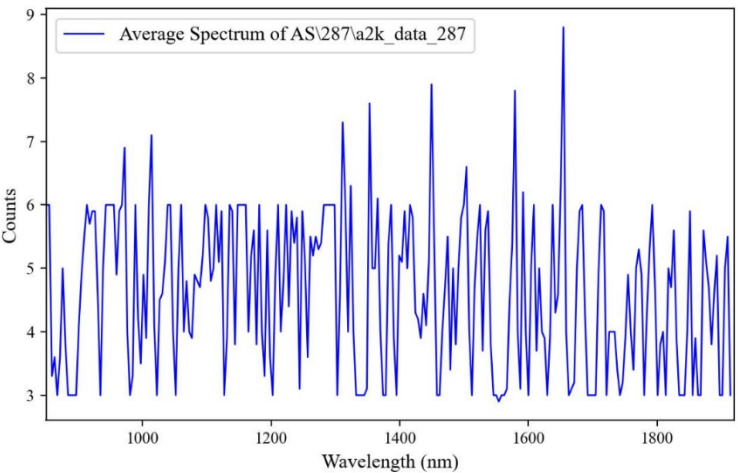
Coordenadas session 287 – S1 (lat, long): -63.216516270 deg, -57.870088134 deg

- GMT: Wednesday, 14 February 2024 1:29:36.132
- Eclipse: si (información adquirida sin luz solar)

En la **Figura 22**, se presenta la simulación utilizada para estimar la geolocalización del punto donde se adquirió la firma espectral.

En la **Figura 23**, se presenta el resultado del promedio de las firmas espectrales adquiridas en la sesión 287. Estas firmas fueron obtenidas sobre corteza oceánica durante la noche, lo que genera una respuesta de reflexión muy baja, casi nula, en la que no es posible cuantificar un gas. Sin embargo, este resultado permite evidenciar el funcionamiento del espectrómetro, proporcionando una respuesta adecuada para las condiciones de adquisición, caracterizadas por la ausencia de reflexión de la luz.

Figura 23. Promedio de firmas espectrales de sesión 287



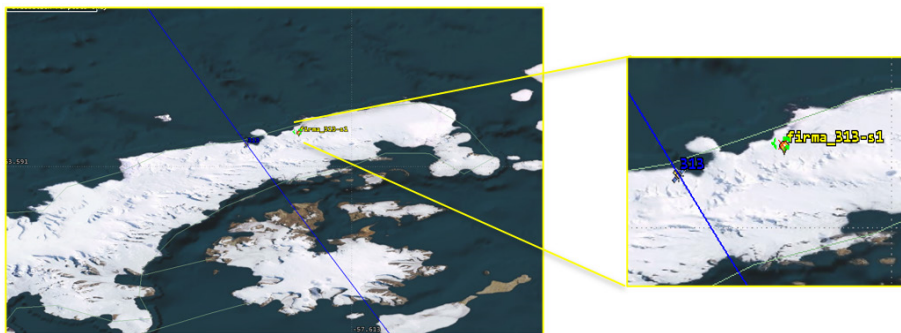
4.11.3 Firmas Espectrales sesión 313

Para las firmas espectrales de la sesión 313, se tiene la siguiente caracterización:

- GMT: Wednesday, 28 February 2024 15:30:32.105
- Coordenadas Sesión 313 S1: -63.402781973 deg, -57.915401180 deg
- Eclipse: no (información adquirida con luz solar)

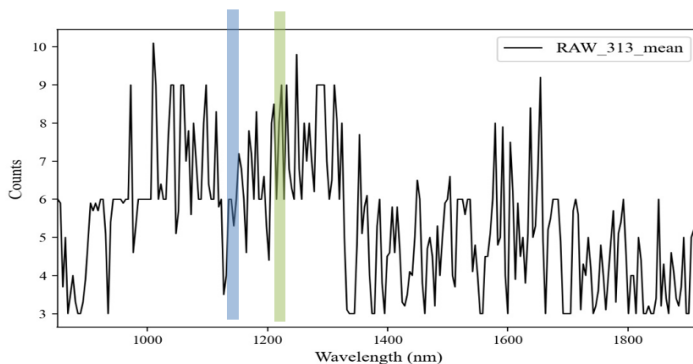
En la imagen que se muestra en la simulación, se verifican los grados de ubicación geográfica que el software de simulación STK nos permite graficar.

Figura 24. Imágenes de simulación de la geolocalización de la sesión de espectrometría No. 313



En la **Figura 25**, se presenta el resultado de la adquisición 313, en la cual se observa la reflexión del cuerpo negro y la respuesta aproximada de los gases H₂O (franja azul) y O₂ (franja verde), los cuales reflejan la atmósfera del territorio Antártico. Por otro lado, el análisis de la información de CO₂ requiere un procesamiento más refinado, mediante un algoritmo en construcción, que permita estimar la concentración aproximada en el lugar.

Figura 25. Promedio de firmas espectrales sesión 313



4.12 Pruebas de Comunicaciones con el SpOC

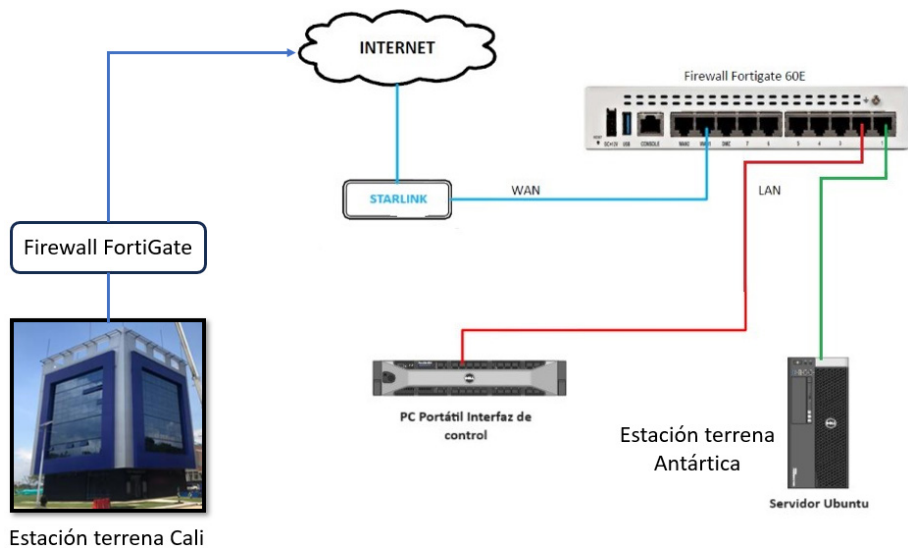
En el espacio exterior existen factores adversos que impiden que el poder espacial sea controlado en su totalidad. Sin embargo, para todos los sistemas espaciales en órbita, el control se puede realizar desde estaciones terrestres, lo que permite lograr la sinergia operativa, establecer prioridades y garantizar el logro de los objetivos propuestos (Fuerza Aérea Colombiana, 2020).

Al igual que las operaciones aéreas, las operaciones espaciales se controlan de manera centralizada a través de un sistema C2 y se ejecutan de manera descentralizada, con el fin de lograr una respuesta efectiva y rápida a los requerimientos que demanda la estrategia (Fuerza Aérea Colombiana, 2020).

Uno de los objetivos del despliegue en la Antártida es establecer comunicación con el Centro de Operaciones Espaciales (SpOC) para realizar la transferencia de archivos y el control descentralizado de la estación terrena desplegada. Por esta razón, es importante comenzar el ajuste y configuración de la red necesaria para establecer una comunicación adecuada.

A continuación, se presenta la arquitectura que debe configurarse para lograr comunicación entre los dos segmentos terrestres.

Figura 26. *Arquitectura de red entre estaciones terrestres*



Fuente: Elaboración propia.

Con ayuda y soporte de personal de la Jefatura de Tecnologías de la información y comunicación JETIC, se realiza la asignación de las direcciones IP y configuración del firewall para conectar las dos redes, las cuales fueron configuradas de la siguiente manera:

- Pc de control (Cali): 172.21.95.129
- Servidor (Antártica): 172.21.95.130

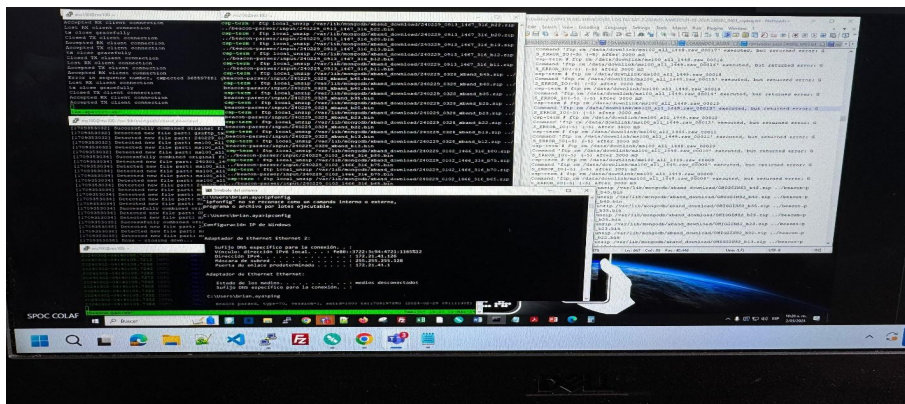
Actualmente, el acceso a Internet es posible en cualquier lugar del mundo gracias a empresas que disponen de equipos especializados para establecer estas conexiones. Una de las compañías más destacadas en este ámbito ha logrado llevar Internet incluso a la Antártida, ofreciendo cobertura de hasta el 5% de la zona norte del continente. Esta innovación ha revolucionado la forma en que accedemos a la red, facilitando la comunicación y el enlace entre estaciones terrenas distantes.

Entre las características de este servicio, se encuentra el uso de satélites en órbita baja para la comunicación. Además, la contratación de este sistema varía desde Internet estándar para una casa hasta Internet para botes (STARLINK, 2024).

Un factor clave fue la configuración del sistema Starlink para la comunicación entre las estaciones terrenas. En este caso, fue esencial seleccionar el servicio adecuado, teniendo en cuenta que se requería una IP pública para poder configurar el Fortigate, y no todos los servicios ofrecidos por esta compañía incluyen esta opción.

Por esta razón, se optó por un sistema denominado Prioridad Móvil de 50 gigabytes, que se ajustaba a las prestaciones ofrecidas y a las necesidades de configuración. Esto permitió que el personal del SpOC pudiera acceder, desde la ciudad de Cali, al servidor de operación en la Antártida, desde donde se realizó el control de forma remota.

Figura 27. *Conexión desde el SpOC a la estación terrena de antártica*



Fuente: Elaboración propia.

5. RESULTADOS

Los resultados se incluyen en el desarrollo del documento; sin embargo, a continuación se presenta un resumen de los resultados de las actividades relevantes.

- Despliegue operacional de la estación terrena prototipo en condiciones extremas empleando un sistema de protección térmico.
- Calibración y correcto seguimiento a activos espaciales en órbita GEO y LEO
- Captura de 02 firmas de espectrometría con el sensor ARGUS2000 a bordo del satélite.
- Análisis de resultados y visualización de los datos de espectrometría
- Transferencia de archivos desde la estación terrena del SpOC a la estación terrena desplegada en Antártica.

6. CONCLUSIONES

El despliegue de una estación terrena en la Antártida representa un avance significativo para la operación de activos espaciales, lo que potencializará las capacidades de la FAC y del país, fortaleciendo su autonomía, control operacional y desarrollo espacial. Esto se debe a la posición geográfica estratégica, que garantiza tiempos de acceso y comunicación más prolongados para la operación de los activos espaciales y las cargas útiles. La experiencia en la Antártida permite evaluar las condiciones necesarias para el despliegue, instalación, puesta a punto y operación de una estación terrena que capture y mida gases de efecto invernadero. El FACSAT-2, como activo satelital, tiene una carga útil de espectrometría que permite recopilar información para su posterior análisis. De la experiencia en territorio austral se pueden extraer las siguientes conclusiones:

1. **Captura de datos de espectrometría:** La estación terrena permitió obtener diversas tomas con el espectrómetro, las cuales fueron analizadas, comprobándose que una de ellas contiene datos útiles que pueden ser procesados con algoritmos para identificar estos gases en territorio antártico. Estas mediciones son fundamentales para comprender cómo identificar las concentraciones de estos gases en una región remota y relativamente no perturbada por los agentes generadores de los mismos.
2. Sin embargo, los datos recopilados no son suficientes para realizar estudios que permitan obtener información sobre tendencias a largo plazo ni sobre el impacto de estos gases en el territorio antártico. Por lo tanto, no se pueden integrar a modelos climáticos globales para mejorar la precisión de las predicciones sobre cambio climático, ya que se requieren más muestras y estudios para verificar la presencia de los GEI.
3. **Instalación de la antena:** Los pasos detallados para ensamblar y fijar la estructura de la antena fueron cruciales para asegurar una alineación precisa y una orientación adecuada. Se utilizaron herramientas específicas para ajustar y ensamblar la estructura con un límite de torque de 80 nm, lo que permitió que la estructura general permaneciera firmemente posicionada. Debido al peso y al movimiento, la estructura podría desajustarse, por lo que se recomienda instalar tuercas de seguridad con caucho para garantizar la estabilidad del sistema, reduciendo su desajuste debido a las vibraciones propias de la operación.

4. **Seguimiento satelital:** Se debe contar con información detallada de un satélite en órbita GEO para realizar procedimientos de calibración y efectuar un seguimiento adecuado de los diferentes satélites.
5. **Pruebas del sistema de protección:** Las pruebas con el sistema de protección fueron exitosas; sin embargo, teniendo en cuenta su diseño modular y el peso agregado por cada manta, se sugiere una adaptación de seis mantas intercaladas. Esto se debe a que el peso de las mantas requiere ajustes en los contrapesos de la antena y en la rampa de torque de los motores, lo que puede reducir la eficiencia durante el seguimiento de los activos espaciales.
6. **Datos técnicos:** Los datos técnicos recopilados durante las pruebas de campaña fueron muy útiles para mejorar y comprender el desempeño de la estación terrena en su comunicación con el satélite FACSAT-2 y corregir cualquier error presente. La información obtenida en las pruebas de campo representa una base crítica para optimizar los sistemas de seguimiento, asegurando eficiencia y confiabilidad en las operaciones de comunicación satelital.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- EIA632A. (2021). *Processes for Engineering a System*. Information Report, SAE International. doi:<https://doi.org/10.4271/EIA632A>
- AEM. (2016). *Mejores prácticas para el diseño de Cubesats*. Foro, Secretaría de Comunicaciones y Transportes -SCT, Agencia Espacial Mexicana -AEM, Jalisco 2016. Recuperado el 12 de Julio de 2021, de <https://docplayer.es/77363921-Mejores-practicas-para-el-diseno-de-cubesats.html>
- AEM. (2019). *Secretaria de comunicacion y transportes*. Obtenido de http://www.educacionespacial.aem.gob.mx/images/normateca/pdf/CURSO_ISE/Modulo_3.pdf
- Agencia Espacial Europea. (31 de Marzo de 2022). *ESA*. Obtenido de CubeSats: https://www.esa.int/Enabling_Support/Preparing_for_the_Future/Discovery_and_Preparation/CubeSats
- Álvarez, C., & Corredor, C. (2019). *El Espacio Exterior: Una Oportunidad Infinita para Colombia*. Bogotá: Sello editorial Escuela Superior de Guerra.
- Álvarez, C., Corredor, C., Quiroga, R., & Molano, Á. (2019). Programa Espacial Colombiano. En C. Álvarez, & C. Corredor (Edits.), *El Espacio Exterior: Una Oportunidad Infinita para Colombia* (Vol. 2, págs. 265-291). Bogotá: Escuela Superior de Guerra "General Rafael Reyes Prieto".
- Álvarez, C., Murillo, S., Hernández, J., & Urbina, J. (2019). El Poder Espacial y la Seguridad Multidimensional. En C. Álvarez, & C. Corredor (Edits.), *El Espacio Exterior: Una Oportunidad Infinita para Colombia* (págs. 19-82). Bogotá: Escuela Superior de Guerra "General Rafael Reyes Prieto" y Fuerza Aérea Colombiana.
- Baquero, F. (2022). *PODER AÉREO, ESPACIAL Y CIBERESPACIAL frente a desafíos y amenazas multidimensionales que afectan al Estado colombiano*. Bogotá: Sello Editorial Escuela Superior de Guerra.

- Barrero, D., & Baquero, F. (2022). Operaciones Espaciales de Colombia: enfoque en seguridad y desarrollo. En J. H. (ed), *Visión Aeroespacial Colombiana* (págs. 43-70). Bogotá: Sello Editorial Escuela Superior de Guerra.
- Barrero, D., Baquero, F., & Gaitán, A. (2018). La Seguridad Multidimensional y el Poder Aéreo: doctrinas de la OEA y Fuerza Aérea para fortalecer el desarrollo de la seguridad y la defensa. ¿Cuál es el nuevo panorama de Colombia? *Ciencia Y Poder Aéreo*, 13(1), 72-81. doi:<https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaereo.587>
- Becerra, J. (2014). Colombias space policy: An analysis of six years of progress and challenges. *Acta Astronáutica*, 100(1), 94-100.
- Belward, A. S., & Skøien, J. O. (2015). Who launched what, when and why; trends in global land-cover observation capacity from civilian earth observation satellites. *ISPRS. Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*(103), 115-128.
- Board, S. S., & Council, N. R. (2014). *Landsat and Beyond: Sustaining and Enhancing the Nation's Land Imaging Program*. National Academies Press.
- Bolaño-Ortiz, T. P.-F.-N. (2019). Assessment of absorbing aerosols on austral spring snow albedo reduction by several basins in the Central Andes of Chile from daily satellite observations (2000–2016) and a case study with the WRF-Chem model. *SN Applied Sciences*, 13. doi:<https://doi.org/10.1007/s42452-019-1256-z>
- Burton, J., Thompson, D., Papa, A., & Wong, A. (2022). *INTERNATIONAL SPACE COLLABORATION AND SECURITY*. Brussels, Belgium: A JOURNAL OF STRATEGIC AIRPOWER & SPACEPOWER.
- Campbell, J., Wynne, R., & Thomas, V. (2011). Introduction to remote sensing. Guilford Press.
- Camps, A. (2019). *Nanosatellites and Applications to Commercial and Scientific Missions*. IntechOpen.
- Capderou, M. (2014). *Handbook of Satellite Orbits*. Pasadena, California: Springer.
- Cappelletti, C., Battistini, S., & Malphrus, B. K. (2021). *Cubesat Handbook from mission desing to operations*. London: Elsevier. Recuperado el 23 de Julio de 2021, de <https://www.elsevier.com/books-and-journals>
- Center Langley Research, N. (2021). *S'COOL: Satélites observando la tierra*. Obtenido de <https://scool.larc.nasa.gov/Spanish/sats-sp.html>.
- Chandrika, N. (2006). *MILITARY USES OF SPACE*. London: The Parliamentary Office of Science and Technology.
- China National Space Administration. (2018). China National Space Administration. Obtenido de <http://www.cnsa.gov.cn/english/n6465652/index.html>
- Clemente, J. (2016). *Sistemas de iluminación de altas prestaciones aplicados a bienes de Universidad Complutense de Madrid*. Madrid, España: Facultad de óptica y optometría.
- CMMI Product Team. (2002). *Capability Maturity Model*. Integration (CMMI), Version 1.1. , Carnegie Mellon University, Software Engineering Institute.

- Congreso de la República de Colombia. (2023). *Ley 2302 de 2023 Congreso de la República*. Bogotá D.C.
- Consejo Nacional de Política Económica y Social. (2020). *POLÍTICA DE DESARROLLO ESPACIAL: CONDICIONES HABILITANTES PARA EL IMPULSO DE LA COMPETITIVIDAD NACIONAL*. Bogotá D.C.: CONPES.
- Córdoba, J., & Gago, C. (2012). Globalización, movilidad y el análisis de conectividad aérea: una herramienta para la práctica interdisciplinar. *Revista de Antropología Social*, 111-315.
- Cortés, L. (2014). Historia espacial: Recuento histórico de su evaluación y desarrollo [en línea]. *Revista de Derecho, Comunicaciones y Nuevas Tecnologías*(12). doi:<http://dx.doi.org/10.15425/redecom.12.2014.05>
- Council of Managers of National Antarctic Programs, C. (2017). *Antarctic Station Catalogue*. Christchurch, New Zealand: COMNAP and contributors.
- Dallamuta, J. P., & Rocha de Oliveira, M. (2023). Space missions in South America: Profile and evolutionary perspective of their development. *Acta Astronautica*, 9-17. doi:<https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2023.02.008>
- Defense Intelligence Agency. (2022). *CHALLENGES TO SECURITY IN SPACE*.
- Departamento de Seguridad Nacional, Presidencia de Gobierno de España. (2019). *Estrategia de Seguridad Aeroespacial Nacional*. Catálogo de Publicaciones de la Administración General de Estado.
- Dirección de Ciencia y Tecnología FAC. (2020). Anexo A. Información Cuantificable del Problema. Colombia: Fuerza Aérea Colombiana.
- Doran, T. (15 de May de 2006). IEEE 220: for practical systems engineering. *Computer*, 39(5), 92-94. doi:[doi:10.1109/MC.2006.164](https://doi.org/10.1109/MC.2006.164)
- Duarte Muñoz, C. (02 de Abril de 2018). *Hacia el Espacio*. Recuperado el 22 de Agosto de 2021, de <http://haciaespacio.aem.gob.mx/revistadigital/articul.php?interior=780>
- EATC. (2024). *Fact Sheet*. EATC 2024.
- ECSS. (2017). *Ingeniería Espacial - Requerimientos generales de Sistemas de ingeniería*. Noordwijk, Holanda: ESA Requirements and Standards Division. doi:<https://ecss.nl/standard/ecss-e-st-10c-system-engineering-general-requirements/>
- EIA632A. (2021). *Processes for Engineering a System*. Information Report, SAE International. doi:<https://doi.org/10.4271/EIA632A>
- Elm, J. P., Goldenson, D. R., El Emam, K., Donatelli, N., & Neisa, A. (2008). *A Survey of Systems Engineering Effectiveness - Initial Results (with detailed survey response data)*. SPECIAL REPORT CMU/SEI-2008-SR-034, Software Engineering Institute -SEI; National Defense Industrial Association - NDIA;) Systems Engineering Effectiveness Committee (SEEC) , National Defense Industrial Association. Obtenido de <http://www.sei.cmu.edu/>
- EO Sharing Earth Observation Resources. (18 de 06 de 2023). *EO Portal Directory*. Recuperado el 31 de 03 de 2020, de <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions>

- ESA, E. S. (01 de 07 de 2024). *European Space Agency, eduspace*. Obtenido de https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_ES/SEMO1U3FEXF_o.html
- ESA, ECSS-E-ST-10C. (2009). *SESS - Systems Engineering Standards And Specifications*. Norma, ECSS, Requirements & Standards Division, Noordwijk, The Netherlands. Obtenido de <http://everyspec.com/ESA/download.php?spec=ECSS-E-ST-10C.047801.pdf>
- ESA, TEC-SY/128/2013/SPD/RW. (2016). *Tailored ECSS Engineering Standards for In-Orbit. Demonstration CubeSat Projects*. ESA. TEB. Obtenido de https://copernicus-masters.com/wp-content/uploads/2017/03/IOD_CubeSat_ECSS_Eng_Tailoring_Iss1_Rev3.pdf
- Escuela Superior de Guerra “Rafael Reyes Prieto”, & Fuerza Aeroespacial de Colombia. (2019). *Volumen 2. El Espacio Exterior: Una Oportunidad Infinita para Colombia. El Cielo no es el Límite: El Futuro Estelar de Colombia*. Bogotá: Escuela Superior de Guerra “General Rafael Reyes Prieto” y Fuerza Aérea Colombiana.
- Espíndola, J. M. (2011). *Assembly and Deployment of a Ground Station for Tracking Low Earth Orbit Satellites*. II encuentro internacional y VI Nacional de Investigación en Ingeniería de Sistemas e Informática-EIISI 2011.
- Estrada, C. (21 de marzo de 2023). Se calcula que más de 80% del oro que exporta Colombia proviene del mercado ilegal [en línea]. *La República*. Obtenido de <https://www.larepublica.co/economia/se-calcula-que-mas-de-80-del-oro-que-exporta-colombia-proviene-del-mercado-ilegal-3572072>
- European Space Agency. (2019). Our activities. Obtenido de https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Transportation/Our_activities
- European Space Agency. (18 de 06 de 2023). *CEOS DATABASE*. Recuperado el 11 de 04 de 2020, de <http://database.eohandbook.com/>
- Firesmith, D. (2009). The Method-Framework for Engineering System Architectures (MFESA). In *System and Software Technology Conference (SSTC)*, 1, pág. 153. Pittsburgh, Pensilvania. Obtenido de https://resources.sei.cmu.edu/asset_files/Presentation/2009_017_001_23622.pdf
- Flemes, D. (2012). Actores estatales y regionalismo estratégico: Brasil y Colombia en el orden multipolar. En E. Pastrana, S. Jost, & D. Flemes, *Colombia y Brasil: ¿socios estratégicos en la construcción de Sudamérica?* (págs. 25-48). Bogotá D.C.: Pontificia Universidad Javeriana .
- Fuerza Aérea Colombiana. (2024). Ficha Técnica SAT - “Chiribiquete”. Bogotá, Colombia.
- Fuerza Aérea Colombiana. (08 de 06 de 2023). *Fuerza Aérea Colombiana*. Obtenido de <https://www.fac.mil.co/es/node/49725>
- Fuerza Aérea Colombiana. (12 de 06 de 2023). *Poder Espacial FAC*. Obtenido de <https://poderespacial.fac.mil.co/jefatura-de-operaciones-espaciales>
- Fuerza Aérea Colombiana. (2023). Tamaño de Fuerza. Bogotá D.C.
- Fuerza Aérea Colombiana. (2022). Blanco: Afectación Recursos Naturales y Medio Ambiente. Bogotá, Colombia: FAC.

- Fuerza Aérea Colombiana. (2021). *FACSAT-1 Dos años en el espacio al servicio del país*. Obtenido de <https://www.fac.mil.co/es/estamos-en-el-espacio>
- Fuerza Aérea Colombiana. (30 de 12 de 2020). *Estrategia para el Desarrollo Aéreo y Espacial Fuerza Aérea Colombiana 2042*. Obtenido de <https://www.fac.mil.co/edaesfac2042>
- Fuerza Aérea Colombiana. (2020). *Manual de Confiabilidad Aeronáutica-MACOA-*. Bogotá D.C.: Fuerzas Militares República de Colombia.
- Fuerza Aérea Colombiana. (2020). *Manual de Doctrina Básica, Aérea, Espacial y Ciberespacial*. Bogotá: FAC.
- Fuerza Aérea, C. (2020). *Estrategia para el Desarrollo Aéreo y Espacial de la FAC*. Bogotá: Oficina de Doctrina FAC.
- Fuerza Aérea, Colombiana. (2020). *Doctrina Básica Aérea, Espacial y Ciberespacial - DBAEC*. Bogotá: Oficina de Doctrina de la FAC.
- Funes, M. (2017). *El Transporte Aéreo Estratégico como una necesidad del Nivel Operacional para el siglo XXI*. Buenos Aires: Escuela Superior de Guerra Conjunta de las Fuerzas Armadas.
- Garzón , G. (2021). Implementación de la Prueba de Vibración Aleatoria para Estructuras a Escala de Micro satélites con base en el Estandar General de Verificación de la NASA. *Tesis de grado para optar al título de Magister en Ingeniería*. Universidad del Valle.
- Giroux, H. (1997). .La pedagogía de frontera y la política del postmodernismo. *Revista Intrínsecos*(6), 96.
- Greenland, S., & Clark, C. (2010). Cubesatplatformsasanon-orbit. *European Small Satellite Service Symposium*. 2010.
- Grest, H. (2022). *National Military Space Operations Centres - Requirements on National Centres with Respect to NATO Needs*. Kalkar Germany: Joint Air Power Competence Centre.
- Harvey, B., Smid, H., & Pirard, T. (2010). *Emerging Space Powers: The New Space Programs of Asia, the Middle East and South-America*. Springer.
- Hernández Sampieri, R., Fernández, C., & Baptista, M. (2014). *Metodología de la Investigación* (Sexta Edición ed.). México D.F., México: McGrawHill Education.
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la Investigación*. México: Mc Graw Hill.
- Herrera, J. F. (2011). Identification of priority themes in management of technology. In *20th International Conference For The International Association Of Management Of Technology Iamot*. Miami: North South Center University Of Miami.
- IEEE P1220. (1994). *Standard for system engineering-a commercial standard for improving competitiveness*. Norma, IEEE, Fort Worth, TX, USA. doi:<https://doi.org/10.1109/DASC.1993.283580>
- INACH. (01 de 07 de 2024). *Instituto Antártico Chileno, Ministerio de Relaciones Exteriores Gobierno de Chile*. Obtenido de <https://www.inach.cl/expedicion->

[antartica/bases-chilenas-en-antartica-2/base-bernardo-ohiggins/](#)

- INCOSE. (30 de julio de 2015). *Introduction To Model-Based System Engineering (MBSE) and SysML*. doi:<https://www.incose.org/docs/default-source/delaware-valley/mbse-overview-incose-30-july-2015.pdf>
- INCOSE. (2015). *Systems Engineering Handbook* (Cuarta ed.). (D. Walden, G. Roelder, K. Forsberg, D. Hamelin, & T. Shortell, Edits.) San Diego, California, EEUU: Wiley. Obtenido de <https://img1.wsimg.com/blobby/go/a430a7ae-a333-4c88-af76-fd5624bfbddd/downloads/INCOSE%20Systems%20Engineering%20Handbook%204e%202015%2007.pdf?ver=1604878104477>
- International Telecommunication Union. (2021). *Radio Regulations*. Obtenido de <https://www.itu.int/pub/R-REG-RR>
- INTERPOL. (28 de abril de 2022). *Los efectos devastadores de la extracción ilegal de oro en América Latina*. Obtenido de <https://www.interpol.int/es/Noticias-y-acontecimientos/Noticias/2022/Los-efectos-devastadores-de-la-extraccion-ilegal-de-oro-en-America-Latina#:~:text=La%20extracci%C3%B3n%20ilegal%20de%20oro%20destruye%20el%20medio%20ambiente%2C%20provocando,liberaci%C3%>
- IPCC, I. P. (2012). *Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC)*. Obtenido de https://archive.ipcc.ch/home_languages_main_spanish.shtml
- JAXA. (2013). *Research on the technology of space systems*. Documento informativo, Japan Aerospace Exploration Agency -JAXA. Obtenido de <https://www.kenkai.jaxa.jp/eng/research/system/system.html>
- Jimenez R, R. S. (2019). FACSAT-1 Ground Station Performance. *Instituto de Astrofísica de Canarias - IAC-19-F1.2.3*, 21-25.
- Juárez, F. (2016). La minería ilegal en Colombia: un conflicto de narrativas [en línea]. *El Ágora USB*, 16(1), 135-146. Obtenido de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1657-80312016000100007&lng=en&tlng=es
- Khlystov, N. (2023). *Space Industry Debris Mitigation Recommendations*. World Economic Forum.
- King, J. T., Kolbeck, J., Kang, J. S., Sanders, M., & Keidar, M. (2021). Performance analysis of nano-sat scale μ CAT electric propulsion for 3U CubeSat attitude control. (E. Ltda, Ed.) *Acta Astronautica*, 178, 722-732. doi:<https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.10.006>
- Kotter, J. P. (2007). *Que Hacen Los Lideres*. (G. Planeta, Ed.)
- Krebs, G. (2024). *"FACSAT 2 (Chibiriquete)"*. *Gunter's Space Page*. Obtenido de https://space.skyrocket.de/doc_sdat/facsat-2.htm
- Lilo, J. (2020). *Impactos de la minería en el medio natural*. Obtenido de <https://www.ucm.es/data/cont/media/www/pag-15564/Impactos%20de%20la%20miner%C3%ADa%20-%20Javier%20Lillo.pdf>
- López, L. (2010). La seguridad aeroespacial en América del Norte. *Norteamérica [online]*, 5(1), 173-219. Obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-35502010000100007&lng=es&tlng=es.
- Margalef, L., & Arenas, A. (2006). ¿Qué entendemos por innovación Educativa? A proposito del desarrollo curricular. *Perpectiva Educacional*, 1(47), 13-31.

- Masson-Delmotte, V. P. (2021). *Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University: IPCC.
- Mesa, L. R. (2019). Sistema de monitoreo de señales en tierra usando la Estación Terrena Satelital UPTC. *Articulos científicos, INGE CUC*.
- Minenergía, & UNODC. (Junio de 2023). Informe EVOA 2022. Bogotá, Colombia.
- Minenergía, Embajada de Estados Unidos, & UNODC. (2020). Colombia. Explitación de oro de aluvión. Evidencias a partir de percepción remota 2019. Bogotá, Colombia.
- Moliner González, J. A. (2023). Dimensión ética y moral de posibles conflictos militares en el espacio exterior. *Revista Iberoamericana de Filosofía, Política, Humanidades y Relaciones Internacionales*, 25(53), 335-356. doi:<https://dx.doi.org/10.12795/araucaria.2023.i53.13>
- Nanosats. (11 de 06 de 2023). *Nanosats Data Base*. Recuperado el 10 de 04 de 2020, de <https://www.nanosats.eu/>
- NASA. (2007). *Systems Engineering Handbook*. Washington, D.C., Estados Unidos: National Aeronautics and Space Administration. doi:https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/nasa_systems_engineering_handbook.pdf
- NASA. (2014). *What Is a Satellite?* Obtenido de <https://www.nasa.gov/audience/forstudents/5-8/features/>
- NASA. (12 de Diciembre de 2019). *Nasa*. Recuperado el 30 de Agosto de 2021, de https://www.nasa.gov/seh/2-1_technical-processes
- NASA. (2020). About NASA. Obtenido de <https://www.nasa.gov/about/index.html>
- Navarro, E., Jiménez, E., Rappoport, S., & Thoilliez, B. (2017). *Fundamentos de la investigación y la innovación educativa*. Universidad Internacional de la Rioja. Obtenido de https://www.unir.net/wp-content/uploads/2017/04/Investigacion_innovacion.pdf
- Navarro, V. M. (2011). European Air Transport Command: ¿ hacia unas Fuerzas Armadas europeas ? *Documento de opinion del IEEE No.14/2011*, 2-4.
- Oficina de Información científica y tecnológica para el Congreso de la Unión. (Marzo de 2023). Satélites Pequeños. (038). Ciudad de Mexico. Obtenido de https://foroconsultivo.org.mx/INCyTU/documentos/Completa/INCYTU_20-038.pdf
- Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito - UNODC. (11 de noviembre de 2023). *Colombia: Explotación de Oro de Aluvión EVOA 2022*. Obtenido de https://www.unodc.org/documents/colombia/2023/noviembre-11/Resumen_Ejecutivo_EVOA_2022.pdf
- Ortega, G. (14 de Octubre de 2009). <https://www.gr.ssr.upm.es/>. Recuperado el 22 de Agosto de 2021, de Grupo de Radiación: https://www.gr.ssr.upm.es/docencia/grado/csat/picosatelites/LN11_Sesion2_Analysis_of_Space_Missions_GOrtega.pdf
- Ospina, L., & Cabrera, F. (2021). *Estrategia de Seguridad Aérea y Espacial Nacional*. Bogotá: Escuela Superior de Guerra "General Rafael Reyes Prieto" - ESDEG.

- Planeación, D. N. (2023). *Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026*. Bogotá: Imprenta Nacional de Colombia.
- Planton, S. S.-K. (2013). *Cambio Climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América.: IPCC.
- Portilla, J. (2012). LA ÓRBITA DEL SATÉLITE LIBERTAD 1. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 36(141), 491-500.
- Quiroga, R., Gutiérrez, N., Núñez, J., & Rico, Y. (2019). La Fuerza Aérea Colombiana y la Evolución del Pensamiento Estratégico del Poder Espacial. En C. Álvarez, & C. Corredor (Edits.), *Volumen 2. El Espacio Exterior: Una Oportunidad Infinita para Colombia. El Cielo no es el Límite: El Futuro Estelar de Colombia* (págs. 19-52). Bogotá: El Cielo no es el Límite: El Futuro Estelar de Colombia.
- Rendón, O. (04 de octubre de 2022). *Datos y tecnología para saber trazabilidad del oro*. Obtenido de <https://www.elcolombiano.com/negocios/datos-y-tecnologia-para-saber-trazabilidad-del-oro-DJ18774564>
- Restrepo, J. (2019). Extracción ilegal o el dinero por sobre todas las formas de vida [en línea]. *Elmundo.com*, 17, mayo. Obtenido de <https://www.elmundo.com/noticia/Extraccion-ilegal-o-el-dinero-por-sobre-todas-las-formas-de-vida/376594>
- Rincón U, S. R., Bastidas B, E. J., & Rodriguez A, C. A. (2023). *Factibilidad del desarrollo del FACSAT-2* (Vol. I). Cali, Valle del Cauca, Colombia: FAC.
- Rincón, S., Cárdenas, J., Pirazán, K., Acero, I., Hurtado, R., & Cortés, D. (2023). Critical Design of the FACSAT-2 mission CubeSat for the observation and analysis of the Colombian Territory. *Revista UIS Ingenierías*, 22(3), 69-86. Obtenido de <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistausingenierias>
- Rincón, S., Cárdenas, J., Virginia, H., & Pirazan, K. (2022). *Simposio de la IAA sobre misiones de pequeños satélites*. Congreso Astronáutico Internacional 2022.
- Rincón-Urbina, S. R., Cardenas-García, J. M., Pirazán-Villanueva, K. N., Acero-Niño, I. F., Hurtado-Velasco, R. H., & Cortés-García, E. D. (2023). Diseño crítico del nanosatélite de la misión FACSAT-2 para la observación y análisis del territorio Colombiano. *RUI*, 22(3), 68-86.
- Robledo Asencio, J. C., Rincón Urbina, S. R., Cardenas Garcia, J. M., Mendez Gomez, J. E., & Salek Chaves, D. Z. (2023). System Engineering Approach for the Implementation Project of the Colombian Aerospace Force's (FAC) Assembly, Integration, and Testing (AIT) Laboratory. *14° WETE Workshop em Engenharia e Tecnologia Espaciais*, (págs. 1-10). Brasil.
- Rodriguez A., C. A. (2019). *Implementación de una estrategia sistémica de los proyectos del programa espacial de la FAC*. Propuesta Postdoctoral, Centro de investigación en Estudios Aeroespaciales -CITAE, I+D+i, Cali.
- Rodríguez, G., Sofrony, J., Cortés, E., & Rueda, K. (2020). *Diseño de misión, síntesis de factores operacionales y representaciones del segmento espacial, caso facsat y emff*. Bogotá DC: Revista Ciencia y Poder Aéreo.

- Rodríguez-Pirateque, G. W., Sofrony E., J., Cortés G., E. D., & Rueda, K. (19 de Septiembre de 2020). Diseño de misión, síntesis de factores operacionales y representaciones del segmento espacial, caso FACSAT y EMFF. *Ciencia y Poder Aéreo*, 15(2), 143-165. doi:<https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaereo.678>
- Rojas, A. (09 de septiembre de 2023). *Con tecnología geoespacial se puede controlar la minería ilegal en Colombia*. Obtenido de <https://www.las2orillas.co/con-tecnologia-geoespacial-se-puede-controlar-la-mineria-ilegal-en-colombia/>
- Roscosmos. (2022). State Corporation for Space Activities ROSCOSMOS. Obtenido de <https://www.roscomsos.ru/29189/>
- 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.
- Salazar, A. N. (2018). *Manual de operación de estación terrena: centro de control y Monitoreo “Rodrigo Noguera Laborde”* (pág 16). Bogotá: Fondo de publicaciones de la Universidad Sergio Arboleda.
- Santé, J. M. (2017). La doctrina aeroespacial y la estrategia de seguridad aeroespacial. *Cuadernos de estrategia*(192), 105-146. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/6268236.pdf>
- Sarafin, T. P., Doukas, P. G., McCandless, J. R., & Britton, W. R. (2007). Structures and Mechanisms. En J. R. Wertz, & W. J. Larson, *Space Mission Analysis and Design* (págs. 459–518).
- Sellers, J. J. (2007). *Understanding space: an introduction to astronautics* (Tercera ed.). (D. Kirkpatrick, Ed.) New York, New York, EEUU: McGraw-Hill.
- Sellers, J., Astore, W., Grifen, R., Larson, W., Kirkpatrick, D., Shute, A., . . . Tostanoski, M. (2015). *Understanding space: An introduction to astronautics*. McGraw-Hill Companies.
- Selva, D., & Krejci, D. (2012). A survey and assessment of the capabilities of Cubesats for Earth observation. *Acta Astronautica*, 74, 50–68. doi:<https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2011.12.014>
- Selva, D., & Krejcl, D. (2012). *A survey and assessment of the capabilities of Cubesats for Earth observation*. Cambridge, MA: ELSEVIER. *Acta Astronautica*.
- Sheard, S. A. (2000). Three Types of Systems Engineering Implementation. *Proceedings of the Tenth International Symposium of the International Council on Systems Engineering* (pág. 9). Minneapolis: INCOSE International Symposium. Obtenido de All three types. Figure 1 shows how the three types
- Shiotani, B. (2018). *Project life-cycle and implementation for a class of small satellites*. Florida, Estados Unidos: University of Florida. Recuperado el 31 de Agosto de 2021, de https://s3vi.ndc.nasa.gov/ssri-kb/static/resources/SHIOTANI_B.pdf
- Silva, C. F., Corredor, C., & Álvarez, C. (2019). Análisis de la Política Espacial Colombiana: Una perspectiva de defensa y seguridad. En Escuela Superior de Guerra “Rafael Reyes Prieto”, & Fuerza Aérea Colombiana, *El Espacio Exterior Volumen 2* (págs. 53-82). Escuela Superior de Guerra y Fuerza Aérea Colombiana.

- Silva, C., Corredor, C., & Álvarez, C. (2019). Capítulo VIII. Análisis de la política espacial colombiana: una perspectiva de defensa y seguridad. En *El espacio exterior: Una oportunidad infinita para Colombia* (Vol. 2, págs. 53-82). Bogotá, Colombia: Escuela Superior de Guerra “General Rafael Reyes Prieto”.
- Slavin, R. (2002). *Aprendizaje cooperativo: Teoría, investigación y práctica*. AIQUE.
- STARLINK. (2024). *STARLINK*. Obtenido de <https://www.starlink.com/roam>
- Tahseen HU, Y. L. (2021). X. Design of FSS-antenna-radome system for airborne. *IET Communications*, 9. doi:DOI: 10.1049/cmu2.12181
- THOT, T. (2018). *ARGUS 2000 IR spectrometer kit*. Canada: Owner’s Manual.
- Torrijos, V., & Carvajal, A. (2014). Geopolítica sistémica aplicada: un modelo para entender las dinámicas cambiantes del sistema internacional. *Revista Científica General José María Córdova*, 35-56.
- Tubio Pardavila, R. (2012). *Ingeniería de Sistemas basada en Estándares ECSS aplicada al diseño, fabricación, integración, validación y operación de pico, nano y microsátélites. Aplicación a la Constelación HUMSAT*. Vigo, España: Universidad de Vigo. doi:<https://core.ac.uk/download/pdf/54205042.pdf>
- United States Air Force. (Julio de 2019). *Air Mobility Operations*. Montgomery: Curtis E. Lemay Center. Obtenido de <https://www.af.mil/About-Us/Fact-Sheets/Display/Article/104566/air-mobility-command/>
- Universidad del Rosario. (05 de diciembre de 2022). *URosario lanza plataforma creada con el apoyo de Google.org para monitorear minería a cielo abierto usando imágenes satelitales y machine learning*. Obtenido de <https://urosario.edu.co/periodico-nova-et-vetera/urosario-lanza-plataforma-creada-con-google-org-para-monitorear-mineria-a-cielo-abierto>
- UNODC. (julio de 2021). Colombia. Explotación de oro de aluvión. Evidencias a partir de percepción remota 2020. Colombia.
- Urbina, J. (2017). El espacio, futuro de la Fuerza Aérea Colombiana. *Ciencia y Poder Aéreo*, 12, 202-208.
- USAF. (27 de 06 de 2024). *Air Mobility Command*. Obtenido de <https://www.amc.af.mil/>
- Vergara-Escobar, F. P. (2021). Corpolaridades: cuerpos producidos en una cuidadosa Antártica. *Revista Latinoamericana de Estudios sobre Cuerpos, Emociones y Sociedad*, 24. Obtenido de Www.relaces.com.ar
- Wallis, S., & David, F. (2008). *Space Observations: An Australian Perspective*. Commonwealth of Australia.
- Wasson, C. S. (2012). *Formulation and Development of the Wasson System Engineering Process Model*. ASEE Southeast Section Conferen.
- Wertz, J. R., & Larson, W. J. (2007). *Space Mission Analysis and Design*. El segundo, California, Estados Unidos: Space Technology Library. Recuperado el 30 de Agosto de 2023
- Wickramatunga, R. (2023). *United Nations Office for Outer Space Affairs*. Obtenido de The outer space treaty: <https://www.unoosa.org/oosa/en/ourwork/spacelaw/treaties/introouterspacetreaty.html>

- Woellert, K., Ehrenfreund, P., Ricco, A., & Hertzfeld, H. (2011). Cubesats: cost-effective science and technology platforms for emerging and developing nations. *Adv. Space. Res.*, 47(4), 663–684.
- Ziarnick, B. (2005). The Militarization and Weaponization of Space. *Air & Space Power Journal*, 19(2), 103. doi:<https://link.gale.com/apps/doc/A135843283/AONE?u=anon~2593f224&sid=googleScholar&xid=497dcc9e>

Diagramación y diseño:

Chako Hernández

Correo: contactochako@gmail.com

Cel: +57 312 440 5897

<https://www.behance.net/chako>

Este libro fue diagramado utilizando fuentes tipográficas Georgia en sus respectivas variaciones a 10 puntos para el contenido y títulos a 18 puntos.

Impreso en el mes de diciembre de 2024.
100 ejemplares

EF Business Outsourcing SAS

Carrera 10 D 23 26 Sur

Bogotá, Cundinamarca

Colombia

Cel: (+57) 310 774 012

La industria aeroespacial se ha convertido en un motor clave para el desarrollo económico y tecnológico global. América Latina, aunque emergente en este ámbito, reconoce el potencial del sector como catalizador de innovación y competitividad. Esta obra ofrece un análisis profundo y multidisciplinario sobre los desafíos, avances y oportunidades que enfrenta la región en su integración al panorama aeroespacial internacional.

A través de diez capítulos, los autores exploran temas cruciales como el impacto de las tecnologías satelitales en la seguridad nacional, la influencia de las tecnologías 4.0 en las operaciones militares y el rol de las políticas públicas en la gobernanza de la innovación. Además, abordan cómo la ciencia, tecnología e innovación (CTeI) fortalecen las capacidades estratégicas de los estados, fomentando un ecosistema sostenible y adaptado a las necesidades locales.

Dirigido a académicos, profesionales y tomadores de decisiones, este volumen propone un enfoque interdisciplinario y colaborativo entre industria, gobiernos y academia, ofreciendo herramientas prácticas para impulsar el desarrollo aeroespacial en una región con un potencial inmenso y desafíos únicos.

FUERZA AEROESPACIAL
COLOMBIANA



ISBN: 978-628-96090-7-3

