

# CIENCIA Y PODER AÉREO

Revista Científica de la Escuela de Postgrados de la Fuerza Aeroespacial Colombiana

ISSN 1909-7050 / E-ISSN 2389-9468

VOL. 19 N.º 1 | ENERO-JUNIO 2024 | Pp. 1-163



**01**  
**Vol. 19**

Institución Universitaria, Resolución MEN No. 1906/Agosto 2002 / No. 21057 Noviembre/2016

Enero-junio del 2024 | pp. 1-163



[www.publicacionesfac.com](http://www.publicacionesfac.com)





# CIENCIA Y PODER AÉREO

Revista Científica de la Escuela de Postgrados de la Fuerza Aeroespacial Colombiana  
ISSN 1909-7050 / E-ISSN 2389-9468 VOL. 19 N.º 1 | ENERO-JUNIO 2024 | Pp. 1-163

## Escuela de Postgrados de la FAC

Director  
CR. Luis Fernando Giraldo Escobar

Comandante Grupo Académico  
TC. María Paula Mancera Perilla

Comandante Escuadrón de Investigación  
MY. Germán Wedge Rodríguez Pirateque



## Ciencia y Poder Aéreo

Director | Director | Diretor

MY. Germán Wedge Rodríguez Pirateque, Ph. D.

Editor Invitado | Guest Editor | Editor convidado

Ph. D. Eduardo Mojica Nava

### Equipo editorial | Editorial team | Equipe editorial

Coordinación editorial | Editorial coordination | Coordenação editorial

Mag. María Carolina Suárez Sandoval

Asistencia editorial | Editorial assistance | Assistência editorial

Mag. Jenny Marcela Rodríguez

Corrección de texto | Copyediting | Revisor de textos

Español: María Carolina Ochoa García

Inglés: Gisella Arroyo

Traducción de contenidos | Content translation | Tradução de conteúdo

Inglés: Sandra Alarcón

Portugués: Gedma Alejandra Salamanca Rodríguez

Diseño y maquetación | Desing and layout | Design e layout

Angélica Ramos Vargas

Corrección de sintaxis | Proofreading | Revisor de textos

Karen Grisales

Foto de cubierta | Cover photo | Foto de capa

Sebatían Schrimppff - Foto Rudolf

### Información técnica | Technical information | Informações técnicas

Volumen 19, n.º 1 | enero-junio 2024

Periodicidad semestral

ISSN 1909-7050

E-ISSN 2389-9468

DOI: <https://doi.org/10.18667/issn.1909-7050>

Bogotá, Colombia 2024

### Comité editorial | Editorial Board | Comitê editorial

Carlos Lozano Rodríguez

Ph. D. en Ciencias Físicas

Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, España

ID Scopus

César Nieto Londoño

Ph. D. en Ingeniería

Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia

CvLAC

José M. García-Bravo

Ph. D. en Ingeniería

Purdue University, EE. UU.

ID Scopus

Julián Sierra Pérez

Ph. D. en Ingeniería Aeroespacial

Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia

CvLAC

Sergio Tobón Tobón

Ph. D. en Modelos Educativos y Políticas Culturales

Centro Universitario CIFE, México

CvLAC

### Comité científico | Scientific Board | Comitê científico

Avid Roman-Gonzalez

Ph. D. en Procesamiento de Señales e Imágenes

Universidad Nacional Tecnológica De Lima, Perú

ID Scopus

Daniel Viúdez-Moreiras

Ph. D. en Ingeniería

Instituto Nacional de Técnica AeroespacialThis link is disabled, España

ID Scopus

Héctor Enrique Jaramillo Suárez

Ph. D. en Mecánica de Sólidos

Universidad Autónoma de Occidente, Colombia

CvLAC

Hernán Paz Penagos

Ph. D. en Educación

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Colombia

CvLAC

Javier Alberto Pérez-Castán

Ph. D. en Ingeniería Aeronáutica

Universidad Politécnica de Madrid, España

ID Scopus

Juan Manuel Martín-Sánchez

Ph. D. en Ingeniería Industrial

Universidad Nacional de Educación a Distancia—UNED, España

ID. Scopus

William Arnulfo Aperador Chaparro

Ph. D. en Ingeniería

Universidad Militar Nueva Granada, Colombia

CvLAC

## **Pares académicos | Academic peers | Pares académicos**

Alexander Alberto Correa Espinal

Ph. D. en Estadística e Investigación Operativa  
Universidad Nacional de Colombia

Andrés Calvillo Téllez

Ph. D. en Ciencias de la Educación  
Instituto Politécnico Nacional, Colombia

Claudia Patricia Garay Acevedo

Ph. D. en Derecho Internacional  
Escuela Superior de Guerra "General Rafael Reyes Prieto", Colombia

Eudaldo Enrique Espinoza Freire

Ph. D. en Ciencias Pedagógicas  
Universidad Técnica de Machala, Ecuador

Erika Ramírez Benítez

Mag. en Estrategia y Geopolítica  
Escuela Superior de Guerra "General Rafael Reyes Prieto", Colombia

Hernán Darío Cerón Muñoz

Ph. D. en Ingeniería Mecánica  
Universidade de São Paulo (USP), Brasil

Ivan Preslav Bolaños

Mag. Modelamiento Prospectivo para Toma de Decisiones  
Fuerza Aérea Ecuatoriana, Ecuador

Jaime Alfonso Cubides-Cárdenas

Mag. en Derecho  
Universidad Católica de Colombia

Jhonathan O. Murcia Piñeros

Ph. D. en Ingeniería y Tecnología Espacial  
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Brasil

José Vili Martínez González

Ph. D. en Administración  
Ajedrez Consultores, México

Luini Leonardo Hurtado Cortés

Ph. D. en Ingeniería Automática  
Universidad Distrital Francisco José De Caldas, Colombia

Marianela Luzardo Briceño

Ph. D. en Estadística  
Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia

Pedro David Bravo-Mosquera

Ph. D. en Ciencias  
University of Sao Paulo, Brasil

Sergio Francisco Mora Martínez

Magister en Ingeniería Electrónica  
Universidad ECCI, Colombia

Sergio Gabriel Eissa

Ph. D. en Ciencia Política  
Universidad de Buenos Aires, Argentina

Vladimir Balza Franco

Ph. D. en Administración  
Universidad del Magdalena, Colombia

## **Revista avalada por Publindex**

**Indexada en:** Redalyc, Catálogo Latindex 2.0,  
Latindex, DOAJ, EbscoHost, Redib, Dialnet, Rebiun,  
ErihPlus, Periódica, Sherpa Romeo, Google Scholar

---

## **Para suscripciones o canjes, diríjase a:**

### **Ciencia y Poder Aéreo**

✉ [cienciaypoderareero@epfac.edu.co](mailto:cienciaypoderareero@epfac.edu.co)

(601) 2134698 Ext. 72500 - 72625

Biblioteca Escuela de Postgrados de la FAC

### **Para mayores informes:**

Dirección postal | Mailing Address | Endereço postal

Cra. 11 n.º 102-50 Edificio ESDEG, Escuadrón de Investigación

Oficina 411. A.A.110111. Bogotá D.C., Colombia

(601) 2134698 Ext. 72500 - 72625

[www.publicacionesfac.com](http://www.publicacionesfac.com)

---

# Contenido

## Seguridad Operacional y Logística Aeronáutica

- 6-23 **Control de vuelos ilícitos, una concepción desde el diseño operacional**  
Control of illicit flights, an operational design approach  
Controle de voo ilegal, uma abordagem de projeto operacional  
Jaime Ramiro Andrade Albuja, Víctor Xavier Enríquez Champutiz
- 24-31 **Structuring The Urban Airspace For Efficient Logistics Traffic Operation**  
Estructuración del espacio aéreo urbano para un funcionamiento eficaz del tráfico logístico  
Estruturação do espaço aéreo urbano para uma operação eficiente do tráfego logístico  
Bruno Lamiscarre, Innocent E. Davidson, Yeisson Rincón Cuta,  
Luis Gustavo Zelaya Cruz, Felix Mora-Camino
- 32-50 **Estado emprendedor y plan nacional de desarrollo, 2022-2026: oportunidades para la seguridad y defensa colombiana**  
Entrepreneurial state and national development plan, 2002-2026: opportunities to the Colombian security and defense sector  
Estado empreendedor e plano de desenvolvimento nacional, 2002-2026: oportunidades para o setor de segurança e defesa colombiano  
Javier Alberto Castrillón Riascos, Carlos Andrés Suárez Amador
- 51-67 **Potencial del vuelo en planeador: análisis y posible implementación en la Escuela Militar de Aviación**  
Glider flight potential: analysis and possible implementation at the Colombian Air Force Academy  
Potencialidades do planador: análise e possível implementação na Escola de Aviação Militar  
Yesid Alejandro Quiroga Bujato, Luis Felipe Riaño Salazar, Ricardo Andrés Cataño Martínez
- 68-80 **Helamiento en aeronaves: un desafío para la seguridad y la eficiencia aérea**  
Icing in aircraft: a challenge for safety and air efficiency  
Congelamento em aeronaves: um desafio para a segurança e eficiência aérea  
Zharik Nicole Lee Cruz, Juan Pablo Gutierrez Mora, Ana Maria Arango Guzman,  
Joel Sebastian Riascos Hurtado, Richard Giovanni Avella Sarmiento

## Tecnología e Innovación

---

81-99

### **Evaluación de las celdas de hidrógeno como alternativa al queroseno en la aviación: un enfoque hacia la sostenibilidad energética aeronáutica**

Evaluation of hydrogen cells as an alternative to kerosene in aviation: an approach towards aeronautical energy sustainability

Avaliação das células de hidrogénio como alternativa à parafina na aviação: uma abordagem para a sustentabilidade energética da aviação

Luisa Fernanda Mónico Muñoz, Sofía Guadalupe Ríos Esparza

100-111

### **Implementación de polímeros termoplásticos reciclados como materia prima potencial para procesos de manufactura aditiva**

Implementation of recycled thermoplastic polymers as potential raw material for additive manufacturing process

Implementação de polímeros termoplásticos reciclados como potencial matéria-prima para processos de fabrico aditivo

Brallan Esteban Martínez Quiroga, María Isabel Arévalo Ramírez, Maribel Reyes Hernández

## Gestión y Estrategia

---

112-124

### **Calificación jurídica y régimen de propiedad de los meteoritos en Chile**

Legal qualification and ownership of meteorites in Chile

Qualificação jurídica e propriedade dos meteoritos no Chile

Marcela Tobar Garrido

125-136

### **Modelo de cultura organizacional, determinante en los procesos de cambio en innovación institucional en la Fuerza Aeroespacial Colombiana**

Organizational culture model, determinant in the processes of change and institutional innovation in the Colombian Aerospace Force

Modelo de cultura organizacional, determinante nos processos de mudança em inovação institucional na Força Aeroespacial Colombiana

Luz Giovanna Munar Casas, Lina María Rodríguez Gallego, Alicia del Pilar Martínez Lobo, Andrés Felipe Rodríguez Daza

## Educación y TIC

---

137-151

### **Análisis de la ciberseguridad en espacios educativos pertenecientes a la Fuerza Aeroespacial Colombiana**

Cybersecurity guidelines in high education institutions of the Colombian Aerospace Force

Diretrizes de cibersegurança em instituições de ensino alto da Força Aeroespacial Colombiana

Jaquelin Castillo García

155-163

**Instrucciones para autores** | Guidelines for Authors | Diretrizes para autores

# Control de vuelos ilícitos, una concepción desde el diseño operacional

Fecha de recibido: 22 de mayo 2023	Fecha de aprobado: 08 de agosto 2023
Reception date: May 22, 2023	Approval date: August 08, 2023
Data de recebimento: 22 de maio de 2023	Data de aprovação: 08 de agosto de 2023

## Jaime Ramiro Andrade Albuja (Tcrn. EMT. Avc.)

<https://orcid.org/0009-0003-4812-8361>  
[jaimeandrade@fae.mil.ec](mailto:jaimeandrade@fae.mil.ec)

Licenciado en Administración Aeronáutica  
Director de Inteligencia – Fuerza Aérea Ecuatoriana, Ecuador  
Rol del investigador: teórico

Degree in Aeronautical Administration  
Director of Intelligence - Ecuadorian Air Force, Ecuador  
Researcher's role: theoretical and writing

Licenciatura em Administração Aeronáutica  
Director de Inteligência - Força Aérea Equatoriana, Equador  
Função do pesquisador: teórico e redação

## Víctor Xavier Enríquez Champutiz (Tcrn. EMT. Avc.)

<https://orcid.org/0000-0001-6211-8977>  
[victorenriquez@fae.mil.ec](mailto:victorenriquez@fae.mil.ec)

Magíster en Ingeniería en Sistemas de Calidad y Productividad  
Oficial de la Dirección General de Logística – Fuerza Aérea Ecuatoriana, Ecuador  
Rol del investigador: teórico

Master in Engineering in Quality and Productivity Systems  
Officer of the General Directorate of Logistics - Ecuadorian Air Force, Ecuador  
Researcher's role: theoretical and writing

Mestrado em Engenharia de Sistemas de Qualidade e Produtividade  
Oficial da Direção Geral de Logística - Força Aérea Equatoriana, Equador  
Função do pesquisador: teórico e redação

**Cómo citar este artículo:** Andrade Albuja, J. R., y Enríquez Champutiz, V. X. (2023). Control de vuelos ilícitos, una concepción desde el diseño operacional. *Ciencia y Poder Aéreo*, 19(1), 6-23. <https://doi.org/10.18667/cienciaypoderareo.797>



## Control de vuelos ilícitos, una concepción desde el diseño operacional

**Resumen:** En el 2015, la Organización de las Naciones Unidas (ONU) declaró al narcotráfico como una amenaza en contra de la paz y la seguridad integral de los Estados, razón por la cual, se materializó la Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito (UNODC), cuya finalidad consiste en ayudar a los países adherentes a combatir el tráfico indiscriminado de drogas y el crimen organizado relacionado con esta actividad. A nivel regional, su lucha ha representado un verdadero desafío, que demanda de la participación coordinada del Estado, las instituciones públicas y el sector privado, con base en políticas y programas de cooperación mutua, que permitan erradicar este flagelo y sus delitos conexos, entre ellos, el tráfico de armas, municiones y explosivos, la explotación ilegal de recursos naturales, el empleo de grupos delincuenciales organizados para ejecutar actos de sicariato, violencia extrema, intimidación, y otros, que a la postre generan inestabilidad política, social y económica. Por su parte, el Ecuador identifica a la seguridad actual como multidimensional, cooperativa, democrática y humana, enfatizando el fortalecimiento de las relaciones bilaterales con países de la región, en donde el “poder duro” y la disuasión por sí sola no surten los efectos deseados, obligando a sus Fuerzas Armadas (FF. AA.) a redefinir sus estrategias, para enfocar sus fines, modos y medios hacia el combate de una amenaza que se adapta y aprovecha de las vulnerabilidades sociales, económicas y políticas. Actualmente se han determinado tres corredores aéreos de aproximación hacia el Ecuador, lo que resalta la importancia de mantener un control efectivo del espacio aéreo, considerada como una de las alternativas viales (2 % de toda la droga) para el ingreso y salida de sustancias estupefacientes en el país.

El artículo propone un diseño operacional para el control de vuelos ilícitos, que restrinja el uso del espacio aéreo ecuatoriano para actividades de narcotráfico, a fin de alcanzar la neutralización de tráficos no identificados y reducir la incidencia de esta actividad ilícita al interior del país, para lo cual se utilizó una metodología desde un enfoque descriptivo, mediante una investigación documental en fuentes abiertas desde una perspectiva holística, realizando una correlación de diseños operacionales referentes al tema de investigación y técnicas de panel de expertos, en el campo de planificación estratégica, aportando la experiencia de los autores en la planificación de inteligencia.

**Palabras clave:** diseño operacional; vuelos ilícitos; control del espacio aéreo.

## Control of illicit flights, an operational design approach

**Abstract:** In 2015, the United Nations Organization (UN) declared drug trafficking as a threat against the peace and comprehensive security of States, therefore, the United Nations Office on Drugs and Crime was created (UNODC), whose purpose is to help acceding countries to combat indiscriminate drug trafficking and organized crime related to this activity. At the regional level, their fight has represented a real challenge, which demands the direct participation of the State, public institutions and the private sector, based on mutual cooperation programs, which allow the eradication of this scourge and its related crimes, among them, the trafficking of arms, ammunition and explosives, the illegal exploitation of natural resources, the use of organized criminal groups to carry out acts of hired assassins, extreme violence, intimidation, and others, which ultimately generate political, social and economic instability. For its part, Ecuador identifies current security as multidimensional, cooperative, democratic and humane, emphasizing the strengthening of bilateral relations with countries in the region, where “hard power” and deterrence alone do not have the desired effects, forcing its Armed Forces to re-define their strategies, to focus their ends, ways and means towards combating a threat that adapts and takes advantage of social, economic and political vulnerabilities. Currently, three aerial approaches to Ecuador have been determined, which highlights the importance of maintaining effective control of the airspace, considered as one of the road alternatives (2 % of all drugs) for the entry and exit of substances such as drugs in the country.

The article proposes an operational design for the control of illegal flights, which restricts the use of Ecuadorian airspace for drug trafficking activities, in order to achieve the neutralization of unidentified traffic and reduce the incidence of this illegal activity within the country, to which using a methodology from a descriptive approach, through documentary research in open sources from a holistic perspective, making a correlation of operational designs referring to the research topic and expert panel techniques, in the field of strategic planning, contributing experience of the authors on intelligence planning.

**Keywords:** Operational design; illegal flights; airspace control.

## Controle de voo ilegal, uma abordagem de projeto operacional

**Resumo:** Em 2015, a Organização das Nações Unidas (ONU) declarou o tráfico de drogas uma ameaça à paz e à segurança integral dos Estados, o que levou à criação do Escritório das Nações Unidas sobre Drogas e Crime (UNODC), cujo objetivo é ajudar os países membros a combater o tráfico indiscriminado de drogas e o crime organizado relacionado a essa atividade. No âmbito regional, seu combate tem representado um verdadeiro desafio, que requer a participação coordenada do Estado, das instituições públicas e do setor privado, com base em políticas e programas de cooperação mútua, para erradicar esse flagelo e os crimes a ele relacionados, incluindo o tráfico de armas, munições e explosivos, a exploração ilegal de recursos naturais, o uso de grupos criminosos organizados para realizar atos de assassinato contratado, violência extrema, intimidação e outros, que acabam gerando instabilidade política, social e econômica. Por sua vez, o Equador identifica a segurança atual como multidimensional, cooperativa, democrática e humana, enfatizando o fortalecimento das relações bilaterais com os países da região, onde o "hard power" e a dissuasão, por si só, não surtem os efeitos desejados, obrigando suas forças armadas a redefinir suas estratégias para focar seus objetivos, formas e meios no combate a uma ameaça que se adapta e se aproveita das vulnerabilidades sociais, econômicas e políticas. Atualmente, foram identificados três corredores aéreos de acesso ao Equador, o que destaca a importância de manter o controle efetivo do espaço aéreo, considerado uma das rotas alternativas (2% de todas as drogas) para a entrada e saída de substâncias entorpecentes do país.

O artigo propõe um projeto operacional para o controle de voos ilícitos, que restringe o uso do espaço aéreo equatoriano para atividades de tráfico de drogas, com o objetivo de neutralizar o tráfico não identificado e reduzir a incidência dessa atividade ilícita no país, para o qual foi utilizada uma metodologia de abordagem descritiva. A metodologia utilizada baseou-se em uma abordagem descritiva, utilizando pesquisa documental em fontes abertas a partir de uma perspectiva holística, correlacionando desenhos operacionais relacionados ao tema da pesquisa e técnicas de painel de especialistas no campo do planejamento estratégico, contribuindo com a experiência dos autores em planejamento de inteligência.

**Palavras-chave:** projeto operacional; voos ilícitos; controle do espaço aéreo.

## Introducción

El fenómeno socioeconómico y político denominado globalización, ha favorecido a la liberalización de los mercados y, en consecuencia, al desarrollo de diversas formas de criminalidad. En el siglo XX, el Crimen Organizado Transnacional (C.O.T.) fundamentaba su accionar, principalmente, en el narcotráfico; sin embargo, en las últimas décadas se ha evidenciado el auge de nuevas y lucrativas formas de ejecutar actividades narcodelictivas, que se han expandido a escala mundial (Bravo y Rivera, 2020).

Tanto las amenazas tradicionales, como estos nuevos desafíos globales de seguridad, afectan a la preservación de los Estados y al bienestar de sus habitantes, no solo desde el punto de vista de soberanía territorial, sino que adoptan aspectos de índole política, económica, tecnológica y ambiental. Bajo esta consideración, los organismos internacionales han sometido sus características y particularidades a una serie de debates y análisis, que permiten diferenciar a las unas de los otros. En tal virtud, la Asamblea General de las Naciones Unidas (2004), estableció como amenazas emergentes a “cualquier suceso o proceso que cause muertes en gran escala o una reducción masiva en las oportunidades de vida y que socave el papel del Estado como unidad básica del sistema internacional” (ONU, 2004, p. 12), e identificó seis grupos de amenazas globales: 1) las amenazas económicas y sociales; 2) los conflictos entre Estados; 3) los conflictos internos; 4) las armas nucleares, radiológicas, químicas y biológicas; 5) el terrorismo; 6) y la delincuencia organizada transnacional.

El último reporte levantado por el Estudio de las Naciones Unidas sobre las Tendencias Delictivas y el Funcionamiento de los Sistemas de Justicia Penal (2020), América Latina es una de las regiones más violentas del mundo. En las últimas estadísticas disponibles, los países de la región exhiben una tasa de 24.5 homicidios por cada 100 000 habitantes, la cual es tres veces superior al promedio mundial. El mismo reporte señala que estas cifras son producto de la gran influencia que ejercen los grupos delincuenciales organizados vinculados al narcotráfico y sus delitos conexos,

tales como: al tráfico de armas, municiones y explosivos; la trata de personas; secuestros y asesinatos selectivos; entre otros.

Bajo estas circunstancias, la Política de la Defensa Nacional del Ecuador definió como amenaza para el Estado a todos los “fenómenos, elementos o condiciones de naturaleza antrópica, caracterizada por su capacidad, motivación e intencionalidad de atacar contra los intereses vitales o estratégicos del Estado” (Ministerio de Defensa Nacional, 2018, p. 50), entre ellos, el crimen organizado transnacional y su participación en las actividades vinculadas con el Tráfico Ilícito de Drogas (T.I.D.).

Ecuador, al encontrarse ubicado en la región noroccidental de América del Sur, posee una posición geográfica privilegiada que ha despertado el interés de las organizaciones narcodelictivas internacionales, especialmente por compartir sus fronteras con los mayores productores de hoja de coca del mundo, como lo son Colombia y Perú (UNODC, 2023).

En tal virtud, la realidad nacional ha adaptado la concepción política y normativa de la seguridad integral, tomando en consideración dos grandes ámbitos:

El primero, la protección de los habitantes en el territorio nacional, garantizada a través de la seguridad ciudadana bajo responsabilidad de la Policía Nacional con el apoyo de las Fuerzas Armadas; y, el segundo, la defensa del Estado en sus dimensiones de soberanía territorial, protección de zonas de seguridad y áreas estratégicas bajo responsabilidad de las Fuerzas Armadas. (Ministerio de Defensa Nacional, 2018, p. 46)

Bajo estos preceptos, el objetivo general del artículo es proponer a las Fuerzas Armadas un diseño operacional que le permita orientar sus fines, modos y medios, para alcanzar las capacidades estratégicas que le permitan intervenir efectivamente ante la presencia de diversas y distintas amenazas, como la delincuencia común y el Crimen Organizado Transnacional, la proliferación de Grupos Irregulares Armados, el narcotráfico y sus delitos conexos, entre otras.

Para llegar al objetivo planteado se analizará la problemática de la región, el estado del arte en torno a

los vuelos ilícitos, y mediante la aplicación de una metodología de enfoque descriptivo y con base a una investigación documental se llegará a la propuesta del diseño operacional debidamente faseado, identificando los centros de gravedad propios y de los grupos narcodelictivos.

## Problema

En el 2018, el Ministerio de Defensa Nacional (Midena), publicó el denominado *Libro Blanco* (política de la Defensa Nacional, promulgada en el 2018 por el Ministerio de Defensa), en donde se describen las diferentes amenazas y riesgos que atentan a la seguridad y defensa del Estado, bajo un contexto global y regional, que obliga al Ecuador a alinearse a una realidad multinacional y no actuar como un ente aislado de la problemática mundial. Sin embargo, es necesario establecer la capacidad que tiene el Estado para hacer frente a los escenarios de seguridad planteados; siendo la de mayor preocupación en torno a la “evolución” de sus Fuerzas Armadas, que le permitan complementar su rol tradicional de alistamiento operativo para conflictos externos, por un enfoque apegado a las necesidades del escenario actual.

¿Por qué las FF. AA.? El artículo 158 de la Constitución del Ecuador asigna a las FF. AA., como misión fundamental, la defensa de la soberanía e integridad territorial (Asamblea Nacional, 2008). Con base en este mandato, tiene como deber primigenio garantizar la inviolabilidad de sus fronteras, siendo el sector limítrofe norte, conformado por las provincias de Esmeraldas, Carchi y Sucumbíos, con un total de 580 kilómetros lineales, el que requiere mayor atención, considerando que por varias décadas se ha visto expuesto a la posibilidad de infiltraciones terrestres, fluviales y aéreas, como resultado del conflicto interno que vive el vecino país de Colombia.

Según reportes del Banco Interamericano de Desarrollo (2018), la principal amenaza que aqueja a la región gira en torno al crimen organizado transnacional, implicando una amenaza para la democracia de

los Estados. El tráfico de estupefacientes, que es la forma de criminalidad organizada que más afecta hoy a la región, se ha expandido considerablemente en los últimos años. Con base al reporte presentado por la U.N.O.D.C. en junio de 2020, Sudamérica es la región con más decomisos de cocaína realizados en 2018, con un valor equivalente al 55 % del total global decomisado. Esta cifra pone en evidencia la problemática regional que vive Sudamérica en los tiempos actuales. (Guerrero y Guillermo, 2023)

Para Ecuador, las amenazas y riesgos ya han sido conceptualizados a través de la Política de la Defensa Nacional. En este contexto, el Sistema de Inteligencia Nacional, tiene la misión fundamental de analizar las amenazas a las que el país se enfrenta, lo que se torna cada vez más complejo debido a que las amenazas más graves vienen de agentes no estatales, como la delincuencia organizada transnacional. El Plan Específico de Inteligencia (Centro de Inteligencia Estratégica, 2023, p. 35), determina seis amenazas para el Estado ecuatoriano: 1) la agresión armada externa de actores no estatales; 2) la incidencia del crimen organizado transnacional en el Ecuador; 3) las acciones terroristas con diversas motivaciones; 4) las acciones contra el Estado en el ciberespacio; 5) la degradación ambiental; 6) y la limitación en el desarrollo económico sostenido y sustentable por presencia de flujos económicos ilícitos.

A pesar de que existen divergencias entre la Política de la Defensa Nacional y el Plan Específico de Inteligencia 2019-2021, debido a que el primer documento enfoca a las amenazas desde la perspectiva del rol que cumplen las Fuerzas Armadas en la seguridad y defensa del Estado; mientras que, el segundo documento, se enfoca en la presencia del Estado y las políticas de gobierno que pudiera emplear en las zonas de mayor conflictividad económico-social, es importante señalar que, las amenazas y riesgos identificados en ambos instrumentos normativos, afectan directamente a la seguridad del Estado y a la imagen que proyecta a nivel internacional, que a la postre, trae connotaciones de índole económicas, comerciales, sociales e incluso militares.

A fin de hacer frente a estas amenazas, la Fuerza Aérea Ecuatoriana (FAE) es la responsable de garantizar

la soberanía e integridad del espacio aéreo nacional, en tal virtud, por sus características y capacidades específicas, hoy busca iniciar el uso y la explotación del espacio y ciberespacio, desde donde se pretende generar interacciones cooperativas internacionales e interagenciales para desarrollar estrategias efectivas en contra de esta amenaza regional. Actualmente, la doctrina de la Fuerza Aérea Ecuatoriana, orienta sus medios de manera particular al ámbito externo, razón por la cual, debe complementar sus fines para enfrentar a las amenazas internas anteriormente detalladas.

Entonces surgen la pregunta **¿Cómo alinear toda la estructura del Estado para mantener el control del espacio aéreo y limitar las actividades de los vuelos ilícitos?**

En relación con este interrogante, revisaremos el estado del arte, identificaremos las diferentes capacidades que posee el Estado para hacer frente a esta problemática, todos estos elementos permitirán configurar una propuesta que coadyuve a la solución de la problemática planteada, mediante un diseño operacional para el control de los vuelos ilícitos.

## Estado del arte

Según la Oficina de las Naciones Unidas Contra la Droga y el Delito (UNODC), el Tráfico Ilícito de Drogas (TID) conlleva a la ejecución de otras actividades criminales, tales como: el tráfico de armas y material bélico; tráfico de migrantes y trata de personas, especialmente de mujeres y niños; blanqueo de capitales; tratamiento de residuos tóxicos, entre otras; las cuales han logrado infiltrarse en todos los poderes de una nación, consiguiendo reclutar y penetrar entidades de control (fuerza pública), sistema judicial y poder político, acoplando leyes que favorecen el cometimiento de dichas actividades (UNODC, 2023).

El accionar del Crimen Organizado Transnacional (COT), vinculado al narcotráfico y sus delitos conexos, ha permeado la seguridad del Estado ecuatoriano y vulnerado, en varias ocasiones, la soberanía de su espacio aéreo. El primer incidente de este tipo data del

2003, en el aeródromo Reales Tamarindo de la ciudad de Portoviejo, provincia de Manabí, en el cual se decomisaron tres aeronaves y 400 kg de cocaína. Cabe destacar que, actualmente, los carteles mexicanos pugnan por el control territorial de sectores donde se encuentran ubicadas plataformas internacionales de distribución (puertos y aeropuertos); así como centros de acopio y comercialización a baja escala (microtráfico), valiéndose de Grupos Delincuenciales Organizados (GDO), que operan al interior del país. En el caso de los carteles de Sinaloa y Jalisco Nueva Generación, tercerizan su accionar a través de GDO como los Choneros (Sinaloa) y Los Tiguerones (Jalisco Nueva Generación), quienes se dedican a brindar protección de cargamentos, rutas, centros de acopio y control de territorios (Cucalón, 2023).

En concordancia con lo expuesto, de acuerdo con el análisis de la situación del narcotráfico en Latinoamérica, realizado por la Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales (Flacso), identifica al Ecuador como un “lugar propicio para el acopio, almacenamiento y distribución de drogas ilícitas hacia ámbitos nacionales e internacionales, además para el tráfico de químicos, lavado de activos y otras amenazas que se derivan del Tráfico Ilícito de Drogas” (Jácome Rosenfeld, 2013, p. 81).

Análisis que es ratificado por la Unión Europea, quienes mantienen el Plan de Acción Global, bajo el siguiente nombre: “Lucha contra el tráfico de drogas en la ruta de la cocaína”, para lo cual, la Fundación Internacional para Iberoamérica de Administración y Políticas Públicas (FIIAPP), identifica a la región de Sudamérica, entre ellas al territorio ecuatoriano, como una de las principales rutas para la salida de droga hacia Norteamérica, Centroamérica y Europa.

A raíz del incidente del 2003, se han venido registrando algunos casos vinculados a Tráficos no Identificados (TNI), siendo el último con resultados positivos, el suscitado el 11 de noviembre del 2022, donde una avioneta fue decomisada en México, luego de haber operado en la ciudad de Milagro, provincia de Guayas. Si bien los principales actores del narcotráfico son los carteles mexicanos, quienes han logrado proyectarse hacia países de la región, como de otros continentes;

únicamente el 2 % de sus actividades de Tráfico Ilícito de Drogas (TID) es realizada por vía aérea (ONU, 2021).

Con base en esta información, el TID por vía aérea se ha venido realizando de forma esporádica en el Ecuador, mediante el uso de aeronaves de bajo performance que han sido modificadas para incrementar su capacidad de carga y su autonomía de vuelo, permitiéndoles decolar desde México o Centroamérica e ingresar a territorio ecuatoriano por las costas de las provincias del litoral ecuatoriano, hacia pistas autorizadas y no controladas por la DGAC, áreas aptas para operaciones aéreas ilícitas o carreteras de primer o segundo orden.

Otro de los contribuyentes es la situación política del país, que ha sufrido un deterioro notable en todas las estructuras del Estado, partidos y movimientos políticos, llevando al país a una verdadera incertidumbre; pues el cambio de corrientes políticas, alianza o ruptura de partidos que intervienen en el escenario actual, no proyectan una vía de desarrollo en las esferas del quehacer nacional. Se suma un hecho particular y sin precedentes en el país, identificado en la resolución del Consejo de Seguridad Pública y del Estado,

(C.O.S.E.P.E., 2023) en donde se evidencian acciones de violencia, vandalismo, actos terroristas protagonizados por grupos que por su accionar serían células adoctrinadas y entrenadas para la agitación de masas, lucha en las calles y acciones violentas contra las fuerzas del orden, generando el caos y la anarquía a nivel generalizado.

Por su parte, en el sector defensa, las Fuerzas Armadas como institución responsable de la soberanía, integridad territorial y de proteger los derechos, libertades y garantías de los ciudadanos, se enfrenta a un escenario que muestra deficiencias en los sistemas de inteligencia militar; limitando el contar con la información adecuada, precisa y oportuna, para actuar de manera anticipada a los diferentes actos de violación de la soberanía en los espacios geográficos de responsabilidad y control de las FF. AA., específicamente la Fuerza Aérea Ecuatoriana, en el espacio aéreo nacional.

La naturaleza diversa, el alcance multidimensional de las amenazas y la pluralidad de contextos bilaterales y subregionales, se suman a la compleja orografía del Ecuador, convirtiendo estas condiciones en una oportunidad para que las organizaciones

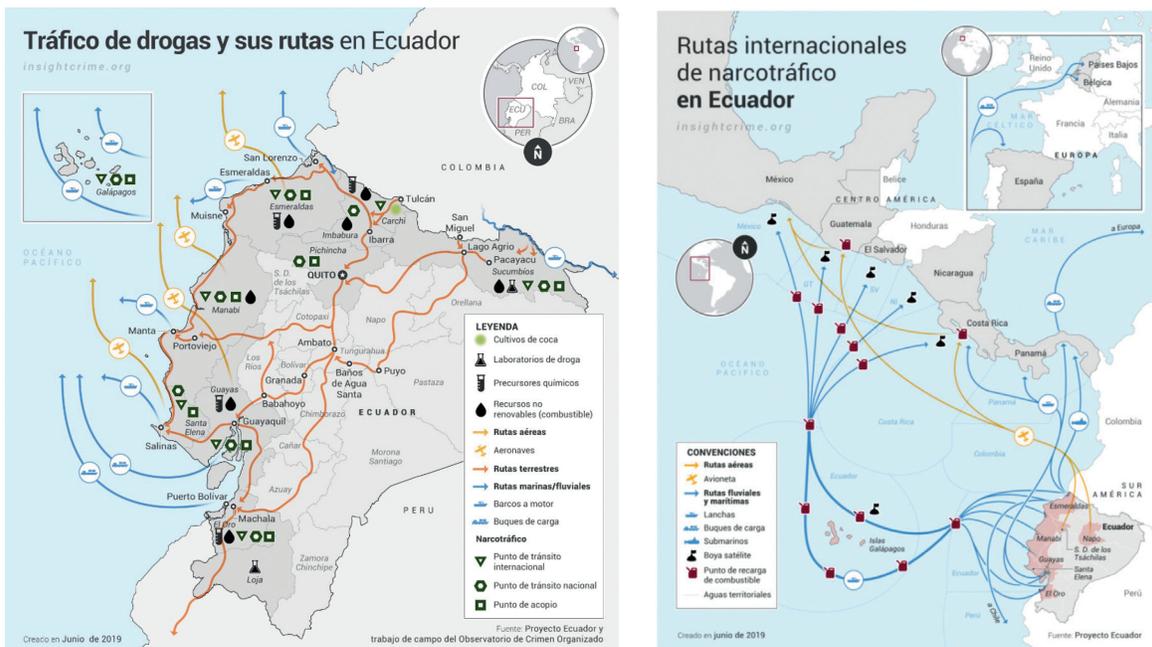


Figura 1. Rutas del narcotráfico  
Fuente: Portal In Sight Crime (Bargent, 2019).

transnacionales del narcotráfico incrementen sus operaciones aéreas ilícitas hacia y desde nuestro territorio. Las provincias orientales del Ecuador pasaron de ser un olvidado rincón de la Amazonía a convertirse en un importante centro regional, cuando la industria petrolera comenzó a extender sus actividades en la selva ecuatoriana y, sobre todo, a medida que la ciudad crecía, la guerrilla comenzó a desarrollar una economía paralela: clínicas para el tratamiento de los combatientes heridos, hoteles, bares y burdeles para el entretenimiento de los guerrilleros en licencia, tiendas de suministros militares y, por supuesto, se creó un espacio favorable para el desarrollo de actividades de narcotráfico, mediante el empleo de aeronaves comerciales o privadas, para el cometimiento de actos ilícitos.

Con el objetivo de enfrentar las nuevas amenazas, el Plan Nacional de Seguridad Integral 2019-2030 (2019), establece la necesidad de implementar un sistema de seguridad de arquitectura flexible, en el cual se integren las instituciones multilaterales, en sus distintos niveles; los instrumentos jurídicos; los compromisos y acciones en materia de seguridad; así como la implementación de zonas de paz y cooperación multinacional, en donde las Fuerzas Armadas sean las responsables del control de fronteras y, específicamente la Fuerza Aérea, mediante la vigilancia y control efectivo de la soberanía en el espacio aéreo, lo que demanda el desarrollo de líneas de acción estratégicas para enfrentar al uso de aeronaves en el cometimiento de delitos transnacionales como el narcotráfico.

Para el efecto hay que tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

- El Ecuador continental, por sus características geográficas (cordillera de los Andes) en el centro del país, deriva una serie de elevaciones de gran altitud en varias provincias del área occidental, las mismas que permiten la generación de áreas ciegas que impiden la total cobertura de los sistemas radar.
- Las condiciones geográficas del litoral han sido aprovechadas por las organizaciones narcodelictivas en el empleo de las aeronaves de bajo *performance*, que mediante vuelos a baja altura y

apagando el *transponder* evitan ser detectados por el sistema de vigilancia, ingresando a nuestro territorio, utilizando rutas de aproximación provenientes de Centroamérica, especialmente desde el sur de México por el corredor del Pacífico hacia las costas ecuatorianas.

Para mitigar estos problemas, la Defensa Nacional trata de mantener el control sobre la incidencia del narcotráfico, aportando así al incremento en los niveles de seguridad del país. Su principal actor lo constituyen las Fuerzas Armadas, que cuentan con personal, material y equipo destinado a enfrentarlas. Para lograrlo, es imprescindible determinar sus capacidades, ya que proporcionan un fundamento más eficiente para la toma de decisiones sobre: modernización de material existente, adquisiciones futuras, adaptación y el sostenimiento (Fuerza Aérea Ecuatoriana, 2020, pág. 4).

A fin de alcanzar los objetivos planteados, el Manual de Instrucción de Planificación por Capacidades (2020), ha establecido siete capacidades para las FF. AA., que son: 1) el comando y control; 2) la vigilancia, reconocimiento e inteligencia; 3) la maniobra; 4) el despliegue y movilidad; 5) la supervivencia y protección; 6) el sostenimiento logístico; 7) y el apoyo a la seguridad integral del Estado. De estas capacidades de las Fuerzas Armadas, se desprenden capacidades generales y específicas.

Para efectos de planificación y ejecución de las operaciones militares, el territorio nacional ha sido dividido de tal manera, que permita establecer una jurisdicción concreta bajo el mando de una sola autoridad. Dicha división corresponde a los comandos de operaciones terrestres, naval y aéreo, con varias fuerzas de reacción estratégicamente posicionadas.

La Fuerza Aérea Ecuatoriana, como órgano operativo del Comando Conjunto de las Fuerzas Armadas (Ley Orgánica de la Defensa Nacional, artículo 21), conforma el Comando de Operaciones Aéreas y Defensa (COAD), cuya misión consiste en ejecutar operaciones de apoyo a otras instituciones del Estado (sin estado de excepción), protegiendo las Zonas de Seguridad del Estado (ZSE) bajo su responsabilidad.

Para cumplir con la misión encomendada, cuenta con mando y medios asignados.

Es menester indicar que, la organización actual de las Fuerzas Armadas, corresponde a cinco comandos operacionales, de los cuales a la Fuerza Aérea le corresponde el quinto (CO5), cuya jurisdicción compete a todo el espacio aéreo continental e insular. Sin embargo, esta organización no ha dado los resultados esperados, debido a la contraposición de jurisdicciones, como resultado de la transversalidad de las operaciones aéreas. Esto ha obligado al conductor estratégico-militar a evaluar los resultados obtenidos y reconfigurar la planificación para un empleo más efectivo y eficiente.

## Metodología

El presente artículo académico fue realizado bajo el esquema de investigación documental en fuentes abiertas, desde una perspectiva holística, a fin de presentar el diseño operacional involucrando a las Fuerzas Armadas del Ecuador y las instituciones del Estado que puedan aportar para la vigilancia y control del espacio aéreo ante el narcotráfico, para lo cual se realiza una correlación de diseños operacionales referentes al tema de investigación.

Las técnicas utilizadas en la investigación fueron: panel de expertos, en el campo de planificación estratégica, destacando la experiencia de uno de los autores en la planificación de inteligencia; hermenéutica, por medio de la recopilación documental y estadística que permita comprender las vulnerabilidades y capacidades de las Fuerzas Armadas frente a la amenaza frente al narcotráfico utilizando medios aéreos para sus fines.

## Propuesta

A continuación, se presenta una propuesta de diseño operacional para el control del espacio aéreo, desarrollado bajo el siguiente escenario y supuestos:

### Estado final deseado de la amenaza

Contar con la suficiente información en calidad, así como en cantidad, permitirá identificar los actores en cada nivel, para el caso propuesto se determina:

- Nivel político: autoridades civiles del gobierno de turno.
- Nivel estratégico: narcotráfico por vía aérea arraigado.
- Nivel operacional: narcovuelos ilícitos proliferados.

### Objetivos operacionales de la amenaza

Al igual que el punto anterior, la información de inteligencia determinarán los mejores objetivos operacionales para el caso planteado:

- Obtener grandes réditos económicos con el apoyo de bandas organizadas a nivel nacional e internacional.
- Crear el caos, grave conmoción interna e inseguridad, mediante actos terroristas.
- Financiar la protesta social por largos períodos de tiempo hasta lograr generar una desestabilización de las instituciones y aprovechar la conmoción interna para desarrollar sus actividades ilícitas.
- Intimidar a los medios de comunicación social que consideren como una amenaza a sus intereses.
- Amenazar a la población que no colabora con actos ilícitos de narcotráfico en los sectores bajo su dominio.
- Realizar vuelos ilícitos, en aproximaciones desde el mar, a bajo nivel hacia las provincias del perfil costanero en el Ecuador Continental aprovechando los sectores donde existe deficiencia de los sistemas de defensa aérea, en horas de penumbra y amanecer, hasta pistas autorizadas o clandestinas.
- Reclutar a miembros de las fuerzas armadas y la policía nacional, a fin de mantener en sus organizaciones a personal que provea información

relevante para sus operaciones en todo el territorio nacional.

- Reclutar a miembros de la fuerza aérea, para obtener información en lo relacionado a áreas de operación de aeronaves, radares, capacidades, disponibilidad de aeronaves y radares, permisos de aeronavegabilidad y ubicación de los sistemas de defensa aérea.
- Reclutar a propietarios y/o administradores de las pistas autorizadas por la DGAC y áreas aptas para operaciones aéreas ilícitas ubicadas dentro de predios privados, principalmente, en las provincias de la costa.
- Construir áreas aptas para sus operaciones aéreas ilícitas, alejadas de los centros poblados, especialmente en las provincias del perfil costanero.
- Modificar aeronaves para realizar el reabastecimiento de combustible durante el vuelo, a fin de incrementar su autonomía y alcanzar grandes distancias.
- Reclutar a tripulaciones aéreas con entrenamiento y capacitación en aeronaves de bajo *performance*.
- Disponer de personal de apoyo en tierra para las operaciones aéreas y el transporte, acopio y envío de las Sustancias Catalogadas Sujetas a Fiscalización - SCSF a nivel nacional e internacional.

## Líneas de operaciones

Las líneas de operación definen la orientación de las fuerzas propias, en tiempo y espacio y son definidas de acuerdo con las fuerzas adversarias que se desea confrontar; para el presente diseño se han considerado las siguientes líneas de operación:

Tabla 1.  
Líneas de operación y nivel de intervención

Líneas de operación	Nivel de intervención
Gobierno Nacional.	Nivel estratégico – político.
Asamblea Nacional.	Nivel estratégico – político.
Ministerio de Defensa Nacional.	Nivel estratégico – military.

Continúa

Líneas de operación	Nivel de intervención
Ministerio del Interior.	Nivel estratégico – policial.
Sistema de la Defensa Aérea.	Nivel operacional.
Escuadrones Vígalco.	Nivel táctico.
Fuerza de reacción inmediata.	Nivel táctico (misión interdicción).
Centros de Comando y Control de Fuerzas Aéreas de la Región.	Nivel operacional (coordinación).
Bases y repartos de las FF. AA.	Nivel táctico.
Escuadrones de combate.	Nivel táctico.
Componente terrestre.	Nivel táctico (operaciones defensivas).
Gobernaciones.	Nivel político (coordinación).
Sistema ECU-911.	Nivel táctico (vigilancia).
Fiscalía.	Nivel táctico (jurisdiccional).
Aduana.	Nivel táctico (seguridad frontera).
Policía Nacional.	Nivel táctico (jurisdiccional).
Operaciones de información.	Nivel estratégico-operacional-táctico.

Fuente: modificado metodología Seminario Arte y Diseño Operacional Academia de Guerra Aérea, Curso Estado Mayor 2021

## Ambiente operacional

La amenaza que se pretende enfrentar con la propuesta basa su accionar utilizando aviación menor con capacidad de operar desde pistas clandestinas, con alta capacidad de logística en todo el teatro de operaciones. El escenario, la amenaza, el entorno jurídico y, sobre todo, la dimensión humana, juegan a favor de la amenaza y deben ser considerados en el diseño de las operaciones.

Para el accionar de la amenaza es indispensable que cuenten con apropiadas condiciones meteorológicas, iluminación lunar y lugares adecuados para su operación aérea ilícita en el litoral ecuatoriano, ya que este sector cuenta con las condiciones orográficas que favorecen su operación (Departamento de Inteligencia COAD, 2022). Se consideran como propicias, las condiciones para el empleo de aviación menor en actividades de narcotráfico, cuyo accionar se pretende neutralizar con el empleo del Sistema de Defensa Aérea y la interacción de otros organismos del Estado, quienes actuarían en etapas posteriores a la intervención de la Fuerza Aérea.

## Diseño operacional

A continuación, se presentan los elementos que constituyen el diseño operacional, para el control de los vuelos ilícitos en el Ecuador:

### Análisis y comparación de los intereses contrapuestos

Es necesario realizar una confrontación de los intereses propios con el del adversario, en cada uno de los niveles, todos en un mismo escenario operacional, con la finalidad de contar con claros indicios que organizaciones vinculadas con los carteles de narcotráfico realizarán lo posible por realizar vuelos ilícitos, evitando en todo momento su detección.

Tabla 2.  
Estado final deseado (propio frente al adversario)

Elemento de análisis	Propio	Adversario
Estado final deseado (EFD) (estratégico-operacional).	Narcotráfico en el Ecuador por vía aérea erradicado.	Narcotráfico en el Ecuador por vía aérea arraigado.
Centro de gravedad (CoG) (estratégico-operacional).	Sistema de defensa aérea.	Organizaciones vinculadas a carteles de narcotráfico que realizan operaciones aéreas ilícitas en zonas de la costa donde existe deficiencia de cobertura radar.
Objetivo estratégico (OE).	Impedir las acciones de narcotráfico por vía aérea.	Realizar el narcotráfico por vía aérea en forma recurrente.
EFD (operacional).	Vuelos ilícitos neutralizados.	Vuelos ilícitos en su destino final arribados.
Misión unidad táctica.	Detectar y neutralizar los vuelos ilícitos que utilicen el espacio aéreo ecuatoriano.	Realizar vuelos ilícitos en el espacio aéreo ecuatoriano.

Fuente: modificado metodología Seminario Arte y Diseño Operacional Academia de Guerra Aérea, Curso Estado Mayor 2021

### Análisis de las capacidades del adversario (F=fortaleza; D=debilidad; V=vulnerabilidad)

De acuerdo con la información de inteligencia, así como la experiencia del especialista, se pueden verificar las

capacidades tangibles e intangibles, para determinar si constituyen una fortaleza, debilidad o vulnerabilidad del adversario.

Tabla 3.  
Análisis de las capacidades del adversario

Capacidades intangibles	F	D	V	Fundamentos
Gran voluntad de lucha.			x	No obedecen a intereses vocacionales, sino materiales.
Alta moral y disciplina de las tripulaciones.		x		No se evidencia disciplina en las tripulaciones que componen la amenaza, pero sí una motivación por la recompensa económica que conlleva la actividad.
Alto nivel de entrenamiento de las tripulaciones.	x			Cuenta con entrenamientos en técnicas relacionadas con la disuasión y el engaño. Tienen experiencia para operar en pistas clandestinas, áreas aptas o improvisadas y volar bajo los 1000 FT, en horario nocturno a fin de evadir los sistemas de vigilancia.
Capacidades tangibles	F	D	V	Fundamentos
Operación aérea diurna o nocturna desde y hacia pistas clandestinas.		x		Las aeronaves disponen de modernos sistemas GPS, que les permite realizar una navegación rasante, sobrevolando la orografía irregular del territorio nacional, hasta su aproximación y aterrizaje en pistas autorizadas, áreas aptas, caminos de primer o segundo orden. Con ayuda de equipos de navegación nocturna e instrumentos avanzados. Alta capacidad económica que les permite la adquisición de equipos de navegación de última generación en apoyo a la operación aérea.
Soporte logístico en el punto.		x		Establecidas vías de abastecimientos principales y alternas. Organizaciones delictivas proporcionan adecuada iluminación, mediante mecheros o luces LED, que le permita el aterrizaje y decolaje de la aeronave.
Medidas disuasivas en vuelo.			x	Sus aeronaves no cuentan con medidas/contramedidas electrónicas que les alerte sobre amenazas en vuelo, sin embargo, la infiltración en la fuerza pública les permitiría conocer la activación de la Fuerza Respuesta Inmediata (FRI).

Continúa

Capacidades intangibles	F	D	V	Fundamentos
Autonomía y alcance.	x			Sus equipos operan con un bajo consumo de combustible que les permite operar con mayor autonomía que los aviones interceptores del Estado. Modificación de las aeronaves para realizar el reabastecimiento de combustible durante el vuelo, para incrementar su autonomía y alcanzar grandes distancias.
Equipos con sistema de escape.			x	No poseen asientos de eyección u otro mecanismo que les permita a las tripulaciones eyectarse ante posibles fallas mecánicas de la aeronave.
Ataque y defensa.			x	No se evidencia que dispongan de un sistema de armas al interior de la aeronave para defensa o ataque.
Comunicaciones.			x	Cuentan con teléfonos satelitales, para las comunicaciones aire-tierra, que les permite una adecuada coordinación y operación segura en tierra.
Personal.			x	Cuentan con personal reclutado que laboran en la parte aeronáutica civil, militar o policial que proporciona información sensible, que les permite realizar sus operaciones al margen de la ley.

Fuente: modificado metodología Seminario Arte y Diseño Operacional Academia de Guerra Aérea, Curso Estado Mayor 2021

## Identificación de fortalezas clave

Es necesario determinar nuestras fortalezas que intervinan en la resolución del problema planteado:

- Alto nivel de entrenamiento de las tripulaciones en vuelo diurno y nocturno a bajo nivel.
- Operación aérea diurna o nocturna desde y hacia pistas clandestinas.
- Soporte logístico en el punto de destino brindado por organizaciones delictivas.
- Autonomía y alcance sobreextendido mediante la modificación de las aeronaves que les permite reabastecimiento de combustible en vuelo.
- Red de colaboradores/informantes de la fuerza pública o moradores del sector de operación.

## Determinación del centro de gravedad (CoG)

Del análisis de las fortalezas clave, se desprenden dos centros de gravedad tentativos (propio o del adversario), que luego deben ser confrontados:

### CoG 1: realizar vuelos ilícitos evadiendo el sistema de defensa aéreo

- Alto nivel de entrenamiento de las tripulaciones en vuelo diurno y nocturno a bajo nivel.
- Autonomía y alcance sobreextendido mediante la modificación de las aeronaves que les permite reabastecimiento de combustible en vuelo.
- Red de colaboradores/informantes de la fuerza pública o moradores del sector de operación.

### CoG 2: realizar la operación de aeronaves en pistas clandestinas

- Alto nivel de entrenamiento de las tripulaciones en vuelo diurno y nocturno a bajo nivel.
- Operación aérea diurna o nocturna desde y hacia pistas clandestinas.
- Soporte logístico en el punto de destino brindado por organizaciones delictivas.

## Validación del centro de gravedad

Determinados los CoG se realiza la validación, que de acuerdo con la metodología para la determinación de CoG, se aplican seis preguntas, a fin de determinar cuál será el CoG del diseño operacional.

Tabla 4. Validación CoG

Característica	Clasificación y justificación	
	CoG 1	CoG 2
1. ¿Es algo que nos puede causar daño?	Sí. De forma directa afectaría a nuestro objetivo	No. Su afectación es indirecta.
2. ¿Es algo que afecta el logro del EFD propio o superior?	Sí. Es el medio principal de operación.	Sí. Pero de forma indirecta.
3. ¿La destrucción o neutralización del CoG conduce a la derrota adversaria?	Sí. Se inutilizaría su principal medio de operación.	No. De forma alternativa se recurriría a otras pistas clandestinas ubicadas en lugares diferentes.

Continúa

Característica	Clasificación y justificación	
	CoG 1	CoG 2
4. ¿Es un elemento que contribuye a afectar el CoG del escalón superior?	Sí. Con este elemento se afecta notablemente.	Sí. Pero no de forma principal o indispensable.
5. ¿Es una característica dominante donde todo depende de ella?	Sí. La realización de tráfico ilícitos depende de esta capacidad.	No. Depende solo una parte de la operación: despegue y/o aterrizaje.
6. ¿Es una característica o capacidad que la amenaza se encuentra protegiendo?	Sí. En esta capacidad basa su accionar.	Sí. Pero solo de forma temporal.

Fuente: modificado metodología Seminario Arte y Diseño Operacional Academia de Guerra Aérea, Curso Estado Mayor 2021.

## Conclusión: ¿Por qué es el CoG?

El CoG 1 constituye el principal medio que le permite alcanzar su EFD y cumplir su Objetivo Estratégico OE,

elementos que puede cumplir con las capacidades descritas.

¿Qué puede hacer el CoG que lo constituye como tal?

Una vez en operación, los vuelos ilícitos estarán en la capacidad de ser utilizados para el narcotráfico, evadiendo la detección de los sistemas de defensa aérea del Estado.

## Análisis del centro de gravedad

Determinado el CoG, si es necesario se requerirá más información para determinar las capacidades críticas, requerimientos críticos y vulnerabilidad crítica, factores que determinarán los actores de cada línea de operación, así como los puntos decisivos del diseño operacional, a fin de alcanzar el CoG determinado.

Tabla 5.  
Análisis CoG

CoG	Capacidades críticas (cc)
<b>Realizar vuelos ilícitos evadiendo el sistema de defensa aérea</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Operar aeronaves con alto nivel de entrenamiento de las tripulaciones.</li> <li>Realizar vuelos con gran autonomía y alcance.</li> <li>Operar de forma diurna y nocturna.</li> </ol>
Requerimientos críticos (rc)	Vulnerabilidad crítica (vc)
<ol style="list-style-type: none"> <li>Tripulaciones actualizadas y clareadas en perfiles de vuelos rasantes.</li> <li>Sistemas de navegación de las aeronaves afines al entrenamiento recibido.</li> <li>Instructores de vuelo disponibles para enseñanza.</li> <li>Aeronaves con bajo consumo de combustible.</li> <li>Pistas alternas de operación.</li> <li>Gran cantidad de combustible de aviación en el lugar de aterrizaje.</li> <li>Adecuada iluminación en el lugar de aterrizaje.</li> <li>Cabina del avión nocturnizada.</li> <li>Visores nocturnos.</li> <li>Sistemas de vuelo todo tiempo, todo aspecto.</li> <li>Adecuado sistema de comunicación aire-tierra.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Tripulaciones con poca capacidad de acceder a un entrenamiento regularizado y autorizado por la autoridad aeronáutica.</li> <li>Tripulaciones con poca experiencia de vuelo en la orografía del país que les hace susceptibles a sufrir accidentes.</li> <li>Instructores con poca disponibilidad de tiempo para enseñanza y con residencia alejada al lugar requerido.</li> <li>Aeronaves que pueden presentar reportajes técnicos en vuelo a pesar de su bajo consumo de combustible, sin posibilidad de asistencia inmediata.</li> <li>Pistas alternas con vulnerabilidad a ser descubiertas e inhabilitadas para la operación.</li> <li>Combustible de aviación de difícil adquisición.</li> <li>La iluminación de la pista delata su lugar de operación ante aeronaves interdكتورas.</li> <li>Asistencia técnica no disponible para solventar fallas imprevistas.</li> <li>Variables condiciones meteorológicas que les dificulte el uso de visores nocturnos.</li> <li>Aeronaves sin capacidad de incorporar sistemas de escape.</li> <li>Comunicaciones susceptibles a interceptación por parte de los organismos del Estado.</li> </ol>

Fuente: modificado metodología Seminario Arte y Diseño Operacional Academia de Guerra Aérea, Curso Estado Mayor 2021

## Descripción de las fases de la campaña

Se recomienda realizar un faseamiento del diseño operacional, lo cual permite visualizar que actividades constituyen parte de la fase preparatoria, las de ejecución y finalmente la consolidación:

### a. Fase preparatoria desde el día “C” hasta el día “D”

- a.1. Planificación. Etapa destinada para conseguir la voluntad política, generación de los documentos habilitantes y el presupuesto para el financiamiento de las operaciones conjuntas.
- a.2. Entrenamiento. Maniobras específicas para determinar procedimientos individuales y requerimientos para cumplir con el objetivo de la operación conjunta.
- a.3. Disuasiva. La maniobra conjunta tiene como fin, materializar el comando de operaciones, bajo un mando unificado, poner a prueba los procedimientos de cada institución, líneas de comunicación y requerimientos logísticos atendidos. Adicional esta fase sirve como acción disuasiva para evitar la aplicación de la ley del derribo, apoyada en el plan estratégico comunicacional, con el objetivo de lograr la aceptación de la comunidad nacional e internacional.

### b. Fase de ejecución: desde el día “D” hasta que se eliminen los vuelos ilícitos

Sistema de la defensa aérea en alerta para iniciar los procedimientos para ejecutar interdicción y los procedimientos de acuerdo con lo que le permitiría la ley del derribo. La fase de ejecución se debe ejecutar tantas veces como sea necesario, hasta que no existan vuelos ilícitos, apoyado en el plan estratégico comunicacional que logre el respaldo a nivel nacional e internacional, de las acciones militares emprendidas.

### c. Fase de consolidación: desde que se eliminen los vuelos ilícitos

Una vez que no existan vuelos ilícitos en el sector de responsabilidad, las autoridades pueden evaluar y presentar los resultados de la intervención

militar. Complementado en el plan estratégico comunicacional que difunda a nivel nacional e internacional las políticas y logros del Ecuador implementadas en contra del narcotráfico por vía aérea.

## Explicación de la propuesta del diseño operacional

Siendo el arte operacional la suma de conocimiento, experiencia, juicio e intuición, el diseño operacional propuesto no es más que la presentación gráfica de la maniobra o conjunto de maniobras que los autores han concebido para alcanzar el objetivo operacional y el EFD, planteado para el control de vuelos ilícitos.

La concepción parte de los estados finales deseados (propios y del adversario), los objetivos operacionales, las líneas de operación, los centros de gravedad, así como las capacidades, elementos que han sido descritos anteriormente en las tablas (1-5), ese escenario operacional es planteado en forma gráfica, con los siguientes elementos:

Tabla 6. Descripción de los elementos del diseño operacional

Gráfico	Nombre
	Punto decisivo PD.
	Punto decisivo PD que es parte del esfuerzo principal.
	Línea de operación
	Línea de esfuerzo (unión entre PD)
	Línea de esfuerzo (une varias PD)
	Centro de gravedad propio
	Centro de gravedad del adversario
	Objetivo operacional
	Estado final deseado

Fuente: elaboración propia.

El orden de los **puntos decisivos** (PD), que para nuestro caso se constituyen en eventos específicos, desde el cual vamos a amenazar el centro de gravedad del adversario, a su vez constituyen PD para la defensa en caso de constituirse en el centro de gravedad para el adversario. Redactados de tal manera que evidencien que han sido alcanzados o logrados.

Los PD están bajo responsabilidad de ejecución de cada una de las **líneas de operación** sobre las cuales están graficados; adicional se grafican las **líneas de esfuerzo** que son los conectores entre los PD, en caso de existir varios PD sobre diferentes líneas de operación, significa que son acciones coordinadas (por medios o recursos u objetivos comunes).

La secuencia de las PD, así como la conexión entre ellas dependen de la lógica “causa-efecto”, las líneas de esfuerzo también pueden unir grupos de PD con un sentido lógico de propósito, facilitando a los comandantes la visualización de las entidades u organizaciones sobre las cuales debe mantener una estrecha relación de comunicación y coordinación.

Adicional, es necesario resaltar la secuencia de las PD que constituyen el **esfuerzo principal**, para la cual los PD se encuentran resaltados de un color diferente, generalmente esta secuencia tiene como objetivo llegar a una acción decisiva favorable, facilitando la identificación sobre quien recae la mayor cantidad de tareas, así como responsabilidad, a fin de proporcionar todos los medios para llegar al **objetivo operacional y al estado final deseado**.

Es oportuno resaltar que todos los elementos descritos para llegar al EFD, no solo depende de quien realice el diseño operacional, sino también de la calidad de información de inteligencia disponible, una adecuada gestión de la logística para el sostenimiento de los esfuerzos, las líneas de comunicación, contar con recursos económicos suficientes, así como una oportuna gestión del **ritmo en las operaciones**, así como la intuición y experiencia del comandante permitirá determinar el momento adecuado para una **pausa operacional**, entre muchos otros factores.

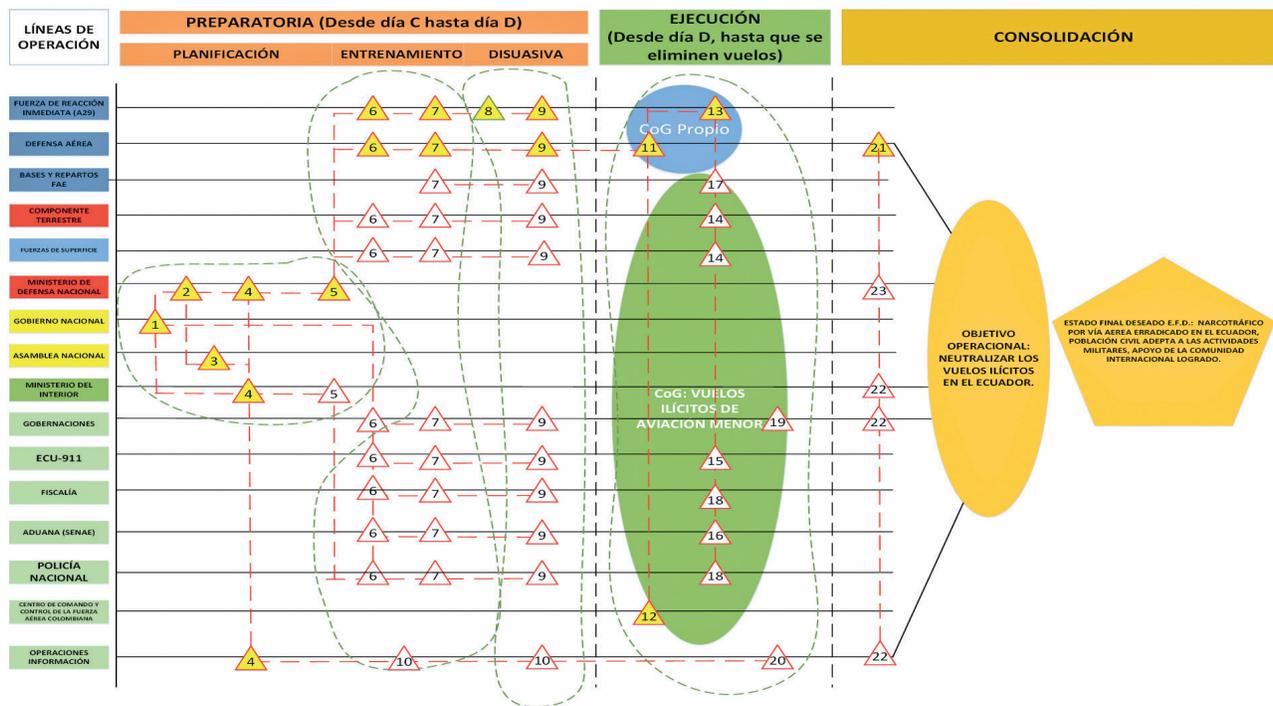


Figura 2. Diseño operacional para el control de vuelos ilícitos  
Fuente: elaboración propia.

Tabla 7.  
Puntos decisivos y su fundamentación

Fase	N.º	Puntos decisivos (PD)	Fundamentación del PD
Preparatoria	1	Estado final deseado, del nivel estratégico-político, definido.	Voluntad política para impulsar la ley del derribo/priorización del presupuesto/ disposiciones para el Ministerio de Defensa Nacional, Ministerio del Interior, poder judicial y la coordinación con la Asamblea Nacional.
	2	Propuesta para ley del derribo elaborada.	Ministerio de Defensa Nacional realiza la propuesta que garantice la ejecución de un plan de operaciones conjunto para evitar el libre tránsito de vuelos ilícitos.
	3	Ley del derribo aprobado.	Asamblea Nacional en mayoría, aprueba la Ley del Derribo y procede al trámite para el registro oficial.
	4	Plan de operaciones conjunto del comando conjunto de las FF. AA. y el Plan de la Policía Nacional, aprobados.	Contiene el Estado final deseado, estratégico militar, así como los objetivos, responsabilidades, medios asignados y tiempos de ejecución por fases.
	5	Presupuesto y financiamiento obtenido.	MDN realiza las gestiones y coordinaciones para obtener recursos derivados del plan.
	6	Maniobras individuales ejecutadas.	Cada Fuerza debe definir su Directiva de operaciones, énfasis en entrenamiento individual y conjunto, determinar detalles de coordinación para tener un mando único en el T.O.
	7	Recursos operativos y logísticos disponibles.	Personal, armamento tierra, radares, aeronaves, vehículos, entre otros disponibles, para alcanzar el EFD.
	8	Despliegue ejecutado.	Dispositivo implementado a nivel nacional.
	9	Pistas clandestinas identificadas e inhabilitadas	Permanentes misiones aéreas de reconocimiento en la zona de interés que permitan identificar áreas aptas para operaciones aéreas ilícitas y proceder a su inhabilitación
	10	Ejercicio de la maniobra conjunta ejecutada.	Conformación del comando operacional, mando unificado, unidad de mando, toma de decisiones en consenso, maniobra de entrenamiento conjunta para definir detalles.
	11	Plan estratégico de comunicación.	Difusión de documentales, resaltando efectos adversos derivados del narcotráfico. Aplicación de la ley del derribo y sus consecuencias.
Ejecución	12	Sistema de la defensa aérea 24/7 alertado.	Sistema de la defensa aérea (centro de mando y control, aviones interceptores, el comando de operaciones aéreas y defensa) con capacidad para vigilar, detectar, alertar, conducir e interdicar vuelos ilícitos 24/7, en el espacio aéreo nacional.
	13	Centro de comando y control alertado mediante el intercambio de información entre organismos de inteligencia de la región.	Coordinaciones entre países para intercambio de información y acciones conjuntas en caso de que se requiera.
	13	Tráfico aéreo ilícito neutralizado.	Tráfico aéreo ilícito es obligado a tomar procedimiento de aterrizaje o es derribado, amparados en la ley.
	14	Lugar donde la aeronave aterrizó o cayó asegurado.	Fuerzas de superficie aseguran el sector en donde el vuelo ilícito aterrizó o cayó, preparada para una eventual reacción armada.
	15	ECU-911 alertado.	Sistema ECU-911 en alerta, a fin de accionar a las instituciones competentes en esta operación.
	16	Pasos de frontera controlados.	Aduana de Ecuador controla los pasos de frontera / Ejército en alerta en la LPI / Evitar posible sobrepaso de la frontera por fuerzas irregulares o delincuencia organizada.
	17	Alas y Bases de la FAE disponibles.	COAD direcciona el alistamiento operativo de las tripulaciones.
	18	Escuadrones de combate.	CO 5 realiza la conducción directa de las misiones de interdicción / interceptación
	19	Procedimiento legal ejecutado y evidencias en custodia de la autoridad civil.	Fiscal y Policía Nacional, toman procedimiento que corresponde de acuerdo con las circunstancias (aterrizaje o derribo).
	20	Rueda de prensa ejecutada.	Gobernador junto con el comandante del comando de operaciones, dando declaraciones oficiales sobre el hecho.
CONSOLIDACIÓN	21	Comunidad internacional manifiesta su apoyo a la acción ejecutada.	Declaraciones de organismos internacionales apoyando la intervención militar para el control del narcotráfico.
	22	Sistema de la defensa aérea sin presencia de vuelos ilícitos 24/7.	Se llega a este punto decisivo una vez que se ha ejecutado tantas veces como sea necesaria la fase de ejecución. Ya que la ocurrencia de vuelos ilícitos se presenta de forma recurrente y no obedece a un solo evento.
	23	Plan estratégico de comunicación.	Difusión de los logros y resultados positivos obtenidos del accionar conjunto entre: Ministerio de Defensa Nacional, Comando Conjunto de las Fuerzas Armadas, Ministerio del Interior, Policía Nacional e Instituciones Civiles relacionadas, a nivel nacional e internacional.

Fuente: elaboración propia.

El diseño de operación para el control de vuelos ilícitos queda planteado de la siguiente manera:

- Las acciones inician en las líneas de operación a cargo del Ministerio de Defensa Nacional, Gobierno Nacional y Asamblea Nacional, siendo el PD-1 la definición del EFD, posterior los PD-2 al PD-5, unidos con una línea de esfuerzo que determinan la secuencia, así como una línea de esfuerzo que une este grupo de PD, determinando la fase Preparatoria, subfase de planificación.
- Una vez configurado el marco jurídico y con los recursos económicos asignados, se iniciará la subfase de entrenamiento, con la ejecución de los PD-6 al PD-7, en donde intervienen la mayor parte de líneas de operación, considerando que todos deben contar con el entrenamiento y conocimiento en la maniobra que se ejecutará conjuntamente entre las Fuerzas Armadas, Policía Nacional y entidades del Estado.
- Los PD-8 y PD-9, configuran la subetapa disuasiva, con acciones que permiten poner a prueba la maniobra, las comunicaciones y coordinaciones entre las líneas de operación, así como acciones que impidan o limiten los vuelos ilícitos.
- En la fase de ejecución, los PD-11 y PD-13 requieren de mayor protección al ser considerados el CoG propio, mientras que los PD-12, PD-14, PD-15, PD-16, PD-17, PD-18 y PD-19, son acciones para atacar el CoG del adversario, evitando los vuelos ilícitos.
- Importante destacar las acciones que deben ser ejecutadas en los PD-10, PD-20 y PD-22, a fin de mantener un adecuado manejo de medios e informar de las acciones en cada etapa del diseño operacional planteado.
- Los PD-21, PD-22 y PD-23 conforman la fase de consolidación, llegando a cumplirse el objetivo operacional y el EFD.

El ritmo de las operaciones y las respectivas pausas operacionales dependerán de la experiencia que la puesta en marcha del diseño operacional tantas veces como eventos se presenten.

## Conclusiones

1. El arte operacional es la suma de conocimiento, experiencia, juicio e intuición; el diseño operacional propuesto constituye la presentación gráfica de la maniobra o conjunto de maniobras que los autores han concebido para alcanzar el objetivo operacional y el EFD, planteado para el control de vuelos ilícitos.
2. El negar uso del espacio aéreo ecuatoriano para actividades ilícitas vinculadas al narcotráfico, es responsabilidad de la Fuerza Aérea Ecuatoriana, sin embargo, las capacidades de la amenaza, hacen que esta tarea se vuelva compleja, requiriendo de herramientas legales y el involucramiento de los poderes del Estado para enfrentarla, además de innovadoras formas de operación, ante lo cual es imprescindible plantear nuevas herramientas como la propuesta de diseño operacional que alinea a todos los involucrados en un objetivo común, el cual es, erradicar el narcotráfico por vía aérea en el país.
3. El diseño operacional para el control de vuelos ilícitos, contempla tres fases, la preparación, ejecución y consolidación del estado final deseado; siendo la fase de ejecución (Centro de Gravedad - CoG de la amenaza), una fase repetitiva y debe ser alcanzada tantas veces como sea necesario, en vista que se trata de una operación que debe neutralizar una amenaza recurrente, impulsado por carteles de delincuencia organizada multinacional, entre más corridas se realicen de la propuesta se establecerán nuevas líneas de operación, líneas de esfuerzos o puntos decisivos.
4. La metodología adoptada para la determinación y validación de los CoG, constituye una guía práctica que puede ser considerada por el comandante y su estado mayor; sin embargo, es necesario saber adaptarla de acuerdo al escenario y medios en donde se quiere ejecutar el diseño operacional, para conseguir el estado final deseado (EFD), de forma íntegra, coordinada y sincronizada.

5. La determinación adecuada de los puntos decisivos permite canalizar el esfuerzo emprendido por las diferentes líneas de operación, siendo necesario alinearlos de una manera tal que contribuya a la consecución del EFD.
6. Dependiendo del nivel que se elabore el diseño operacional, se debe considerar todos los actores que involucra el establecimiento de la estrategia que se pretende implementar para afectar al CoG del adversario y con ello alcanzar los Estados Finales Deseados.
7. Se considera que la implementación de la propuesta de diseño operacional para el control de vuelos ilícitos, es factible realizarlo considerando que las acciones ya se ejecutan en forma aislada, siendo siempre necesario la voluntad política y el trabajo coordinado y conjunto entre las fuerzas del orden y el apoyo de la población que se ve afectada directa o indirectamente por este flagelo.

## Referencias

- Bargent, J. (2019, 31 de octubre). *Ecuador: autopista de la cocaína hacia Estados Unidos y Europa*. In Sight Crime. <https://es.insightcrime.org/noticias/analisis/ecuador-autopista-de-la-cocaina-hacia-estados-unidos-y-europa/>
- Bravo, G. y Rivera, R. (2020). Crimen organizado y cadenas de valor: el ascenso estratégico del Ecuador en la economía del narcotráfico. *Revista Latinoamericana de Estudios de Seguridad*, (28), 8-24. <https://revistas.flacsoandes.edu.ec/urvio/article/view/4410>
- Centro de Inteligencia Estratégica (C.I.E.S.). (2023). *Centro de Inteligencia Estratégica, Plan Específico de Inteligencia 2019-2030*.
- Cucalón, H. (2023, 18 de abril). *Ecuador está “en guerra” por “terrorismo de crimen organizado”*. Infobae Interviewer. <https://www.infobae.com/america/agencias/2023/04/18/ecuador-esta-en-guerra-por-terrorismo-de-crimen-organizado-dice-ministro/>
- Fuerza Aérea Ecuatoriana. (2020). Manual de Instrucción de Planificación por Capacidades. [https://www.fae.mil.ec/wp-content/uploads/2022/03/fuerza\\_aE%CC%81rea\\_ecuatoriana\\_2\\_rendicio%CC%81n\\_de\\_cuentas.pdf](https://www.fae.mil.ec/wp-content/uploads/2022/03/fuerza_aE%CC%81rea_ecuatoriana_2_rendicio%CC%81n_de_cuentas.pdf)
- Guerrero, D. y Guillermo, B. (2023, 1 de abril). El Estado ecuatoriano y el crimen organizado. *Revista de la Academia de Guerra Aérea del Ejército Ecuatoriano*, 16(1), 12. <https://journal.espe.edu.ec/ojs/index.php/Academia-de-guerra/article/view/2987>
- Jácome Rosenfeld, A. I. (2013). Drogas en el Ecuador: ¿política prohibita o democracia deliberativa? *Revista Latinoamericana de Seguridad Ciudadana*, (13). <http://hdl.handle.net/10469/5469>
- Ministerio de Defensa Nacional. (2018). *Políticas de la Defensa Nacional “Libro Blanco”*. <https://www.elcomercio.com/actualidad/aeronave-detectada-isla-puna-guayas.html>
- ONU. (2021). *World Drug Report 2021*. <https://www.unodc.org/unodc/en/data-and-analysis/wdr2021.html>
- Solis, L. G. y Rojas, F. (2008). *Crimen organizado en América Latina y el Caribe*. Flacso Andes. <https://biblio.flacsoandes.edu.ec/libros/digital/42589.pdf>
- UNODC. (2023). *Oficina de las Naciones Unidas Contra la Droga y el Delito*. [https://www.unov.org/unov/es/unodc.html#:~:text=el%20Delito%20\(UNODC\)-,La%20Oficina%20de%20las%20Naciones%20Unidas%20contra%20la%20Droga%20y,Naciones%20Unidas%20contra%20el%20terrorismo](https://www.unov.org/unov/es/unodc.html#:~:text=el%20Delito%20(UNODC)-,La%20Oficina%20de%20las%20Naciones%20Unidas%20contra%20la%20Droga%20y,Naciones%20Unidas%20contra%20el%20terrorismo)

# Structuring The Urban Airspace For Efficient Logistics Traffic Operation

| Fecha de recibido: 07 de junio 2023 | Fecha de aprobado: 07 de septiembre 2023 |

| Reception date: June 07, 2023 | Approval date: September 07, 20233 |

| Data de recebimento: 07 de junho de 2023 | Data de aprovação: 07 de setembro de 2023 |

## Bruno Lamiscarre

<https://orcid.org/0000-0002-0314-2800>  
bruno.lamiscarre@neometsys.fr

Master of Science  
Researcher and teacher – Cape Peninsula University  
of Technology (CPUT), France  
Researcher's role: Theoretician  
Research group: Department of Electrical Engineering  
Magíster en Ciencias  
Investigador y docente – Universidad Tecnológica  
de la Península del Cabo (CPUT), Francia  
Rol de investigador: Teórico  
Grupo de investigación: Departamento  
de Ingeniería Eléctrica

## Innocent E. Davidson

<https://orcid.org/0000-0002-2336-4136>  
davidsoni@cput.ac.za

Doctor of Philosophy (Ph.D.) in Electrical Engineering  
Researcher and teacher – Cape Peninsula University  
of Technology (CPUT), South Africa  
Researcher's role: Theoretician  
Research group: French-South African  
Institute of Technology (F'SATI) / African  
Space Innovation Centre (ASIC)  
Doctor en Ingeniería Eléctrica  
Investigador y docente – Universidad Tecnológica  
de la Península del Cabo (CPUT), Sudáfrica  
Rol de investigador: Teórico  
Grupo de investigación: Instituto Tecnológico  
Franco-Sudafricano (F'SATI) / Centro  
Africano de Innovación Espacial (ASIC)

## Yeisson Rincón Cuta

<https://orcid.org/0000-0002-5086-3985>  
yeisson.rinconc@epfac.edu.co

Master's degree in integrated management systems for  
occupational risk prevention, quality, environment and  
corporate social responsibility  
Researcher and teacher – Colombian Aerospace Force  
Postgraduate School, Colombia  
Researcher's role: Theoretician  
Logistics and Administration Research Group (GILOGA)  
Magíster en sistemas integrados de gestión de  
prevención de riesgos laborales, calidad, medio  
ambiente y responsabilidad social corporativa  
Investigador y docente – Escuela de Postgrados de la  
Fuerza Aeroespacial Colombiana, Colombia  
Rol del investigador: Teórico  
Grupo de Investigación en Logística  
y Administración (GILOGA)

## Luis Gustavo Zelaya Cruz

<https://orcid.org/0000-0002-4272-4643>  
lgustavozelaya@gmail.com

Doctor en Ingeniería Industrial  
Researcher and teacher – Fluminense Federal  
University (UFF), Brazil  
Researcher's role: Theoretician  
Doctor en Ingeniería Industrial  
Investigador y profesor – Universidad Federal  
Fluminense (UFF), Brasil  
Rol de investigador: Teórico

## Felix Mora-Camino

<https://orcid.org/0000-0003-1930-6125>  
moracamino@hotmail.fr

Doctor of Science  
Researcher and teacher – Fluminense Federal  
University (UFF), Brazil  
Researcher's role: Theoretician  
Research group: ACAM Aran Center  
for Applied Mathematics  
Doctor en Ciencias  
Investigador y docente – Universidad Federal  
Fluminense (UFF), Brasil  
Rol del investigador: Teórico  
Grupo de investigación: ACAM Centro  
Aranés de Matemática Aplicada

**Cómo citar este artículo:** Lamiscarre, B., Davidson, I.E., Rincón Cuta, Y., Zelaya Cruz, L. G., & Mora-Camino, F. (2024). Structuring The Urban Airspace for Efficient Logistics Traffic Operation. *Ciencia y Poder Aéreo*, 19(1), 24-31. <https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaereo.799>



## Structuring The Urban Airspace For Efficient Logistics Traffic Operation

**Abstract:** This paper considers the problem of structuring the urban airspace so that UAVs-based-urban-logistics can be performed efficiently. This problem is important to guarantee mobility and accessibility for all operators. First, a set of assumptions about the organization of the lower layers of the urban airspace is proposed, then an optimal flow assignment problem is formulated, a heuristic solution approach is developed and, finally, its application to a medium size problem is displayed.

**Keywords:** UAVs; logistics; urban airspace; air traffic management; networks; optimization and heuristics.

## Estructuración del espacio aéreo urbano para un funcionamiento eficaz del tráfico logístico

**Resumen:** este trabajo considera el problema de la estructuración del espacio aéreo urbano para que la logística urbana basada en UAVs pueda realizarse de forma eficiente. Este problema es importante para garantizar la movilidad y accesibilidad de todos los operadores. En primer lugar, se propone un conjunto de hipótesis sobre la organización de las capas inferiores del espacio aéreo urbano, a continuación se formula un problema de asignación óptima de flujos, se desarrolla un enfoque heurístico de solución y, por último, se muestra su aplicación a un problema de tamaño medio.

**Palabras clave:** UAVs; logística; espacio aéreo urbano; gestión del tráfico aéreo; redes; optimización y heurística.

## Estruturação do espaço aéreo urbano para uma operação eficiente do tráfego logístico

**Resumo:** Este artigo considera o problema da estruturação do espaço aéreo urbano para que a logística urbana baseada em VANTs possa ser realizada de forma eficiente. Esse problema é importante para garantir a mobilidade e a acessibilidade de todos os operadores. Primeiro, é proposto um conjunto de suposições sobre a organização das camadas inferiores do espaço aéreo urbano, depois é formulado um problema de atribuição de fluxo ideal, é desenvolvida uma abordagem de solução heurística e, por fim, é apresentada sua aplicação a um problema de médio porte.

**Palavras-chave:** UAVs; logística; espaço aéreo urbano; gerenciamento de tráfego aéreo; redes; otimização e heurística.

## Introduction

UAV networks have been considered in the recent literature and are mainly related to either mobile communication networks, based on fleets of UAVs or with route generation for delivery services with UAVs. Important perspectives for the development of urban logistics based on the operation of UAVs have been consolidating, according to recent publications (Sah et al., 2021; Eun et al., 2019; Goodchild & Toy, 2018; Park et al., 2018; Koiwanit, 2018). These perspectives will be able to profit from the until now unused urban airspace to then alleviate ground traffic by diminishing the needs for ground-based logistic transportation, which is one of the main contributors to ground urban traffic congestion and pollution.

Previously, many studies have been devoted to the design of efficient UAVs based-urban-logistics systems (Roca-Riu & Menendez, 2019; Iranmanesh et al., 2020; Zubin et al., 2020), where, in general, traffic volumes and capacities are not taken as issues. However, Doole et al. (2018) show that, in few decades, the expected high traffic of drones operating in the urban airspace will make imperative its effective organization to turn feasible air traffic management. Structuring the airspace and adopting systematic procedures to operate this structured airspace will provide *ad-hoc* solutions for urban logistics air traffic operations (EmbraerX et al., n.d.). Then, the Air Traffic Management (EmbraerX, 2019) will be mainly in charge of flow management and dynamic airspace management.

In this study, the development of a method to structure the considered layer through the definition of a network of air links to operate traffic flows of UAVs devoted to general logistics in an urban area. This is considered through the resolution of the assignment of expected demand along feasible paths.

The paper is organized as follows: First, assumptions about operational objectives for UAVs-based-logistics in the urban airspace are proposed, leading to a structuring proposal for the lower layer of the urban airspace. Then, the optimization problem of the operated network inside the urban airspace is formulated

and a heuristic solution approach is developed and illustrated. Finally, the usefulness of this tool for Air Traffic Management is discussed.

## Basic assumptions and definitions

A basic assumption of this study is that urban logistic air traffic operates over the ground links of the considered urban area (avenues, streets and squares), while the urban passenger traffic is performed between the top of buildings (public and private) and open areas such as parks, cemeteries and outdoor parking areas. Then, it is considered that urban passenger air traffic is completely segregated from logistics air traffic, avoiding collision risks with those UAVs devoted to logistics. The urban area is supposed to be subdivided in subareas for which estimated or online origin-destination demand data is available. The considered air traffic flows are either local flows within a subarea or flows between subareas. A gate-to-gate flight between different subareas will present also an initial and a final local part.

The decision problem considered in this study is relative to the design of the urban airspace devoted to logistics flights between different subareas. This design is materialized through network linking reference points of the different subareas of the urban space. Once the network has been defined, users demand for air mobility will be assigned to paths belonging to this frame.

While designing this network, the main considered design objectives are to ensure mobility, accessibility and safety, master traffic safety, network capacity, and environmental impacts. The main constraints to be taken into consideration are the following:

- The designed network should provide reachability for any origin-destination pair associated with a demand for logistic UAVs services between subareas.

- The designed network is a capacitated network where each link is characterized by its length and capacity. This capacity is the maximum flow per unit of time compatible with a safety and local environmental impact.

As demand evolves in the short term (from one hour to another), the proposed solution must be easily adaptable to new demand profiles.

Let's then define the following sets, variables and parameters:

- $O$ , the set of origins, and  $D$ , the set of destinations, with in general  $|O| \ll |D|$ .
- $G$ : the oriented graph linking origins and destinations;
- $C_{hl}$ : the maximum air traffic allowed in airlink  $(h,l)$  during the considered period;
- $D_{ij}$ : the flight demand for airborne logistics between origin  $i$  and destination  $j$  during the considered period.

## Analysis of candidate problem formulations

The objective here is to determine which links will be used to realize the expected airborne logistics and what will be their intensity, considering some practical capacity attached to each candidate link. For this, a flow optimization problem is considered where the goal is to minimize the overall travelled distance while performing the airborne logistics operation. The considered problem presents specific characteristics when compared to traditional urban ground transportation network design problems or when it refers to air transportation network design problems, so new solution approaches should be developed.

The overall capacity  $C_G$  of the considered network can be computed using some of Ford & Fulkerson's scheme (1956) once a global source is connected to all the origins and a global sink is connected from all the destinations, both with infinite capacity links. A necessary condition for the feasibility of the flow assignment problem is that:

$$\sum_{i \in O} \sum_{j \in D} D_{ij} \leq C_G \quad (1)$$

A linear programming minimum cost flow problem can be easily formulated considering the minimization of total travelled distance under restrictions of positiveness, origin, destination, flow conservation, and capacity restrictions. However, when referring to the task of the traffic manager and the adopted point to point logistics operation, the decision variables are the paths adopted between each origin destination pair and their frequency. Then traffic flows in the urban network are the result of these traffic management decisions.

Taking as a basis the underlying street network and its local characteristics (overflight authorized or not), for each origin-destination pair a reduced set of possible air-paths linking them can be defined. Here it is also supposed that in a round trip the same path is used in reverse to come back to the origin of the flight.

The path flowbased-formulation of the design problem associated to the routing and capacity air-space management function of the Air Traffic Manager results in the following optimization problem:

$$\min \sum_{i \in O} \sum_{j \in D} \sum_{k \in P_{ij}^k} L_{ij}^k \cdot x_{ij}^k \quad (2)$$

under the constraints of capacity of the candidate elementary airlinks:

$$\sum_{i \in O} \sum_{j \in D} \sum_{k \in P_{ij}^k} a^{khl} \cdot x_{ij}^k \leq C_{h,l} \quad \forall (h,l), h \neq l \quad (3)$$

and

$$\sum_{k \in P_{ij}^k} x_{ij}^k = D_{ij} \quad \forall i, j, i \in O, j \in D \quad (4)$$

with

$$x_{ij}^k \geq 0 \quad k \in P_{ij}^k, \quad \forall i, j, i \in O, j \in D \quad (5)$$

where:

- $P_{ij}^k$  is the set of the  $K$  best elementary paths linking the origin  $i$  and the destination  $j$  in the air

logistic network of graph, where  $K$  is a small integer number;

- $U_{ij}^k$  is the set of elementary airlinks composing the  $k^{\text{th}}$  path between origin  $i$  and destination  $j$ ;
- $L_{ij}^k$  is the length of the  $k^{\text{th}}$  path between origin  $i$  and destination  $j$ :

$$L_{ij}^k = \sum_{(h,l) \in U_{ij}^k} L_{hl} \quad (6)$$

where  $L_{hl}$  is the length of airlink  $(h,l)$ ;

- $[a_{ij}^{khl}]$  is the incidence matrix between the  $k^{\text{th}}$  path between pair  $(i,j)$  and airlink  $(h,l)$ :  $a_{ij}^{khl} = 1$  if airlink  $(h,l)$  belongs to the  $k^{\text{th}}$  path between origin  $i$  and destination  $j$ , otherwise,  $a_{ij}^{khl} = 0$ ;

Here the total flown length is minimized (relation (2)) under capacity constraints (relation 3) for all the candidate elementary airlinks, constraint (4) insures that demands between pairs  $i, j$  are satisfied and constraints (5) recall the positive nature of the considered decision variables.

Then, if a solution is obtained, those links composing a used path (path  $k^*$  between  $i$  and  $j$  when  $x_{ij}^{k^*} > 0$ ) will be retained for proper equipment in the air logistic network. When no solution is available, constraints (3) can be relaxed to allow a limited number of multiple paths while demand must be assigned to several paths. This will be part of the flow management function of the Air Traffic Manager.

To produce acceptable solutions to the above linear network optimization problem, a greedy heuristic solution approach has been developed and its application to a medium size problem is considered.

The above formulation assumes that the  $K$  shortest paths problem has been solved for each pair of origin and destination. This can be performed using a generalization of Dijkstra's algorithm (Yen, 1971), while Yen's algorithm produces the  $K$  shortest loop less paths [14]. The complexity of such algorithms is polynomial, but in practice they lead to a very large amount of computation and memory space. Another limitation of this approach is that it is a static formulation whose solution does not provide hints for the management of the dynamic loading process of the network.

## Proposed heuristic solution approach

A different approach avoiding this calculation is developed here. The main ideas are to favor the most direct paths for each origin destination pair through a progressive loading of the network which can provide the dynamic routing policy of the Air Traffic network Management. The proposed approach is composed of the following steps:

- 0) Set  $\delta_{ij} = D_{ij} x_{ij} = 0 \forall i, j, i \in O, j \in D, L_{min} = 0$ , the initial decision space is the original network (the directed graph with its link capacities).
- 1) Use an algorithm such as Dijkstra's to compute the minimum paths between each origin and each destination with a nonzero demand in the current graph decision space. If there is no path between an origin and a destination, the corresponding demand for service  $\delta_{ij}$  cannot be fulfilled and must be deleted from the formulation. This residual demand could be processed through a ground transportation mode.
- 2) Compute the incidence matrix of the minimum path linking pair  $(i, j)$  and airlink  $(h,l)$ ,  $[a_{ij}^{1hl}]$ , as well as the length of each minimum path  $L_{ij}^1$  in the current decision space.
- 3) Assign the current demand  $[\delta_{ij}]$  to the minimum length paths between each origin and destination pair.
- 4) Compute for each origin  $i$  destination  $j$  pair and the load factor  $L_{ij}$  defined as follows:

$$L_{ij} = C_{hl} / (\sum_{\alpha \in O} \sum_{\beta \in D} a_{\alpha\beta}^{1hl} \delta_{\alpha\beta}) \quad (6)$$

- a. If  $L_{ij} \geq 1$  the current solution for the origin  $i$  destination  $j$  pair is given by:

$$x_{ij} = x_{ij} + \delta_{ij} \quad (7)$$

is feasible and the overall performance is updated by:

$$L_{min} = L_{min} + L_{ij}^1 \cdot \delta_{ij} \quad (8)$$

- b. If  $L_{ij} < 1$  that means that the capacities of some arcs in the current path between origin  $i$  and destination  $j$  are exceeded: only  $_{ij} \delta_{ij}$  is assigned to this path;
- 5) Coming back to the whole network:
- The newly saturated arcs  $(h, l)$  of the network such as  $\sum_{i \in O} \sum_{j \in D} a_{ij}^{1hl} \delta_{ij} = C_{h,l}$  are removed from the graph of the decision space;
  - The capacities of the remaining arcs are updated:

$$C_{h,l} \leftarrow C_{h,l} - \sum_{i \in O} \sum_{j \in D} a_{ij}^{1hl} \delta_{ij} \quad (9)$$

- The residual demand is computed for each origin destination pair:

$$\delta_{ij} \leftarrow \delta_{ij} (1 - \lambda_{ij}), \forall i, j, i \in O, j \in D \quad (10)$$

- 6) Go back to step 1.

Observe that the convergence of the algorithm towards a global or a partial (part of demand is deleted by the lack of a path between the corresponding origins and destinations) feasible solution is trivial. The algorithm ends when no residual demand remains. The computation burden, even for very large networks, is rather reduced since at each iteration the more demanding effort is to compute a minimum path for each residual demand over a reduced network without considering effectively the values of the remaining strictly positive capacities of the links.

## Illustration of the proposed approach

Figure 1 gives a scale representation of a considered network with two origins and four destinations, where the number associated to the twenty four two-ways links are the capacities.

Arcs with both extremities part of  $\{a, b, c, d, e, f\}$  have a capacity of 20, while all other arcs have a capacity of 40. Total demand is displayed in Table 1.

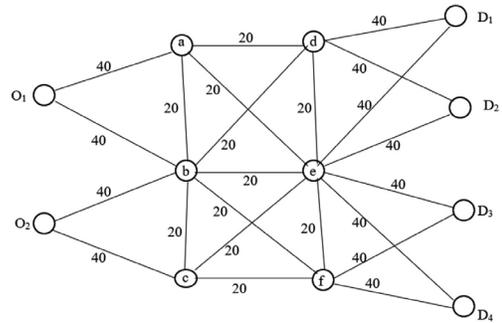


Figure 1. The considered logistic network

Table 1  
Distribution of initial demand

	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>	D <sub>4</sub>
O <sub>1</sub>	10	20	20	10
O <sub>2</sub>	10	10	10	10

Observe that the min cut methods lead to a network capacity of 140, which is superior to 100, the total of demands. The first iteration of the algorithm provides the results displayed in Table 2 with the reduced available network of Figure 2.

Table 2  
First assignment of flows to paths

Shortest paths	Path flow	Length	$\lambda_{ij}$	$\chi_{ij}$	$\delta_{ij}$
O <sub>1</sub> -a-d-D <sub>1</sub>	10	3	2/3	20/3	10/3
O <sub>1</sub> -a-d-D <sub>2</sub>	20	3	2/3	40/3	20/3
O <sub>1</sub> -b-e-D <sub>3</sub>	20	4	2/3	40/3	20/3
O <sub>1</sub> -b-f-D <sub>4</sub>	10	4	2	10	0
O <sub>2</sub> -b-d-D <sub>1</sub>	10	4	1	10	0
O <sub>2</sub> -b-e-D <sub>2</sub>	10	3	2/3	20/3	10/3
O <sub>2</sub> -c-f-D <sub>3</sub>	10	3	1	10	0
O <sub>2</sub> -c-f-D <sub>4</sub>	10	4	1	10	0

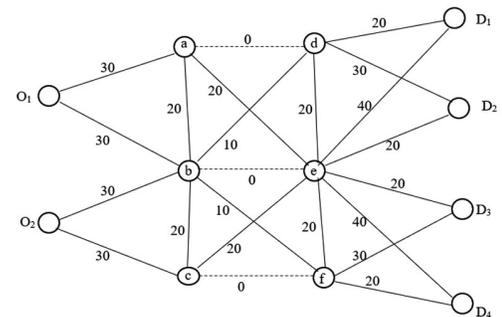


Figure 2. The reduced logistic network

The second iteration of the algorithm provides the results displayed in Table 3 with the residual network of Figure 3.

**Table 3.**  
Second assignment of flows to paths

Shortest paths	Path flow	Length	$\lambda_{ij}$	$X_{ij}$	$\delta_{ij}$
$O_1$ -b-d- $D_1$	10/3	5	3	10/3	0
$O_1$ -a-e- $D_2$	20/3	5	3/2	20/3	0
$O_1$ -a-e- $D_3$	20/3	5	3/2	20/3	0
$O_2$ -c-e- $D_2$	10/3	5	6	10/3	0

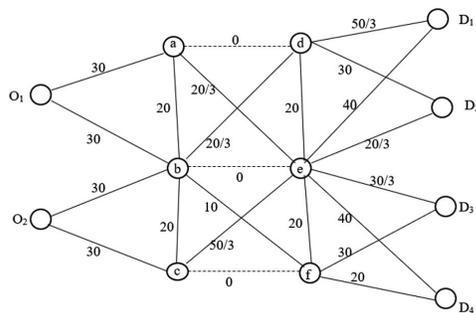


Figure 3. The final reduced logistic network

To the proposed solution corresponds a total round-trip distance of nine hundred with a mean distance of nine distributed over twelve different paths using a total of seventeen links over twenty-four. Observe the final reduced logistic network presents still a total flow capacity of 40.

A simple rule here to assign new incoming traffic in the logistic network during a considered period of time will be to distribute it among the generated paths proportionally to the computed flows provided by the proposed heuristic. For example, 2/3 of traffic between  $O_1$  and  $D_1$  will use path  $O_1$ -a-d- $D_2$  and 1/3 of traffic between  $O_1$  and  $D_1$  will use path  $O_1$ -b-d- $D_1$ .

## Conclusion

In this study, the prediction of the distribution of UAVs flows devoted to general logistics in the urban airspace has been considered. The objective has been to allow

more direct flights for the logistics operators, as well as to limit the impact of this traffic over the surrounding population. The limitation of this impact is effective by considering at the same time practical flow capacities for the candidate air links and by concentrating these flows in a reduced number of air links along minimum length paths between origin and destination pairs. The proposed heuristic strongly reduces the computational burden generally associated to flows assignment problems and allows to tackle very large-scale logistics networks. The quality of the solutions will depend on the accuracy of the prediction of demand between origins and destinations, as well as on the link capacity settings of the quality of the air. The implementation of the proposed solution is eased by the definition of the paths to be followed between each origin-destination pair and the distribution of traffic between these paths. Future work will extend this approach to consider more directly air traffic conflict limitations specially at intersections.

## References

Doole, M., Ellerbroek, J. & Hoekstra J. (2018). Drone Delivery. Urban airspace traffic density estimation. *Eighth SESAR Innovation Days*. [https://pure.tudelft.nl/ws/portalfiles/portal/68971371/SIDs\\_2018\\_paper\\_3.pdf](https://pure.tudelft.nl/ws/portalfiles/portal/68971371/SIDs_2018_paper_3.pdf)

EmbraerX. (2019, June 2nd). *Procedures will be key for Urban Air Traffic Management*. Vertical. <https://evtol.com/news/embraerx-procedures-will-be-key-for-urban-air-traffic-management/>

EmbraerX, Atech & Harris. (n.d.) *Flight Plan 2030. An air traffic management concept for urban air mobility*. [https://daflwcl3bnxyt.cloudfront.net/m/4e5924f5de45fd3a/original/190527-whitepaper-flightplan2030-150dpi\\_.pdf](https://daflwcl3bnxyt.cloudfront.net/m/4e5924f5de45fd3a/original/190527-whitepaper-flightplan2030-150dpi_.pdf)

Eun J., Song B. D., Lee S. & Lim D. E. (2019)). Mathematical Investigation on the Sustainability of UAV Logistics. *Sustainability, MDPI, 11(21)*, 1-15.

Ford, L. R. & Fulkerson, D. R. (1956). Maximal flow through a network, *Canadian Journal of Mathematics*, 8, 399-404.

Goodchild, J. A. & Toy, A. (2018). Delivery by drone: An evaluation of unmanned aerial vehicle technology in reducing

- CO2 emissions in the delivery service industry. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 61(A), 58-67.
- Iranmanesh, S., Raad, R., Raheel, M., Tubbal, F. & Jan, T. (2020). Novel DTN Mobility-Driven Routing in Autonomous Drone Logistics Networks. *IEEE Access*, 8(1), 13661-13673. 10.1109/ACCESS.2019.2959275
- Koiwanit, J. (2018) Analysis of environmental impacts of drone delivery on an online shopping system, *Advances in Climate Change Research*, 9(3), 201-207.
- Park, J., Kim, S. & Suh, K. (2018). A Comparative Analysis of the Environmental Benefits of Drone-Based Delivery Services in Urban and Rural Areas. *Sustainability*, 10(3), 888.
- Roca-Riu, M. & Menendez M. (2019, May 15 – 17). Logistic deliveries with Drones. State of the art of practice and research. *STRC, Swiss Transport Research Conference*, Monte Verità, Ascona, [https://www.strc.ch/2019/RocaRiu\\_Menendez.pdf](https://www.strc.ch/2019/RocaRiu_Menendez.pdf)
- Sah, B., Gupta, R. & Bani-Hani, D. (2021). Analysis of barriers to implement drone logistics. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 24(6), 531-550. 10.1080/13675567.2020.1782862
- Yen, J. Y. (1971). Finding the k-Shortest Loop Less Paths in a Network. *Management Science*, 17(11), 712–716.
- Zubin, I., van Arem, B., Wiegmans, B. & Van Duin, R. (2020). Using Drones in the Last-Mile Logistics Processes of Medical Product Delivery: A Feasible Case in Rotterdam. *Proceedings of the 99<sup>th</sup> Annual Meeting TRB*, 1-17.

# Estado emprendedor y plan nacional de desarrollo, 2022-2026: oportunidades para la seguridad y defensa colombiana

Fecha de recibido: 15 de junio 2023	Fecha de aprobado: 22 de agosto 2023
Reception date: June 15, 2023	Approval date: August 22, 2023
Data de recebimento: 15 de junho de 2023	Data de aprovação: 22 de agosto de 2023

## Javier Alberto Castrillón Riascos

<https://orcid.org/0000-0002-3504-0286>  
jcastrillonriascos@gmail.com

Doctorando en Estudios Políticos  
Oficial – Fuerza Aeroespacial Colombiana, Colombia  
Rol del investigador: teórico y escritura

PhD Candidate in Political Studies  
Officer - Colombian Aerospace Force, Colombia  
Researcher's role: theoretical and writing

Doutorando em Estudos Políticos  
Oficial - Força Aeroespacial Colombiana, Colombia  
Função do pesquisador: teórico e redação

## Carlos Andrés Suárez Amador

<https://orcid.org/0009-0005-7596-3981>  
carlos.suarez5@est.uexternado.edu.co

Doctorando en Estudios Políticos  
Teniente Coronel (R) – Policía Nacional, Colombia  
Rol del investigador: teórico y escritura

PhD Candidate in Political Studies  
Lieutenant Colonel (R) - National Police, Colombia  
Researcher's role: theoretical and writing

Doutorando em Estudos Políticos  
Tenente-coronel (R) - Polícia Nacional, Colombia  
Função do pesquisador: teórico e redação

**Cómo citar este artículo:** Castrillón Riascos, J. A., y Suárez Amador, C. A. (2023). Estado emprendedor y plan nacional de desarrollo, 2022-2026: oportunidades para la seguridad y defensa colombiana. *Ciencia y Poder Aéreo*, 19(1), 32-50. <https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaereo.800>



## Estado emprendedor y plan nacional de desarrollo, 2022-2026: oportunidades para la seguridad y defensa colombiana

## Entrepreneurial state and national development plan, 2002-2026: opportunities to the Colombian security and defense sector

## Estado empreendedor e plano de desenvolvimento nacional, 2002-2026: oportunidades para o setor de segurança e defesa colombiano

**Resumen:** La guía de la mano invisible de la economía sobre el desarrollo industrial no ha probado ser una opción con beneficios sociales y económicos claros. El caso de Colombia no es la excepción. ¿Cómo recuperar el rol del Estado colombiano como impulsor de dinámicas de crecimiento, innovación y desarrollo desde el sector seguridad y defensa? Este artículo argumenta que, desde la perspectiva de la economía misional de Mariana Mazzucato, es posible lograrlo. Modelo que es entendido por las naciones latinoamericanas al recordar la estrategia de industrialización por sustitución de importaciones (ISI) aplicada durante la segunda mitad del siglo xx. El estudio usa métodos cualitativos e historiográficos para analizar fuentes primarias y secundarias. El resultado muestra cómo el sector de seguridad y defensa colombiano puede impulsar el Estado emprendedor gracias a sus capacidades industriales y logros pasados. Opción arraigada en las posibilidades abiertas por el plan nacional de desarrollo (PND) y la política sectorial, 2022-2026.

**Palabras clave:** economía política; defensa; desarrollo económico; industrialización; seguridad del Estado.

**Abstract:** The economic invisible hand guide of industrial development has not proven to be an option with clear social and economic benefits. The case of Colombia is not an exception. How do we recover the role of the Colombian State as a growth, innovation, and development promoter from the security and defense sectors? This article argues that, from Mariana Mazzucato's missional economy perspective, it is possible to achieve it. A model that is understood by Latin-American nations as it remembers the import substitution industrialization strategy (ISI) applied during the second half of the 20th century. The study uses qualitative and historiographic methods to analyze primary and secondary sources. The results show how the Colombian defense and security sector can boost the entrepreneurial state thanks to its industrial capabilities and past achievements. Option rooted in the possibilities opened by the national development plan (PND) and the sectoral policy, 2022-2026.

**Keywords:** Political economy; defense; economic development; industrialization; state security.

**Resumo:** A orientação da mão invisível da economia sobre o desenvolvimento industrial não tem se mostrado uma opção com claros benefícios sociais e econômicos. O caso da Colômbia não é exceção. Como recuperar o papel do Estado colombiano como promotor de dinâmicas de crescimento, inovação e desenvolvimento do setor de segurança e defesa? Este artigo argumenta que, sob a ótica da economia missionária de Mariana Mazzucato, é possível alcançá-lo. Modelo que é entendido pelas nações latino-americanas ao relembrar a estratégia de industrialização por substituição de importações (ISI) aplicada durante a segunda metade do século xx. O estudo utiliza métodos qualitativos e historiográficos para analisar fontes primárias e secundárias. O resultado mostra como o setor de segurança e defesa colombiano pode promover o estado empreendedor graças às suas capacidades industriais e conquistas passadas. Opção alicerçada nas possibilidades abertas pelo plano nacional de desenvolvimento (PND) e pela política setorial, 2022-2026.

**Palavras chave:** economia política; defesa; desenvolvimento econômico; industrialização; segurança do Estado.

## Introducción

El rol del Estado en la economía depende del sistema de creencias con el que los tomadores de decisiones dan forma a las políticas públicas. Tal sistema es influido por un conjunto de ideas que circulan en el sistema internacional y que encuentran en los organismos multilaterales, gobiernos y comunidades epistémicas a legitimadores que convierten la teoría en praxis: el avance del neoliberalismo responde a ese proceso. Desde la década de los setenta, este ha mostrado cómo el Estado se ha replegado para dar lugar a un sector crediticio al que se le delegan tareas propias del sistema de bienestar, desmontando las responsabilidades de lo público para su gestión y ejercicio (Streck, 2013). En Latinoamérica, el repliegue del Estado se ha evidenciado adicionalmente, por su rol limitado como industrializador; lo que lo ha llevado en algunos casos (por ejemplo Chile) a ser un mero regulador económico, mientras que, en otros, se ha apartado de tal concepción para mantener ciertos controles sobre la industria y guiar el capitalismo (por ejemplo Brasil) (Bertóla y Ocampo, 2010; Bizberg, 2014). En el caso de Colombia, la apertura económica de principios de la década de los noventa redujo la participación de la industria en el PIB, pasando de un 23.2 % en 1975 a un 15.1 % (Vallejo, 2014); más tarde, hacia la primera década del 2000, se ubica entre un 9 % y un 12 % (Buen día *et al.*, 2016, p. 74).

Revertir esa relación nos lleva a preguntarnos: ¿Cómo recuperar el rol del Estado colombiano como impulsor de dinámicas de crecimiento, innovación y desarrollo desde el sector seguridad y defensa?; de esta manera el replantear las relaciones entre gobierno, academia, empresas públicas y privadas, junto a la consecución de medidas tendientes a la reindustrialización, para fortalecer la economía nacional, podría crear una oportunidad para la institucionalidad policial y castrense; esto con relación al emprendimiento, la innovación, la investigación y el desarrollo, aprovechando la experiencia y capacidades técnicas ya existentes. Paradigma expuesto en una propuesta conocida como economía misional, impulsada por

la economista Mariana Mazzucato y el UCL Institute for Innovation & Public Purpose (IIPP), asumido por el gobierno colombiano en el plan nacional de desarrollo (PND) *Colombia Potencia Mundial de la Vida, 2022-2026*. Iniciativa que, en esencia, reedita postulados del modelo de industrialización dirigida y de sustitución de importaciones (ISI).

El objetivo de este artículo es relacionar la propuesta de economía misional con las capacidades industriales del sector seguridad y defensa, como un motor de la economía estatal con referentes claros en el modelo ISI y el PND. Lo anterior, será elaborado en tres secciones: la primera, analizando los argumentos de Mariana Mazzucato sobre un enfoque misional ambicioso e inspirador para la economía estatal; la segunda, revisando lo desarrollado por el modelo ISI; y la tercera, a partir del estudio de caso colombiano en términos del PND 2022-2026 y de la política de seguridad y defensa nacional.

Este artículo hace uso de fuentes secundarias para estudiar las propuestas de economía política realizadas, junto a fuentes primarias gubernamentales – oficiales y discursivas–, para caracterizar las políticas públicas de industrialización en el sector de la seguridad y defensa nacional. Se aplicará una metodología cualitativa e historiográfica, junto a algunos elementos estadísticos sobre el comportamiento económico del modelo ISI.

## El Estado como emprendedor: enfoque económico misional

El desarrollo de objetivos ambiciosos, como lo fue el alunizaje durante el gobierno Kennedy, implicó la unión de gremios privados y del gobierno central en torno a un propósito que demandó gran innovación, riesgos y cooperación multisectorial. Esta proyección generó cambios organizacionales, de información y tecnológicos, aplicados, a la par y posteriormente, en industrias que llegaron a ser líderes en sus respectivas áreas (Boeing y Apple), al igual que en disciplinas que experimentaron adelantos vertiginosos

(alimentos, medicina, biología, microbiología, materiales, ingeniería, electrónica, ciencias aeroespaciales y computación).

Las consecuencias de este devenir no solo se sintieron en la invención de nuevos bienes y servicios, sino también en campos políticos y sociales que permitieron mejorar la situación de miles de personas que, hasta ese momento, sufrían la exclusión del sistema en su vida diaria. Este fue el caso de las mujeres afroamericanas, quienes con la implementación del *software* en la misión Apolo, por ejemplo, se prepararon como programadoras, asumiendo nuevas tareas que mejoraron sus condiciones de vida (Mazzucato, 2021).

La misión a la luna permitió establecer que el Estado es, en esencia, un motor de desarrollo cuya acción deviene en beneficios diversos y efectos *spillover*, sobre todo si existe una priorización del bien público sobre los rendimientos. En la actualidad, tópicos como la lucha contra el cambio climático, la eliminación de la pobreza, la salud pública o la educación, pueden motivar un sentido similar, misional y vinculante, de gran alcance para la sociedad (Mazzucato, 2014).

Sin embargo, según Mazzucato (2021), el pensamiento convencional observa al Estado, como un mero regulador y corrector de los mercados; situación generada por el avance de un Estado deudor y neoliberal, el cual, llevó a los sistemas de protección social a ser acogidos por un keynesianismo privado (toma de créditos por los trabajadores para suplir subvenciones sociales) (Streeck, 2013).

Desde los años ochenta, la doctrina neoliberal *Thatcher-Reagan* influenciaría profundamente a los gobiernos, haciéndolos ver como maquinarias que deben ser reducidas y que suprimen la innovación del sector privado, percepción que ha impedido la orientación misional de los gobiernos hacia la innovación. Un asunto similar es esgrimido por Streeck (2013), quien argumenta cómo la transformación neoliberal en la década de los setenta obligó al Estado a replegarse y financiar políticas públicas a partir de la deuda privada, limitando su intervención en el mercado. Subvertir esto implica repensar la actividad del gobierno, entendiendo que en el centro de esta y de las acciones que debe asumir (inversión directa, subsidios, impuestos y

regulaciones), se encuentra la relación Estado-capitalismo (Mazzucato, 2021).

Dicha relación reviste de gran importancia al ser la acción estatal una variable preponderante en las correcciones que se deben hacer a un sistema en crisis. Fenómeno que se deja sentir en la disfuncionalidad del capitalismo, que para Mazzucato (2021), radica en cuatro elementos: la especulación, la financiarización de los negocios en detrimento de la producción, la emergencia climática (sistema basado en combustibles fósiles) y los gobiernos lentos o ausentes; a la luz del capitalismo, tal como es concebido, los beneficios permanecen en un tutelaje privado, mientras que las pérdidas adquieren un carácter público, obligando a los gobiernos a establecer medidas de salvamento para evitar crisis mayores. Lo anterior también es expuesto por Streeck (2013) y Stiglitz (2012), quienes argumentan que las transformaciones neoliberales han tenido una tendencia favorable a la acumulación de las elites más acaudaladas, debiéndose a que las reglas económicas y políticas han sido moldeadas por ese mismo sector de la población en los Estados más desarrollados.

Asumir la misión de reformar la relación Estado-capitalismo, involucra dar al primero un rol de cofinanciamiento de la economía y los mercados, otorgándole responsabilidades de inversor de primer nivel; una obligación que debe compartir con la sociedad civil, empresas y sindicatos (Mazzucato, 2021). Parte de ello radica en romper con los mitos existentes sobre su nula idoneidad como emprendedor, por lo que para Mazzucato (2021), es importante superar cinco percepciones que crean la imagen de ineficiencia estatal para la economía y el sistema:

1. Las empresas crean valor y asumen el riesgo, mientras que los gobiernos aportan seguridad y facilitan el trabajo (no obstante, el Estado tiene un rol primordial en la creación de valor y en asumir riesgos financieros de propósitos ambiciosos).
2. El propósito del gobierno es corregir las fallas del mercado, teniendo en cuenta que los diversos actores, burócratas y políticos, se comportan de forma racional (según esto, el gobierno se debe

limitar a proveer los bienes que los privados no están interesados en producir).

3. El gobierno debe funcionar como una empresa (este mito asume que el sector público y privado son competidores).
4. La externalización ahorra dinero del presupuesto y reduce riesgos (en realidad, la externalización erosiona capacidades del sector público).
5. Los gobiernos no deben elegir ganadores (sin embargo, es imperativo que el Estado dirija la economía y estimule actividades lucrativas mediante selección, apoyos y subvenciones).

Miles (2012), ejemplifica este último punto con la experiencia del Reino Unido en el desarrollo de estrategias (*foresight*) para tender puentes a lo largo del sistema de innovación nacional, permitiendo establecer oportunidades que atiendan necesidades priorizadas. De esta forma, el gobierno fue más allá de la mera acción de dar forma a políticas, medidas e incentivos. Este mismo énfasis ha sido aplicado en Estados Unidos y Canadá como modelo de toma de decisiones y planeación de prospectiva tecnológica para los países (por ejemplo, Technology Foresight Programmes) (Miles, 2010).

En tal sentido, romper el estereotipo de un Estado poco eficiente como emprendedor, implica desarrollar una mirada misional. Opción que incorpora un pensamiento propositivo, para asumir los riesgos y costos de innovar, impulsar modelos organizacionales novedosos, promover colaboraciones intersectoriales dirigidas a generar *spillovers*, proyectar horizontes de largo plazo y presupuestos basados en resultados, así como establecer sociedades dinámicas entre el sector público y privado (Mazzucato, 2021). Actualmente, el cumplimiento de los objetivos del milenio de las Naciones Unidas, según Mazzucato (2021), tiene el carácter inspirador y ambicioso que se requiere, para formular cambios transversales en múltiples dimensiones (políticas, económicas y sociales).

Para seleccionar una misión, debe existir un parámetro guía: motivar múltiples soluciones. En tal sentido, el objetivo debe ser lo suficientemente amplio (la transición energética), para que al juntar proyectos e ideas diversas, se alcance la misión específica. De igual

modo, el sentido de misión cambia la forma de asociación público-privada y su modelo de financiación: debe existir coinversión, compartir el riesgo y las recompensas. Por otro lado, ambos sectores deben trabajar para la obtención de logros sociales; esto como primera obligación (Mazzucato, 2021). Un discurso similar se establece en torno a las economías sostenibles como parte de un esfuerzo conjunto que ha sido bautizado como *green keynesianism*, retomando la función del Estado como financiador de iniciativas públicas que activen la economía (Jacobs, 2012).

A dicha voluntad interinstitucional es posible articular organizaciones ciudadanas, quienes tendrían funciones específicas en la evaluación de propuestas, fiscalización de proyectos, estructuras de asesoría y en la linealidad que deben tener las misiones con los valores, necesidades y expectativas nacionales (Mazzucato, 2021). Propuesta que pone en el centro del debate la participación pública en el desarrollo de alternativas de producción, demanda que se enlaza con las propuestas heterodoxas de economía del decrecimiento que articulan a la sociedad a la gestión y vigilancia de los presupuestos estatales (Schmelzer *et al.*, 2022).

Pero así como el sentido misional del Estado debe cambiar, también debe hacerlo la política económica. Mazzucato (2021) propone siete pilares para redefinirla:

1. El sector privado, gobierno y sociedad deben crear valor juntos con base en un propósito público.
2. Los Estados no solo deben concentrarse en arreglar las fallas de mercado, sino, también, en cocrear y coformar mercados a partir de sus instrumentos (impuestos, regulaciones y políticas).
3. Las organizaciones y el cambio organizacional, al sustentarse en la cooperación y en esfuerzos de largo aliento, deben tener en cuenta la capacidad de asumir riesgos a partir de una financiación suficiente.
4. Se debe poner la economía al servicio de los objetivos sociales.
5. Combatir la inequidad, crear valor y dar forma a los mercados a partir de predistribución (trabajos dignos y propiedad colectiva), distribución y crecimiento inclusivo.

6. Diseñar contratos que distribuyan las cargas y ganancias de manera equilibrada entre lo público y lo privado.
7. La participación colectiva significa impulsar nuevas formas de colaboración en los procesos creadores (consenso social entre negocios, ciudadanos, grupos y gobiernos locales y centrales).

Combatir la inequidad también reviste promover el ingreso sustentado en el trabajo, más que aquel respaldado por la renta de la riqueza o el patrimonio personal, lo que invita a estimular mejores ingresos laborales como fuente de crecimiento de la economía moderna. Esto último es de suma importancia en la estructura del capitalismo contemporáneo que experimenta el progreso de los patrimonios gracias a los mercados financieros, mientras que la producción y los ingresos se estancan (Piketty, 2015).

Ciertamente, repensar el Estado como formador de mercados y guía de la industrialización, implica una nueva relación con las ideas ortodoxas de la economía neoliberal de las últimas tres décadas. Asunto que puede ser revelador si miramos experiencias como las de Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) en Estados Unidos, agencia gubernamental encargada de liderar proyectos de innovación para la defensa y cuyos desarrollos han servido de base para el trasegar de exitosas industrias privadas que terminan beneficiando la economía nacional. Las microusb, los microprocesadores, los asistentes virtuales como Siri y hasta el mismo internet, fueron generados por esta agencia y sirvieron para el desarrollo de los iPhone y del exitoso mercado que suplen (Mazzucato, 2014). Sin embargo, en Latinoamérica, la centralidad del estado como industrializador tiene un referente bastante arraigado en su pasado, conocido como el modelo ISI.

## El modelo ISI como antecesor de la economía misional

La transformación de la política económica con base al rol del Estado, de cierto modo, refleja el pensamiento

*cepalino* de industrialización por sustitución de importaciones o modelo ISI, que tuvo lugar en Latinoamérica previo a la década de los ochenta. Modelo en el cual el Estado garantizaba un sistema de protección social más amplio que el propuesto por el neoliberalismo, asumiendo a la par un rol estratégico para promover las industrias nacionales. Un ejemplo en este sentido fue la política de sustitución de importaciones que Carlos Lleras Restrepo (1966-1970) emprendió a través del Instituto de Fomento Industrial (IFI), siendo una muestra de ello el ensamblaje de automóviles con la instalación de la planta Sofasa Renault en Envigado (Valero, 2017). Asunto que reivindica la tesis de Miles (2010, 2012) y Mazzucato (2014) con respecto al IFI y las políticas de gobierno, al proyectar desde el establecimiento industrias estratégicas, a cambio de dejar la elección a las fuerzas del mercado.

Es así como en América Latina las trayectorias históricas, sociales y políticas, propias de un espacio poscolonial, han influido en las instituciones que caracterizan a los Estados. En este contexto, el capitalismo se define, en esencia, por la jerarquización social, variable que se traduce en las relaciones industriales, el sistema de bienestar y la orientación económica nacional (Bizberg, 2014).

De este modo, según Bizberg (2014), es posible identificar cuatro variantes de capitalismo en el continente: 1) el capitalismo orientado por el Estado y dirigido al mercado interno, brindando apoyo a sus exportadores (Brasil); 2) el capitalismo regulado por el Estado que subsidia al capital privado, dirigido al mercado externo (Chile); 3) el capitalismo desregulado subordinado al mercado externo, proyectando, *a posteriori*, un capitalismo de subcontratación internacional (México); 4) y finalmente los casos mixtos, de orden inestable y variante de acuerdo al liderazgo político y a la relación social existente (Argentina).

Tal categorización responde a lo propuesto por Boyer (2003), para quien las instituciones son la expresión de las relaciones y conflictos sociales, como también de sus acuerdos de cierre en un escenario público: las instituciones no son neutrales, beneficiando en su proceder algún tipo de actor social en los costos de transacción. Los costos que esto produce

han decantado en la creación de firmas que minimizan dichas fallas de mercado en términos de información, negociación, monitoreo y vigilancia creíble de lo acordado (Williamson, 1985); sin embargo, emergen factores idiosincráticos que no son transables y que terminan influyendo en ciertos intercambios, como lo son aquellos relacionados con el capital humano en sus múltiples dimensiones (experiencia, principios y valores, lenguaje, confianza, etc.) (Williamson, 1979). Es en este contexto que las coaliciones políticas dominantes y las organizaciones sociales, así como su influencia política al entrar en conflicto con los sectores patronales y del Estado, terminan dando forma a los sistemas de protección social (SPS) -conocido asimismo como *rapport* salarial-, pero también a las regulaciones laborales, regímenes monetarios, financieros, a la forma del Estado y a su relación con los medios de producción.

Ahora bien, al ser observado el componente teórico de lo propuesto por las variedades de capitalismo, es posible establecer que, en términos del modelo de producción, existen variedades de capitalismo en Latinoamérica. Estas relaciones se ven influenciadas por fuerzas externas, conflictos sociales y la historia política del país (Chavance, 2009).

Para Bertóla y Ocampo (2010), el desempeño económico depende de una suma de factores, como lo son las relaciones sociales, culturales y políticas, así como de la geografía, distribución de poder, riqueza, y la fortaleza y rol de las élites en los procesos de formación estatal. En el caso de algunos países latinoamericanos que se han convertido en milagros económicos, tales factores se ven reflejados en fases de alto desarrollo, acercándolos a los países occidentales, como los casos de Argentina antes de la I Guerra Mundial, de Venezuela, entre 1920-1960, y de Brasil y México antes de la crisis de deuda de 1980. Sin embargo, a estos momentos de milagro, le han seguido crisis profundas, alejándolos de las tendencias de desarrollo de boyantes estados occidentales. Asunto que contrasta con lo esgrimido por Bizberg (2014), quien establece cómo estas crisis llevaron a los Estados a desarrollar enfoques propios de desarrollo según los acuerdos institucionales que emergieron tras dichas etapas.

A ello se une la frecuencia e intensidad de las crisis financieras (crisis de deuda externa, balanza de pagos y bancarias), así como la convergencia de ciclos negativos de comercio y flujo de capitales (bloqueo de exportaciones por situaciones de crisis globales), lo que genera, inevitablemente, contracciones en el comercio que impactan a los Estados y sus balanzas comerciales (Bertóla y Ocampo, 2010). Crisis que para Streeck (2013) y Rodrick (2011), debe ser direccionado por un poderoso sector público que instaure medidas contracíclicas y barreras comerciales para proteger la producción y mercados internos.

Dichas particularidades, encuentran su epítome en el auge y caída del modelo ISI, que tuvo lugar en el periodo que va desde la Gran Depresión de 1930 hasta finales de los setenta. Dicho modelo abogaba por la sustitución de importaciones, políticas de intervencionismo estatal, protección a la producción nacional y por la industrialización e integración regional. Iniciativas inspiradas en propuestas teóricas conocidas como economía para el desarrollo, elaboradas en la década de los treinta por el economista Raúl Prebisch y la Cepal, siendo apoyadas en sus albores por instituciones internacionales como el Banco Mundial (BM) y el Fondo Monetario Internacional (FMI) (Bertóla y Ocampo, 2010).

El periodo ISI no solo implicó la sustitución de importaciones, además, llevó a un mayor intervencionismo estatal en lo económico y social, y a la introducción de mecanismos de impulso a las exportaciones desde mediados de la década de los sesenta. En tal sentido, surge un modelo mixto que combinó tres variables: la sustitución de importaciones, la promoción de exportaciones y la integración regional. La modernización agrícola con políticas similares a las de industrialización, fue otro elemento a destacar en esta etapa (Bertóla y Ocampo, 2010; Bizberg, 2014). En Colombia, este periodo fue liderado por el Banco de la República que, en su etapa temprana, tuvo funciones de banca de desarrollo estatal (Kalmanovitz y Avella, 1998).

Pese a estos avances, la década de los ochenta y la crisis crediticia latinoamericana, presionan una serie de transformaciones que dan por cerrado el proceso ISI y abren el campo a la privatización, a la apertura comercial y al repliegue del Estado. Asimismo, el modelo

entraría en crisis por la falta de divisas e inversiones, al igual que por cuenta del lánguido ahorro estatal, lo que llevó a la región a crecer a costa de un déficit comercial continuo (Bertóla y Ocampo, 2010). Según Boyer (2003), en el periodo de 1945-1979, una fracción del capital industrial y asalariado se convierte en dominante, lo que lleva a un crecimiento del estado fiscal junto al avance del sector financiero, a la par de los cambios de paradigmas y la crisis de deuda, dando lugar al estado deudor que limita las competencias de la banca central.

De acuerdo con Bizberg (2014), hasta finales de la década de los setenta los Estados latinoamericanos, en especial, México, Brasil, Chile y Argentina, tuvieron trayectorias similares en materia de producción, industrialización e inversión pública. Una vez termina el modelo ISI, se desarrollan diferentes tipos de capitalismo, dependiendo de las conclusiones del conflicto social que ello generó.

En este ambiente, se abre la puerta para la aplicación de reformas estructurales profundas, tendientes a la imposición de mercados autorregulados a través del consenso de Washington. No obstante, su aplicación es divergente a lo largo de la región, de acuerdo con las trayectorias que ya habían asumido los Estados de manera particular, a finales de la década de los setenta y en la década de los ochenta: en Argentina, Chile y Perú, se aplica de forma agresiva, mientras que en Brasil, Costa Rica, Colombia y México, se da de forma cautelosa y gradual dada la oposición social que generó (Bertóla y Ocampo, 2010).

En el caso de Colombia, Buendía *et al.* (2016) señalan que la apertura económica gavirista abrió una etapa de desindustrialización que generó la una “enfermedad holandesa”, al incrementar la dependencia del PIB con respecto a sectores minero-energéticos. En este sentido, la Asociación Nacional de Instituciones Financieras (ANIF), señala que el país se ha desindustrializado gradualmente desde 1975, dada la baja participación industrial en el PIB: en la década de los setenta el rubro industrial correspondía a un 24 %, para el 2016 era de un 12 % y para el 2021, según la Cepal (2019), correspondía a un 11.15 %.

Ahora bien, frente al caso a evaluar, la política económica se encargó de aplicar el paradigma neoliberal

que se sustenta en la economía clásica y neoclásica, privilegiando la fuerza de la economía, más aún, en un contexto latinoamericano de apertura y donde se aplicaba el consenso de Washington (Giraldo, 2010). Para el logro de tal objetivo se incentivó una mayor división del trabajo a partir del TLC con Estados Unidos, suscrito en el 2006 y que entra en vigencia solo hasta el 2012 (Ministerio de Comercio, s.f.). Proyecto al cual se sumó una reforma que flexibilizó garantías laborales, como el pago de horas extras y nocturnas (BBC, 2010), afectando los estándares vitales de los trabajadores y el mercado formal de empleo. Ajustes estructurales que, si bien fueron objeto de un debate nacional, respondían a demandas realizadas por el FMI, en línea con el interés gubernamental de tener opciones de crédito internacional para el país (Giraldo, 2010).

En tal sentido, es llamativa la firma de los acuerdos de 1999, 2002 y 2005 entre Colombia y el FMI, los cuales solicitaban el compromiso del Estado con los principios de liberalización de los mercados de bienes y servicios, eliminación gradual de subsidios a la producción local, de aranceles sobre la producción extranjera y a la utilización de medidas proteccionistas (Casas, 2017). Ello deja en Colombia un capitalismo regulado por el estado con vocación externa, anclada a la comercialización de materias primas tendientes a la desindustrialización.

De manera general, si se observan las tasas de crecimiento del modelo ISI desde principios de la década de los sesenta en Latinoamérica, comparativamente se denota un rendimiento superior con respecto a la avanzada neoliberal que redujo las capacidades industriales del continente. Lo que permite establecer que el modelo regulado desde el Estado era más efectivo en el logro de un crecimiento sostenido, poniéndolo como principal actor en la política de emprendimiento industrial, tal como se muestra en la figura 1. En el caso colombiano, el promedio de la tasa de crecimiento del PIB entre 1961 y 1973, es de 5.05 %, de 1974 a 1990 es de 4.04 %, y de 1991 a 2021 es de 3.3 %. Para Latinoamérica, el promedio de la tasa de crecimiento del PIB entre 1961 y 1973 es de 5.9 %, de 1974 a 1990 es de 3.14 %, y de 1991 a 2021 es de 2.56 % (ver figura 1) (Banco Mundial, 2023).



Figura 1. Tasa de crecimiento PIB comparada América Latina, Colombia 1961-2021  
Fuente: elaboración propia, con base en datos del Banco Mundial (2023).

Lo expuesto permite entrever cómo la economía misional durante la época ISI en Latinoamérica, con un protagonismo importante para el Estado, impulsó logros económicos importantes para la región, en términos de capacidades industriales y crecimiento del PIB. Asunto que se vio limitado por la implementación de modelos neoliberales que se empezaron a abrir campo desde finales de la década del setenta, para consolidarse en la década de los noventa. Hecho que adquirió matices variados al entrar en contacto con instituciones soberanas, sistemas de contención social y trayectorias históricas particulares de los regímenes políticos.

## Colombia y la economía misional en el PND 2022-2026: una oportunidad para el emprendimiento en el sector seguridad y defensa

En el caso del actual gobierno colombiano, el retomar una senda industrializadora ha pasado a ser parte del sistema de creencias que inspiran el PND 2023-2026. En este sentido, los postulados de Mazzucato (2021), más allá de lo especificado en el PND, han sido revisitados

en diversos escenarios como en la posesión presidencial de agosto del 2022. Elementos que también han quedado esbozados en la Política de Seguridad, Defensa y Convivencia Ciudadana 2022-2026, articulando el uso de las capacidades duales (de uso militar y civil) para el encadenamiento productivo de la industria de defensa (Ministerio de Defensa, 2023).

La propuesta misional de Mazzucato (2021) ha vinculado el sector gubernamental, privado y bancario de Colombia, evidenciándose en una reunión con la economista el 20 de octubre de 2022 en la Casa de Nariño. Allí se planteó una mirada misional con respecto al agro colombiano, donde se vincularían la banca, Estado y campesinos, en torno a proyectos productivos de escala industrial y tecnológica (Presidencia de la República, 2022).

Para Mazzucato, en su análisis sobre Colombia, el equivalente de la misión a la luna para el país se refiere a la transición gradual y sostenida hacia una economía y sistemas de transporte carbono-neutro, que vincule lo público y privado en torno a la innovación, estimulando de paso el sector productivo y el empleo (Rueda, 2022).

El modelo de economía misional es asumido no solo en el PND, de igual modo, es adoptado por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación, que ha puesto en práctica una política orientada por misiones

a partir de definir grandes desafíos o retos de la agenda política. En este sentido, dicho ministerio definió varias misiones o programas estratégicos: bioeconomía, ecosistemas naturales, territorios sostenibles, derecho a la alimentación, energía eficiente, sostenible y asequible, soberanía sanitaria y bienestar social, ciencia para la paz y ciudadanía (Ministerio de Ciencia, 2022).

Tales líneas de acción, al ser vistas en perspectiva, se articulan a objetivos igualmente ambiciosos dentro del PND, que podrían asimilarse a misiones que vinculan transversalmente al sector público y privado como emprendedores. Dentro de ellos, es posible destacar el impulso que se desea dar a proyectos de ciencia, tecnología e innovación, a partir de la alianza estratégica entre instituciones de orden público, privado, la academia y gremios productivos nacionales.

En tal sentido, el PND plantea el fortalecimiento del Grupo Social y Empresarial del Sector Defensa (GSED), contribuyendo, de este modo, al desarrollo de la industria y capacidades astilleras, aeroespaciales, metalmecánicas, de comunicaciones y transporte del país. En línea con esto, se propone, a manera de misión, “incrementar la presencia del Estado en todo el territorio nacional, mejorar la conectividad y promover la competitividad regional” (Departamento Nacional de Planeación - DNP, 2023, p. 108). Asunto que pone énfasis en el fortalecimiento de las capacidades duales de la fuerza pública y, en especial, del alcance

territorial a través del Servicio Aéreo a Territorios Nacionales (Satena).

El caso de Suecia es llamativo como paralelo: el gobierno sueco impulsó la especialización tecnológica, la economía del conocimiento y el impulso de una mano de obra calificada, priorizando el desarrollo de sus industrias en torno a las comunicaciones, la construcción naval, mecánica, eléctrica y electrónica. Ímpetu que vino de la mano en 1998 con un apolítica pública que favorecía una sociedad de la información; casos como Volvo, Ericsson y Saab demuestran el potencial de este modelo (Aktouf, 2009). De hecho, Saab nace en la década de los treinta como un esfuerzo estatal para crear una fuerza aérea basada en la industria doméstica; iniciativa que recibe un mayor impulso durante la Guerra Fría con el fortalecimiento del poder aéreo sueco por cuenta de innovaciones como las aeronaves Draken, Viggen y Gripen (Saab, s.f.).

El logro de los objetivos del PND relacionados con el sector seguridad y defensa, encuentran en el primer año de gobierno un presupuesto sostenido que, incluso, presenta un leve incremento de las apropiaciones del presupuesto general de la nación (PGN), pasando de \$33.5 billones en 2019, \$35.4 billones en 2020, \$38.8 billones en 2021, \$42.3 billones en 2022 y a \$44.1 billones de acuerdo con la ejecución presupuestal a 30 de junio de 2023. Lo expuesto, es visible en la figura 2, de acuerdo a los datos disponibles en el Ministerio de Hacienda y Crédito Público(2023).

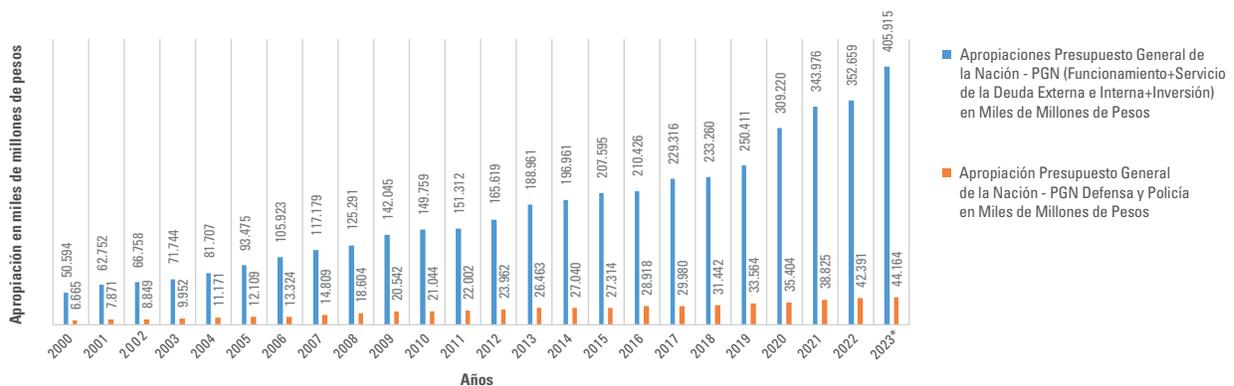


Figura 2. Apropiación PGN frente a la Apropiación Defensa y Policía 2000-2023

\*Ejecución a 30 de junio de 2023.

Fuente: elaboración propia, con base en datos de la Dirección General del Presupuesto Público Nacional - Subdirección de Análisis y Consolidación - Ministerio de Hacienda y Crédito Público.

La articulación multisectorial que propone el PND busca, al mismo tiempo, crear una gobernanza e institucionalidad del sector espacial, dirigida a la implementación de estrategias de desarrollo productivo en esta área, teniendo en cuenta la “industria, los procesos de ciencia, tecnología e innovación y los instrumentos de cooperación internacional” (DNP, 2023, p. 151). Elementos de suma relevancia para el avance de un sector que tiene efectos *spillover* y cuya regulación está en curso en el Congreso de la República a través del proyecto de ley n.º 296 de 2022, “por medio de la cual se adoptan medidas para garantizar la defensa e integridad territorial en el ámbito espacial y se dictan otras disposiciones”.

A lo expuesto, se une una misión amplia que cohesiona diversos intereses: la “reindustrialización para la sostenibilidad, el desarrollo económico y social”. Política que promete proveer bienes públicos transversales unidos al sector productivo y que se encuentra enfocada, de acuerdo con el DNP (2023), en cuatro dimensiones:

1. Iniciativas sostenibles y basadas en el conocimiento (bioeconomía, transición energética, movilidad sostenible, economía circular, vacunas y medicamentos, agroindustria y derecho a la alimentación).
2. Innovaciones institucionales para una mejor articulación privada, pública y popular, e instrumentos de apoyo a procesos regionales de desarrollo (producción colectiva, transferencia de conocimiento y tecnología).
3. Diversificar la matriz exportadora y productiva.
4. Reconocer las diferencias y heterogeneidad productiva y regional del país y oportunidades de especialización productiva.

El vincular la sostenibilidad, la diversificación productiva y la creación de conocimiento, implica articular las diversas capacidades del Estado, más aún, de sectores que han venido desarrollando estas labores a la par de su misión constitucional. Tal es el caso de la fuerza pública, que impulsa iniciativas científicas que se encuentran articuladas a los intereses nacionales.

Las expediciones antárticas, apoyadas por la Armada Nacional y la Fuerza Aeroespacial Colombiana (Méndez, 2023).

Los objetivos del PND, de igual modo, se transmiten a la política de seguridad y defensa nacional 2022-2026. En tal sentido, es importante enfatizar que el concepto de seguridad humana, como eje central de su proyección, se articula a un sentido multidimensional del accionar conjunto, coordinado e interagencial, desde el cual es posible el desarrollo de propósitos misionales que generen industrias y capacidades, como bien lo es la exportación de seguridad. De esta manera se establecen preocupaciones en dimensiones que, claramente, demandarán innovaciones para su direccionamiento:

Colombia tiene una posición bioceánica y un posicionamiento estratégico en el continente, por lo que demanda una estrategia de seguridad nacional que preserve y proteja el territorio, los límites fluviales, marítimos, costeros e insulares, aéreos y espaciales de manera integral... A los retos tradicionales en la seguridad y defensa, se suma el generado por los nuevos conceptos que amplían los componentes de la soberanía, asociadas a posibles injerencias de nacionales o extranjeros, información sesgada, fraudes, robos de identidad, entre otros aspectos relativos al cibercrimen, que afectan a los ciudadanos y a la sociedad. Esto demanda la construcción y el fortalecimiento de nuevas capacidades en seguridad y defensa en el ciberespacio. (Ministerio de Defensa, 2023, pp. 36-37)

Por otro lado, la política de seguridad y defensa plantea de manera reiterativa, el uso de tecnologías de la información y analítica de datos para apoyar los procesos institucionales de lucha contra la criminalidad. Asunto que implica un enfoque vinculado a capacidades ciberespaciales en el área de inteligencia y contrainteligencia, que requiere una profundidad tecnológica y del conocimiento particular. En este sentido, la política de seguridad y defensa busca:

Fortalecer la función de inteligencia y contrainteligencia [a través de] las capacidades de planeación,

análisis, recolección, procesamiento y difusión, así como la movilidad, infraestructura, tecnologías de la información, analítica de datos, inteligencia artificial, seguridad de comunicaciones [y] talento humano. (Mindefensa, 2023, p. 51)

Ahora bien, al observar todo lo expuesto, es imperativo destacar las formas en que las diferentes instituciones de la fuerza pública desarrollan estos enfoques, muchos de los cuales, desde la perspectiva de la industrialización y la generación de capacidades de Estado, ya poseían referentes.

En tal sentido, Colombia busca reconstruir o robustecer capacidades aún existentes y propias del sector seguridad y defensa, muchas de ellas orientadas desde la industria militar como la misma Cotecmar y sus antecesoras, o desde la Corporación para la Industria Aeronáutica Colombiana (CIAC). Esta última, compañía que fabricaba en su momento aeronaves para labores de fumigación y transporte, en alianza con la estadounidense Piper Aircraft. Iniciativa que llegó incluso a tener presencia en los mercados andinos de Sudamérica, siendo objeto del respaldo estatal a través de la extinta IFI y de la Industria Militar Colombiana S. A. (Villalobos, 1993).

Hoy, la CIAC desarrolla aeronaves remotamente tripuladas (ART), aeronaves de instrucción primaria tipo T-90 Calima y ofrece servicios de mantenimiento a la industria aeronáutica comercial, además de aquellos que brinda al sector público y a Estados aliados. Adicional a los certificados con los que cuenta por parte de Airbus Defence and Space y Embraer, para realizar mantenimientos a aeronaves C-295, CN-235, A-320, A-319 y T-27 Tucano –CIAC está habilitada para modernizar aeronaves T-27 dado un acuerdo de transferencia tecnológica y de conocimientos con Embraer–, la CIAC se prepara para “exportar bienes y servicios tales como los aviones Calima T-90, partes aeronáuticas en metal y materiales compuestos, sistemas UAV, blindajes aeronáuticos y cableados eléctricos” (CIAC, 2023, párr. 31), de acuerdo con su plan estratégico institucional 2030.

Por otro lado, se encuentra el programa de nanosatélites, desarrollado entre la Fuerza Aeroespacial

Colombiana, Ecopetrol, la Sociedad Académica Colombiana y conglomerados privados nacionales y extranjeros, con el fin de avanzar en la recolección de datos para estudios medioambientales, protección de activos críticos y planeación urbana y rural, a través de la observación espacial facilitada por estos pequeños satélites (Portafolio, 2023b).

A este devenir se suma Satena, organización cuyo propósito se encuentra encaminado al fortalecimiento del estado de derecho, propósito inscrito en su misión originaria de la década del sesenta, el cual lo definía como “un servicio especial de transporte aéreo en beneficio de las regiones subdesarrolladas del país, con el objeto de colaborar en las campañas asistenciales, docentes, de incremento agrícola y pecuario” (Presidencia de la República, 1962, párr. 6). Con esta misión en mente, Satena empieza sus operaciones a bordo de aeronaves C-47, Catalina, C-54, PBY y Beaver, desplegando inicialmente vuelos a Arauca, al sur del país y a nacientes comunidades que crecían en las riveras del Inírida, el Vaupés y el Apaporis (Villalobos, 1993).

Hoy Satena cruza fronteras, abre nuevas rutas aéreas, promueve la integración y se proyecta como pilar de la estrategia de gobierno para el sector público aeronáutico y para las economías locales basadas en el turismo. Actualmente, el gobierno nacional proyecta una inversión de 20 millones de dólares anuales para la aerolínea del estado, vinculando rutas internacionales a Perú y Ecuador, adicionales a la ya existente Bogotá-Caracas (Torres, 2023).

Un ejemplo adicional fue el desarrollo de pintura aeronáutica para las aeronaves de la fuerza pública entre el Centro de Desarrollo Tecnológico de la Fuerza Aeroespacial Colombiana (CETAD) del Comando Aéreo de Transporte n.º 5 y la Compañía Global de Pinturas S. A. (Pintuco), fue una combinación de esfuerzos que logró implementar esta innovación para las aeronaves AH y UH 60. (Rueda, 2021).

Otro avance en el desarrollo de la industria militar que contribuye al desarrollo del sector de seguridad y defensa es la Corporación de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo de la Industria Naval Marítima y Fluvial (Cotecmar), cuya historia reciente se remonta a julio del 2000, cuando el Ministerio de Defensa y la Armada

Nacional deciden acogerse a la legislación de ciencia y tecnología, lo cual les lleva a asociarse con particulares para desarrollar actividades científicas y tecnológicas. Es así como se crea esta entidad sin ánimo de lucro, conformada por el Ministerio de Defensa, la Armada Nacional, la Universidad Nacional de Colombia, la Universidad Tecnológica de Bolívar y la Escuela de Ingeniería Julio Garavito (Porrás, 2019).

Cotecmar viene teniendo un proceso muy interesante frente a su modelo de negocios. Lo anterior en atención a las variaciones de presupuesto que ha tenido la Armada Nacional de Colombia, su principal cliente a partir de un escenario posconflicto. Esto llevó a la corporación a explorar nuevos nichos de mercado y a la ejecución de proyectos con grandes astilleros internacionales, con el fin de mejorar productos y servicios, así como sus procesos productivos, sin embargo:

El elemento diferenciador de Cotecmar que aporta valor agregado a sus clientes es la innovación, los procesos de gestión del conocimiento y transferencia tecnológica ya sea implícita o explícitamente en la ejecución de proyectos obedecen a su Modelo de Gestión basado en el fomento de las Actividades de Ciencia, Tecnología e Innovación (ACTI) y la inversión en Investigación, Desarrollo e Innovación (I+D+i), estas afirmaciones se sustentan con cifras arrojadas por un estudio realizado por el Instituto de Estudios para el Desarrollo Experimental (IDE) para Cotecmar en el año 2014 en el que se evidencia el alto impacto económico, social y tecnológico que ha generado la Corporación no solo en el sector de Construcción y Reparación de Buques (CRB) sino también en el sector de Investigación y Desarrollo Experimental (IDE), las cifras indican que Cotecmar es la empresa líder en Colombia en cuanto a participación en el mercado se refiere, tanto en el sector de IDE como en el de CRB, con una participación promedio de 78 % y 79 % entre 2001 y 2014 respectivamente, siendo la empresa que más aporta a los ingresos operacionales de ambos sectores. (Lara y Ortega, 2019, pp. 15-16)

Un evento como Colombiamar 2023, realizado este año por Cotecmar, la Armada Nacional y el

Instituto Panamericano de Ingeniería Naval, muestra cómo esta corporación se ha convertido en un referente en la región en la industria naval, marítima y fluvial, desde los ámbitos académico, científico, tecnológico y comercial. El balance de este evento reportó las siguientes cifras: 3433 visitantes, 81 empresas expositoras, 30 ponencias científicas, 25 reuniones bilaterales con otras marinas, un total en ventas de USD 107.850.000 en 116 negocios concretados y la firma de cinco acuerdos con las empresas Ghenova, Frizonia, Cormagdalena, Sisdef y TNO (Cotecmar, 2023).

Actualmente Cotecmar se fundamenta en la ley 29 de 1990 (disposiciones para el fomento de la investigación científica y el desarrollo tecnológico), el decreto ley 393 de 1991 (normas sobre asociación para actividades científicas y tecnológicas y proyectos de investigación, entre otras), ley 1286 de 2009 (ley de ciencia y tecnología); reconociéndose como “una corporación de ciencia y tecnología sin ánimo de lucro, con naturaleza jurídica de entidad descentralizada indirecta vinculada al Ministerio de Defensa Nacional, con régimen jurídico de derecho privado y presupuesto propio” (Cotecmar, 2021, párr. 6). Su trabajo, en asociación con la Universidad Tecnológica de Bolívar, la Universidad Nacional y la Universidad del Norte en investigación aplicada, le permite tener un amplio portafolio de servicios que incluye:

1. Construcción de buques militares y guardacostas, buques de trabajo y buques de asistencia social y uso dual.
2. Reparación y modernización, ofreciendo trabajos mecánicos, soldadura y ensayos, *blasting* y pintura, electricidad y motores, electrónica, habitabilidad.
3. Ciencia y tecnología, desde la gestión de proyectos I+D, programas de gestión tecnológica, gestión de la innovación, programas de investigación y el comité CYT.
4. Diseño e ingeniería, con estudios de factibilidad, diseño de buques y artefactos navales, ingeniería marina, ingeniería de producto, consultoría especializada, investigación y desarrollo y experiencias en entornos virtuales.

5. Servicios industriales, que incluyen dentro de sus servicios al departamento de inspección y ensayos, automatización y control (AyD), metalmecánica y el taller de motores de combustión interna diésel (Cotecmar, 2021).

Dentro de la industria militar una de sus entidades más reconocidas es la Industria Militar Colombiana (Indumil), la cual tiene sus raíces hacia el año de 1908, cuando el presidente Rafael Reyes Prieto decide la creación de lo que sería el Taller Nacional de Artes Mecánicas, el cual dependería del Ministerio de Guerra. Actualmente y como se establece en el acuerdo 439 del 2001, “la industria militar es una empresa industrial y comercial de estado con personería jurídica, capital independiente, autonomía administrativa y financiera y vinculada al Ministerio de Defensa” (Pérez, 2013, pp. 17-20).

La producción de armamento, municiones y explosivos no solo ayuda a la consolidación de los intereses nacionales en temas de seguridad, sino también es un negocio rentable en el mercado de la defensa, como se evidencia en el trato realizado con Guatemala en el 2019, donde se concretó la venta de 8000 fusiles Galil SAR Córdova 13, calibre 5,56x45 milímetros, por un valor de USD 10.000.000, destinados a enfrentar el crimen transnacional en este país. De igual manera esta industria recibió USD 22.4 millones en el 2018, por la venta de bombas MK 81 de 250 libras y MK 82 de 500 libras a Emiratos Árabes Unidos, las cuales serían utilizadas principalmente en la lucha contra ISIS (Semana, 2019). Ciertamente, el crecimiento de las necesidades en materia de seguridad en entornos inestables, al igual que a la hora de enfrentar el crimen transnacional a partir del control de los dominios aéreos, terrestre, marítimo, espacial y ciberespacial, crean oportunidades para la industria colombiana, sustentada en experiencia, costos de producción y, en algunos casos, proximidad regional.

Indumil cuenta hoy con un portafolio de servicios amplio, que al igual que Cotecmar ha ido cambiando debido a la menor inversión que hacen hoy las fuerzas militares en atención a las políticas del posconflicto. Este portafolio además de buscar nuevos mercados

internacionales también fortalece el mercado interno, sobre todo en el tema de explosivos, los cuales son utilizados para obras civiles, sísmicas y actividades de minería. Dentro de los servicios para destacar se pueden encontrar los siguientes:

1. Producción y venta de armas y municiones importadas y por supuesto de fabricación nacional.
2. Elemento para desminado humanitario.
3. Explosivos y accesorios de voladura.
4. Servicios de metalmecánica industrial.
5. Productos militares.
6. Laboratorios balísticos, optrónicos, físicos y químicos.
7. Línea hospitalaria, la cual ha desarrollado elementos como ventiladores para salas de cuidados intensivos en cooperación con la Universidad de la Sabana (Indumil, 2023).

En cuanto a la Policía Nacional, sus avances en ciencia y tecnología están basados en la resolución 02078 del 01 de septiembre del 2020, que expide el “Manual de Ciencia, Tecnología e Innovación de la Policía Nacional de Colombia”, documento que hace parte de la visión de este organismo al 2030, y que reglamenta el “Sistema Institucional de Ciencia y Tecnología e Innovación”, dirigido a fortalecer la cultura investigativa y la generación de conocimiento científico y tecnológico, como aporte a la actividad policial.

Los avances en ciencia y tecnología hacen parte de la misión de los organismos de seguridad y agencias encargadas de hacer cumplir la ley, debido a que:

Los cuerpos policiales se enfrentan a nuevas modalidades de crimen que hace menos de un lustro no existían. Su principal reto es el cómo utilizar la tecnología como su principal aliado para prevenir y combatir el delito en su territorio y dar una respuesta rápida y efectiva a los problemas de la criminalidad, demanda que se hace cada vez más frecuente por parte de las personas habitantes de estas regiones. (Villalobos, 2020, p. 81)

Por otro lado, de acuerdo con datos de la Superintendencia de Industria y Comercio, para el año 2018

la Dirección Nacional de Escuelas de la Policía Nacional de Colombia, ocuparía el puesto 13 en el Ranking de Solicitudes de Patentes de Universidades 2017, con un total de 5 solicitudes realizadas por la entidad (Superintendencia de Industria y Comercio, 2018).

De igual manera, para el año 2021 la Policía Nacional obtendría 13 patentes, 1 registro de diseño industrial y 1 registro de marca (Acta 035 Rendición de Cuentas de la Dirección Nacional de Escuelas, 2021). Adicionalmente, esta institución cuenta con el Fondo Rotatorio de la Policía Nacional, el cual lleva a cabo líneas industriales a través de su Fábrica de Confecciones, empleando un promedio de 1200 personas y produciendo más de 3000 uniformes al día, incluyendo los de calidad facón, destinados a la Armada Nacional de Colombia (Fondo Rotatorio de la Policía, 2018).

## Conclusiones

La economía misional planteada por Mariana Mazzucato (2014, 2021), se presenta como una propuesta que pone en el centro del proceso económico y de formación del capitalismo y los mercados al Estado. Es una alternativa que debate los mitos sobre la inoperancia y lentitud del Estado, demostrando cómo las industrias y proyectos que tuvieron un liderazgo decidido desde el gobierno crearon un conjunto de innovaciones que beneficiaron toda una serie de bienes y mercados que sumaron riqueza, conocimiento y, aún más importante, bienestar social. El modelo de orden público-privado fue capaz de llevar al hombre a la luna en la presidencia de John F. Kennedy, desatando todo un conjunto de creaciones que años más tarde hacen parte de las tecnologías cotidianas.

Los problemas actuales, como el calentamiento global, la necesidad de tecnologías carbono-neutro, entre otras, proyectan un sentido amplio y misional que, según Mazzucato, pueden articular sectores diversos en un círculo de ingenio que permita catapultar a la economía. Con certeza hay riesgos, pero también ganancias que deben ser compartidas entre lo público y lo privado; no obstante, definidas por un director

claro: el Estado emprendedor. Es posible encontrar ejemplos en este aspecto, como Suecia o Japón. Frente a este último caso, Aktouf (2009, p. 337) comenta:

Una de las principales fuerzas de Japón es la admirable administración de su economía que se apoya en un sistema de relaciones Estado-industria... Existe en Japón una burocracia enormemente calificada, muy orientada a los negocios, que mantiene relaciones complejas con la gran industria.

A ello, se suma ejemplos como el de Corea del Sur, donde la administración pública como organizador del Estado, impulsó la industria nacional, aprovechando una base agrícola, la cultura confucianista respecto al trabajo, la solidaridad social y la creación de conocimiento. Proceso asimilable al de Alemania, donde las tecnologías renovables, la protección ambiental y la industria basada en un capital humano altamente calificado, junto a la cogestión y concertación entre propietarios y fuerza laboral, se han traducido en progreso (Aktouf, 2009). Un caso similar se da en China, con una suerte de keynesianismo verde impulsado por el Estado y que se concentra en la creación de bienes de alto valor agregado dirigidos a la sostenibilidad: hoy, es el líder mundial en la exportación de tecnologías solares y eólicas, capacidad que es resultado de una inversión y planeación estatal en este tipo de tendencias (Jacobs, 2012).

El caso de Estados Unidos es igualmente llamativo. Fue precisamente la industria militar con DARPA quien desarrolló avances como el internet y los microprocesadores; por su parte el financiamiento del Departamento de Defensa, junto a la Armada y el Ejército, desarrollaron el sistema GPS, las baterías de litio y las pantallas de cristal líquido (Mazzucato, 2016). El presupuesto de defensa del Pentágono para el 2023, priorizan inversiones en innovación, modernización y capacidad industrial, especialmente enfocadas en “inteligencia artificial, microelectrónica, 5G y en el programa de Análisis de la Base Industrial (IBAS) para fortalecer la cadena logística del sistema de defensa nacional” (International Institute of Strategic Studies, 2023, p. 26).

El Estado emprendedor debe coformar mercados e impulsar un nuevo relacionamiento con el capitalismo, teniendo como propósito, el beneficio social, por encima de los beneficios del mercado. La etapa ISI presentó ciclos positivos en este sentido, ampliando un sistema de bienestar social que estaba respaldado por el auge de los *commodities*. El sector seguridad y defensa colombiano ha conservado ciertas capacidades industriales impulsadas en este período; capacidades que a la luz de los objetivos del PND y la política sectorial 2022-2026, pueden promover una economía misional que genere *spillovers* hacia sectores diversos.

En este sentido, se destacan avances de acuerdo con los aportes realizados por la Armada Nacional a través de Cotecmar, impulsando la industria naval, marítima y fluvial, desde los ámbitos académico, científico, tecnológico y comercial; los esfuerzos de diversificación e internacionalización industrial, llevados por el Ejército Nacional por medio de Indumil y, finalmente aeroespacial, liderados por la Fuerza Aeroespacial Colombiana, que ha trabajado a través de la CIAC, mayoritariamente, redes de innovación y negocios que articulan actores públicos y privados de orden nacional e internacional.

Esto último se enmarca en el desarrollo de capacidades en los dominios espacial y ciberespacial. A partir del 2009, se da un cambio de doctrina que vincula la utilidad de los datos espaciales a actividades más allá de la seguridad y defensa; en 2011, junto a la Universidad Sergio Arboleda, lanza el satélite Libertad-1; en 2015, se acerca a la Nasa para impulsar su programa satelital FACSAT; en el 2018 lanza el FACSAT-1, momento en el que esta institución se convierte en operador de datos al tener control de activos espaciales (Córdoba, 2023). Lo expuesto, se fortalece con el lanzamiento del FACSAT-2 y con la sanción de la ley 2302 de 2023, que cambia la denominación de Fuerza Aérea a Fuerza Aeroespacial, otorgándole responsabilidades en este sentido (Ley 2302, 2023).

Dicho rumbo le permite vincularse al ímpetu del Estado emprendedor a partir del poder aeroespacial y el uso dual que tiene –militar y civil–. Desde esta perspectiva, se articula al desarrollo de aplicaciones de inteligencia artificial que apoyan la producción y optimización de imágenes para las diferentes agencias públicas, la

prevención y lucha contra la minería ilegal y la deforestación, la generación de aplicativos que rastreen el cambio de uso de los suelos, y el desarrollo de cadenas productivas de alto valor agregado –tecnológico y humano– (Córdoba, 2023). Según el plan estratégico 2042 de esta institución, se espera tener una constelación de satélites que presten servicios de comunicación e imágenes para el país (Fuerza Aérea Colombiana, 2020).

Con certeza, los aportes de la CIAC y los diferentes grupos de investigación, han permitido desarrollar técnicas e invenciones que apoyan el sostenimiento del poder aéreo colombiano, como lo son la producción de blindajes, piezas para aeronaves y procesos de mantenimiento y modernización (por ejemplo, para aeronaves T-27) (Departamento Estratégico de Asuntos Jurídicos y Derechos Humanos, 2020). Capacidades que están al servicio de otros estados y de la industria comercial, generando articulaciones que promueven el progreso nacional. La alianza entre el Estado colombiano con Airbus, en la que se vincula la Fuerza Aeroespacial, para la producción de hélices y otras estructuras –generando transferencia de conocimientos y tecnología–, es muestra patente de un nuevo empeño industrializador (Portafolio, 2023a).

Indudablemente, las capacidades aéreas y espaciales permiten proteger activos cruciales para la transición energética, la protección ambiental, el turismo, la articulación territorial y la gestión hídrica perseguida por el gobierno nacional en su política pública. Estas proporcionan soporte a la planeación, al igual que sostén a la vigilancia y seguimiento de objetivos estratégicos en los territorios. Cocrear, dar forma a la economía y a los mercados, impulsar el empleo en múltiples áreas, así como la inversión, la innovación y el desarrollo, consiste en volver a dar protagonismo al Estado emprendedor: el poder aeroespacial tiene un rol fundamental en ello, al perseguir objetivos tan ambiciosos como inspiradores.

## Referencias bibliográficas

Aktouf, O. (2009). *La administración entre tradición y renovación*. Artes Gráficas del Valle Ltda.

- Banco Mundial. (2023). *Indicators World Bank*. Data. World-bank.Org/Indicator.
- BBC. (2010). *Colombia: el legado económico de Uribe*. [https://www.bbc.com/mundo/economia/2010/08/100802\\_colombia\\_uribe\\_gobierno\\_balance\\_economia](https://www.bbc.com/mundo/economia/2010/08/100802_colombia_uribe_gobierno_balance_economia)
- Bertóla, L. y Ocampo, J. (2010). *Una historia económica de América Latina desde la independencia: desarrollo, vaivenes y desigualdad*. Secretaría General Iberoamericana.
- Bizberg, I. (2014). Tipos de capitalismo en América Latina. In I. Bizberg (Ed.), *Varietades de capitalismo en América Latina: los casos de México, Brasil, Argentina y Chile* (pp. 41-94). El Colegio de México.
- Boyer, R. (2003). Les institutions dans la théorie de la régulation. *Cahiers d'économie Politique*, 1(44), 79-101. <https://doi.org/https://doi.org/10.3917/cep.044.0079>
- Buendía, J., Osorio, R., Rangel, J. y Miranda, M. (2016). La desindustrialización en Colombia desde la apertura económica. *Revista CIFE*, 18(28), 71-89. <https://doi.org/10.15332/s0124-3551.2016.0028.03>
- Casas, J. (2017). Implicaciones de los acuerdos del Fondo Monetario Internacional sobre la pobreza en Colombia. *Económicas CUC*, 38(1), 9-36.
- Cepal. (2019). *Estadísticas e indicadores: demográficos y sociales - Cepalstat bases de datos y publicaciones estadísticas*. Cepalstats. <https://statistics.cepal.org/portal/cepalstat/dashboard.html?theme=1&lang=es>
- Chavance, B. (2009). *Institutional economics*. Routledge.
- CIAC. (2023). *Ciac historia*. <https://ciac.gov.co/historia/>
- Ley 2302. (2023). *Por medio de la cual se adoptan medidas para garantizar la defensa e integridad territorial en el ámbito espacial y se dictan otras disposiciones*. Congreso de la República. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=214010>
- Córdoba, L. (2023). *Discurso de la Fuerza Aeroespacial Colombiana para el foro: El potencial transformador de la inteligencia artificial: desafíos en el campo de la ética y conservación de la biodiversidad*.
- Cotecmar. (2021). *Quiénes somos*. <https://www.cotecmar.com/quienes-somos>
- Cotecmar. (2023). *Colombiamar 2023 en cifras*. LinkedIn. [https://www.linkedin.com/posts/cotecmarcolombia\\_colombiamar-2023-en-cifras-activity-7042642135522639872-W9ka/?utm\\_source=share&utm\\_medium=member\\_desktop](https://www.linkedin.com/posts/cotecmarcolombia_colombiamar-2023-en-cifras-activity-7042642135522639872-W9ka/?utm_source=share&utm_medium=member_desktop)
- Departamento Estratégico de Asuntos Jurídicos y Derechos Humanos. (2020). *La historia transversal del conflicto: transformaciones de la Fuerza Aérea Colombiana en contexto*. Fuerza Aérea Colombiana. [https://www.fac.mil.co/sites/default/files/linktransparencia/informacioninteres/informescomision/la\\_historia\\_transversal\\_del\\_conflicto\\_transformaciones\\_de\\_la\\_fuerza\\_aerea\\_colombiana\\_en\\_contexto\\_0.pdf](https://www.fac.mil.co/sites/default/files/linktransparencia/informacioninteres/informescomision/la_historia_transversal_del_conflicto_transformaciones_de_la_fuerza_aerea_colombiana_en_contexto_0.pdf)
- Departamento Nacional de Planeación. (2023). *Bases del plan nacional de desarrollo 2022-2026: Colombia, potencia mundial de la vida*. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/portalDNP/PND-2023/2023-02-23-bases-plan-nacional-de-desarrollo-web.pdf>
- Fondo Rotatorio de la Policía. (2018). *Industrial*. <https://www.forpo.gov.co/es/servicios-de-informacion/industrial>
- Fuerza Aérea Colombiana. (2020). *Estrategia para el desarrollo aéreo y espacial de la Fuerza Aérea Colombiana 2042*.
- Giraldo, F. (2010). Balance económico de la administración Uribe primer periodo: 2002-2006. *Apuntes del Cenes*, 27(43), 93. <https://doi.org/10.19053/01203053.v27.n43.2007.213>
- Indumil. (2023). *Trámites - Indumil*. <https://www.indumil.gov.co/tramites-y-servicios-4/>
- International Institute of Strategic Studies. (2023). *The military balance 2023*.
- Jacobs, M. (2012). *Green growth: economic theory and political discourse*. <http://www.lse.ac.uk/grantham>.
- Kalmanovitz, S. y Avella, M. (1998). *Barreras del desarrollo financiero: las instituciones monetarias colombianas en la década de 1950*. <https://www.banrep.gov.co/sites/default/files/publicaciones/pdfs/borra104.pdf>
- Lara, A. y Ortega, E. (2019). *Elementos estructurales para el diseño de modelos de negocio en entidades de ciencia y tecnología naval, marítima y fluvial a partir de la experiencia de Cotecmar*. Universidad de Cartagena. <https://repositorio.unicartagena.edu.co/handle/11227/15792>
- Mazzucato, M. (2014). *The entrepreneurial state: debunking public vs. private sector myths*. Anthem Press.
- Mazzucato, M. (2016). *The entrepreneurial state, implications for market creation and economic development*. *The entrepreneurial State, implications for market creation and economic development*. Raul Prebisch Lecture.
- Mazzucato, M. (2021). *Mission economy: a moonshot guide to changing capitalism*. Penguin Random House UK.
- Méndez, A. (2023). *Expedición Antártida: científicos exploran condiciones extremas del lugar*. El Tiempo. <https://www.eltiempo.com/justicia/investigacion/expedicion-antar-tida-cientificos-exploran-condiciones-extremas-del-lugar-736171>

- Miles, I. (2010). The development of technology foresight: A review. *Technological Forecasting and Social Change*, 77(9), 1448–1456. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2010.07.016>
- Miles, I. (2012). Dynamic foresight evaluation. *Foresight*, 14(1), 69–81. <https://doi.org/10.1108/14636681211210378>
- Ministerio de Ciencia y Tecnología. (2022). *Políticas orientadas por misiones para la solución de grandes desafíos del país*. [https://minciencias.gov.co/sites/default/files/politicas\\_orientadas\\_por\\_misiones\\_-\\_minciencias\\_2022-2026.pdf](https://minciencias.gov.co/sites/default/files/politicas_orientadas_por_misiones_-_minciencias_2022-2026.pdf)
- Ministerio de Comercio. (s. f.). *ABC del Tratado de Libre Comercio entre Colombia y Estados Unidos*. <https://www.tlc.gov.co/preguntas-frecuentes/abc-del-tratado-de-libre-comercio-entre-colombia-y>
- Ministerio de Defensa. (2023). *Políticas de seguridad, defensa y convivencia ciudadana, 2022-2026*.
- Ministerio de Hacienda y Crédito Público. (2023). *Cifras presupuestales históricas*. [https://www.minhacienda.gov.co/webcenter/portal/EntOrdenNacional/pages\\_presupues\\_togrlnacion/bitcoraeconomica](https://www.minhacienda.gov.co/webcenter/portal/EntOrdenNacional/pages_presupues_togrlnacion/bitcoraeconomica)
- Pérez, J. (2022). *Proyecto de Ley 296/2022C*. <https://www.camara.gov.co/integridad-territorial-en-el-ambito-espacial>
- Pérez, J. (2013). *La industria militar colombiana, una empresa industrial y comercial del Estado* Universidad de los Andes. <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/24367/u670359.pdf?sequence=1>
- Piketty, T. (2015). *El capital en el siglo XXI*. Fondo de Cultura Económica.
- Porras, J. (2019). *La historia de Cotecmar poco conocida*. Acore. <https://www.acore.org.co/wp-content/uploads/2019/06/LA-HISTORIA-DE-COTECMAR-POCO-CONOCIDA2.pdf>
- Portafolio. (2023a). *Colombia se alió con Airbus para la fabricación de piezas para aviones*. <https://www.portafolio.co/negocios/empresas/alianza-colombia-airbus-para-fabricar-piezas-para-aviones-581945>
- Portafolio. (2023b). *Video: lanzan al espacio el FACSAT2 Chiribiquete, satélite de la FAC y Ecopetrol*. <https://www.portafolio.co/negocios/empresas/video-lanzan-al-espacio-el-facsat2-chiribiquete-satelite-de-la-fac-y-ecopetrol-581478>
- Presidencia de la República. (1962, 12 de abril). Decreto 940 de 1962. *Por el cual se adicionan y modifican los Decretos 2321 de 1943 y 1978 de 1946*. Diario Oficial 30783 <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=71274>
- Presidencia de la República. (2022). *En conversatorio con la economista Mariana Mazzucato y empresarios, el presidente Gustavo Petro invita a la banca privada a financiar la política de producción agraria de su gobierno*. <https://petro.presidencia.gov.co/prensa/Paginas/En-conversatorio-con-la-economista-Mariana-Mazzucato-y-empresarios-el-Pres-221020.aspx>
- Rodrick, D. (2011). *The globalization paradox: why global markets, states, and democracy can't coexist*. Oxford.
- Rueda, M. (2022). *Consejos de Mariana Mazzucato, la economista de moda, al presidente Petro*. El Tiempo. <https://www.eltiempo.com/politica/gobierno/consejos-de-mariana-mazzucato-la-economista-de-moda-al-presidente-petro-713760>
- Rueda, R. (2021). *Discurso CETAD-Pintuco*.
- Saab. (s. f.). *Over 400 years of history*. <https://www.saab.com/about/history>
- Schmelzer, M., Vetter, A. & Vansintjan, A. (2022). *The future is degrowth: a guide to a world beyond capitalism*. Verso.
- Semana. (2019). *Colombia exporta armas como bombas y fusiles a Guatemala y Emiratos Árabes*. <https://www.semana.com/nacion/articulo/colombia-exporta-armas-como-bombas-y-fusiles-a-guatemala-y-emiratos-ara-bes/632812/>
- Stiglitz, J. (2012). *The price of inequality*. Allen Lane.
- Streeck, W. (2013). *Buying time: the delayed crisis of democratic capitalism*. Verso.
- Superintendencia de Industria y Comercio. (2018). *Universidades lideran solicitudes de patentes en Colombia*. Sic. Gov.Co. <https://www.sic.gov.co/noticias/universidades-lideran-solicitudes-de-patentes-en-colombia>
- Torres, O. (2023). *Gobierno inyectará 20 millones de dólares anuales a Satena: volará a Perú y Ecuador*. Bluradio. <https://www.bluradio.com/nacion/gobierno-inyectara-20-millones-de-dolares-anuales-a-satena-volara-a-peru-y-ecuador-rg10>
- Valero, C. (2017). *El Renault 4 en Colombia. Biografía social de un objeto de diseño industrial*. Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/63406/VALEROTESISR4ENCOLOMBIABIOGRAFIASOCIALDEUNOBJETODEDISEÑOINDUSTRIAL.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Vallejo, E. (2014). La desindustrialización en Colombia. *Apuntes del Cenes*, 33(57), 7–8. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0120-30532014000100001&lng=en&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-30532014000100001&lng=en&nrm=iso&tlng=es)

- Villalobos, H. (2020). El desarrollo tecnológico en materia policial: una receta de éxito para la prevención del delito. *Revista de Relaciones Internacionales, Estrategia y Seguridad*, 15(1), 79–97. <https://doi.org/https://doi.org/10.18359/ries.4243>
- Villalobos, J. (1993). *Historia de las fuerzas militares de Colombia: Fuerza Aérea*. Editorial Planeta.
- Williamson, O. (1979). The Journal of Law and Economics-Transaction cost economics. *Journal of Law and Economics*, 22(2), 233–261.
- Williamson, O. (1985). *The economic institutions of capitalism: firms, markets, relational contracting*. Free Press.

# Potencial del vuelo en planeador: análisis y posible implementación en la Escuela Militar de Aviación\*

| Fecha de recibido: 15 de junio 2023 | Fecha de aprobado: 22 de agosto 2023 |

| Reception date: June 15, 2023 | Approval date: August 22, 2023 |

| Data de recebimento: 15 de junho de 2023 | Data de aprovação: 22 de agosto de 2023 |

## Yesid Alejandro Quiroga Bujato

<https://orcid.org/0009-0006-4540-1328>  
yaquirogab@emavi.edu.co

### Estudiante

Alférez Programa de Ciencias Militares Aeronáuticas (PCMAE) – Escuela Militar de Aviación “Marco Fidel Suárez”, Colombia  
Rol del investigador: teórico y escritura  
Grupo de Investigación en Ciencias Militares Aeronáuticas y Administrativas (GICMA)

### Student

Ensign in Military Aeronautical Sciences Program (PCMAE) “Marco Fidel Suárez”  
Military Aviation School, Colombia  
Researcher role: theoretical and experimental  
Aeronautical and Administrative Military Sciences Research Group (GICMA)

### Estudante

Programa de Ciências Aeronáuticas Militares (PCMAE) Escuela Militar de Aviación “Marco Fidel Suárez”, Colombia  
Função do pesquisador: teórico e redação  
Grupo de Pesquisa em Ciências Aeronáuticas e Administrativas Militares (GICMA)

## Luis Felipe Riaño Salazar

<https://orcid.org/0009-0004-4857-4537>  
lfrianos@emavi.edu.co

### Estudiante

Alférez Programa de Ciencias Militares Aeronáuticas (PCMAE) – Escuela Militar de Aviación “Marco Fidel Suárez”, Colombia  
Rol del investigador: teórico y escritura  
Grupo de Investigación en Ciencias Militares Aeronáuticas y Administrativas (GICMA)

### Student

Ensign in Military Aeronautical Sciences Program (PCMAE) “Marco Fidel Suárez”  
Military Aviation School, Colombia  
Researcher role: theoretical and experimental  
Aeronautical and Administrative Military Sciences Research Group (GICMA)

### Estudante

Programa de Ciências Aeronáuticas Militares (PCMAE) Escuela Militar de Aviación “Marco Fidel Suárez”, Colombia  
Função do pesquisador: teórico e redação  
Grupo de Pesquisa em Ciências Aeronáuticas e Administrativas Militares (GICMA)

## Ricardo Andrés Cataño Martínez

<https://orcid.org/0009-0000-4884-9845>  
andrescatanom@hotmail.com

### Administrador Aeronáutico

Docente e investigador – Escuela Militar de Aviación “Marco Fidel Suárez”, Colombia  
Rol del investigador: teórico y escritura  
Grupo de Investigación en Ciencias Militares Aeronáuticas y Administrativas (GICMA)

### Aeronautical Administrator

Teacher and Researcher “Marco Fidel Suárez”  
Military Aviation School, Colombia  
Researcher role: theoretical and experimental  
Aeronautical and Administrative Military Sciences Research Group (GICMA)

### Administrador aeronáutico

Professor e pesquisador Escuela Militar de Aviación “Marco Fidel Suárez”, Colombia  
Função do pesquisador: teórico e redação  
Grupo de Pesquisa em Ciências Aeronáuticas e Administrativas Militares (GICMA)

\* Artículo de investigación, derivado de trabajo de grado. Programa de Ciencias Militares Aeronáuticas – PCMAE. Grupo de Investigación en Ciencias Militares Aeronáuticas y Administrativas – GICMA. Proyecto de investigación como soporte para la viabilidad de la estructuración de un convenio interinstitucional entre la Fuerza Aeroespacial Colombiana y otras organizaciones de operación combinada del vuelo a vela.

**Cómo citar este artículo:** Quiroga Bujato, Y. A., Riaño Salazar, L. F., y Cataño Martínez, R. A. (2023). Potencial del vuelo en planeador: análisis y posible implementación en la Escuela Militar de Aviación. *Ciencia y Poder Aéreo*, 19(1), 51-67. <https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaereo.801>



## Potencial del vuelo en planeador: análisis y posible implementación en la Escuela Militar de Aviación

**Resumen:** Esta investigación analiza el potencial del vuelo en planeador y su posible implementación como un programa de formación complementario a las fases de vuelo en la Escuela Militar de Aviación de la Fuerza Aeroespacial Colombiana (FAC), abordando el vuelo en planeador como objeto de estudio desde la perspectiva de la fuerza aérea brasileña, organismo que actualmente cuenta con un curso activo de vuelo de planeadores, diseñado para complementar el proceso de instrucción de los cadetes aviadores, y que, a partir de su experiencia, ha sido una determinación que ha conducido al desarrollo de competencias, proporcionando un mejor entrenamiento, así como el logro de la formación continua de sus pilotos. Para abordar este análisis se han propuesto tres momentos específicos, inicialmente una caracterización del vuelo del planeador y su importancia para la formación de un piloto a partir de la consulta documental y la experiencia de la fuerza aérea brasileña y colombiana; posteriormente, se identifican las principales barreras para la inserción del vuelo a vela en la formación de pilotos de la FAC; en la parte final, se proponen distintas líneas de acción para la futura implementación del vuelo a vela en la formación de pilotos de la FAC.

**Palabras clave:** barreras; formación de vuelo; pilotaje; programa; vuelo en planeador.

## Glider flight potential: analysis and possible implementation at the Colombian Air Force Academy

**Abstract:** This research analyzes the potential of glider flight and its possible implementation as a complementary setting program to the phases of flight at the Colombian Air Force Academy, addressing glider flight as an object of study from the perspective of the Brazilian air force, an organization that currently has an active glider flight course, designed to complement the training process of its pilots, and which, based on its experience, has been a determination that has led to the development of skills, providing a better training as well as achieving the continuous training of its pilots. To address this analysis three specific moments have been proposed, initially a characterization of glider flight and its importance for the training of a pilot is proposed from the documentary consultation and the experience of the Brazilian air force; Subsequently, the main barriers to the implementation of glider flight in COLAF (Colombian Air Force) pilot training and, in the final part, different lines of action are proposed for the future implementation of glider flight in COLAF pilot training.

**Keywords:** Challenges; flight instruction; flying; glider flight; introductory program.

## Potencialidades do planador: análise e possível implementação na Escola de Aviação Militar

**Resumo:** Esta pesquisa analisa o potencial do voo de planador e sua possível implementação como programa de treinamento complementar as fases de voo na “Escola Militar de Aviação” da Força Aérea Colombiana, abordando o voo de planador como objeto de estudo a partir da perspectiva da Força Aérea Brasileira, uma organização que atualmente possui um curso de voo planador ativo, destinado a complementar o processo de instrução de cadetes aviadores, e que, com base em sua experiência, tem uma determinação que tem levado ao desenvolvimento de competências, proporcionando uma melhor formação, bem como alcançando o treinamento contínuo de seus pilotos. Para abordar esta análise, três momentos específicos foram propostos: inicialmente, uma caracterização do voo de planador e sua importância para a formação de um piloto é proposta com base na consulta documental e na experiência da força aérea brasileira e colombiana; Posteriormente, são identificadas as principais barreiras à inserção do voo livre na formação de pilotos FAC e, na parte final, são propostas diferentes linhas de ação para a futura implementação do voo livre na formação de pilotos FAC.

**Palavras chave:** barreiras; pilotagem; programa; treinamento de voo; voo de planador.

## Introducción

En la aviación, la formación y el entrenamiento del personal es crucial, especialmente para los pilotos, quienes tienen la responsabilidad de salvaguardar las vidas de la tripulación y los pasajeros, así como garantizar la operación óptima de la aeronave. Por lo tanto, cualquier programa complementario o de adaptación al entrenamiento resulta fundamental para el continuo desarrollo de habilidades.

La presente investigación comienza reconociendo experiencias recientes en escuelas de formación que demuestran el desarrollo de habilidades adicionales en alumnos que recibieron previamente entrenamiento en planeadores. Dada la relación entre el vuelo en planeador y la formación de pilotos militares en la Fuerza Aeroespacial Colombiana, surge la pregunta sobre el potencial del vuelo en planeador y su viabilidad como programa complementario en la Escuela Militar de Aviación.

La Escuela Militar de Aviación, establecida por la ley 126 de 1919, tiene como objetivo principal la formación militar, profesional y humana de los oficiales de la Fuerza Aeroespacial Colombiana. Desde su fundación, ha graduado a más de 90 promociones de oficiales en diversas especialidades, como pilotaje, navegación, mantenimiento, abastecimientos, comunicaciones, seguridad y defensa de bases, armamento y defensa aérea.

En la etapa actual, durante el tercer año de formación, los estudiantes de la Fuerza Aeroespacial Colombiana inician la fase de vuelo bajo la supervisión del Grupo de Entrenamiento de Vuelos, quienes son los responsables de brindar instrucción primaria, que comprende la formación inicial en la realización de maniobras de control y comportamiento de la aeronave. Esto se lleva a cabo utilizando las aeronaves Cessna 172 y T-90 C.

Una vez completada esta primera fase, la Escuela Militar de Aviación otorga a los estudiantes el título de piloto primario, con el cual pueden avanzar al curso básico, que implica maniobras más exigentes, como

vuelo nocturno, acrobacias, formación e instrumentación. Este curso se realiza en diferentes bases asignadas por la Fuerza Aeroespacial Colombiana.

La formación como pilotos militares culmina con el curso básico en el Comando Aéreo de Combate n.º 1, utilizando la aeronave Texan T-6, en el Comando Aéreo de Combate n.º 2, con el T-27 Tucano, o en el Comando Aéreo de Combate n.º 4, utilizando el helicóptero TH-67. Esto permite a los estudiantes obtener la insignia de alas doradas, distintivo de la especialidad de piloto militar.

Dado que la Fuerza Aeroespacial Colombiana requiere pilotos altamente habilidosos y considerando que las misiones para las que se preparan son cada vez más complejas, como combate, inteligencia, interdicción, evacuación y traslado aeromédico, es esencial proporcionar un entrenamiento más avanzado. Esto garantiza un mayor desarrollo de habilidades y destrezas desde el inicio de la formación, lo que a su vez puede reducir costos futuros al disminuir las horas de vuelo en aeronaves más complejas.

Solano y Vanegas (2014) enfatizan en su trabajo de grado “Propuesta para la implementación del curso de planeador en el segundo año de escuela del cadete de la Escuela Militar de Aviación «Marco Fidel Suarez»”, la importancia de mejorar la instrucción de vuelo, economizando y optimizando los procesos de formación; dado que un estudiante mejor preparado y con bases sólidas al inicio del curso primario necesitará menos horas de vuelo, ya que se adaptará con facilidad a la cabina y asimilará de manera efectiva la instrucción.

Por lo tanto, antes de diseñar el plan de adaptación, es necesario confirmar su potencial para la formación de los cadetes del programa de Ciencias Militares Aeronáuticas en su fase de vuelo. Para una comprensión más clara, se detallarán las características de las aeronaves, su funcionamiento y las habilidades desarrolladas por los pilotos en programas existentes. También se abordará la situación actual de estos equipos en la Fuerza Aeroespacial Colombiana y se propondrán posibles líneas de acción para implementar un proyecto similar en la institución.

## Marco teórico

### Vuelo a vela

Según Araujo (2016), la actividad de volar en planeadores se denomina vuelo a vela, el cual se practica utilizando una aeronave que no tiene motor (figura 1). En este tipo de vuelo el piloto debe desarrollar una serie de habilidades y tomar decisiones para lograr que la aeronave se eleve por los aires, una práctica que, en la actualidad, en la mayoría de los países latinoamericanos se considera propia de la aviación deportiva.

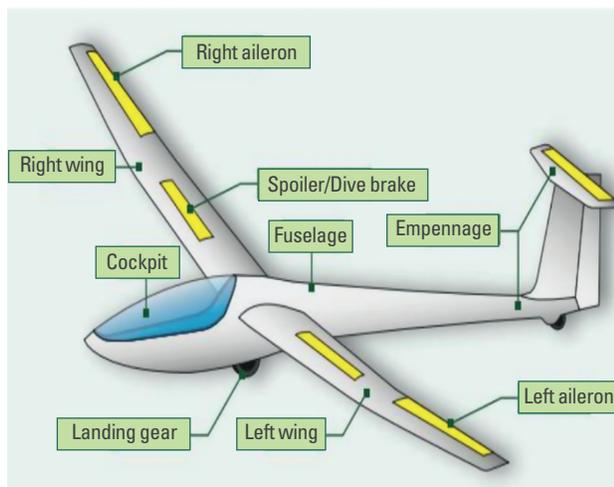


Figura 1. Partes de un planeador

Nota: la imagen muestra las partes principales de un planeador.

Fuente: Instrução e Manutenção Operacional AFA (PIMO), FAB, (2022).

### El planeador

Para Solano y Vanegas (2014), el planeador es una nave sin motor que planea gracias a las fuerzas aerodinámicas a las que se somete, aeronaves caracterizadas por una forma similar a las de los aviones comunes, pero siendo muy ligeros, con carga de ala baja (la relación entre peso y superficie del ala) y una relación de aspecto de ala alta (la relación entre la envergadura y su anchura), así mismo, sus alas son mucho más largas y estrechas que las de los aviones con motor.

### Planeador disponible para formación en Emavi

El planeador disponible en la actualidad para la formación en la Emavi es el Perkoz SZD-54 (figura 2), a continuación, se mencionan algunas de sus características principales.



Figura 2. Apariencia real del planeador utilitario y acrobático SZD-54-2 Perkoz

Fuente: Departamento de Comunicaciones Estratégicas. FAC (2019).

Este tipo de planeador tiene un fuselaje de tipo monocasco, su estructura principal está compuesta por vidrio epoxy y tiene diferentes partes intercambiables como los *wing tips*, el *rudder* y el *canopy frame*, tiene una cabina tipo tándem con dos asientos, cuenta con *air-brakes* en los planos, sistemas de control para el elevador y alerones, también un compensador longitudinal, control de liberación de remolque y no posee ningún tipo de motor (figura 3).

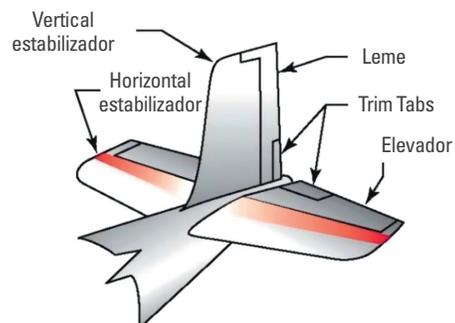


Figura 3. Empenaje de un planeador

Nota: la imagen muestra las partes principales de un planeador.

Fuente: Instrução e Manutenção Operacional AFA (PIMO), FAB, (2022).

## Habilidades cognitivas desarrolladas en el vuelo a vela

Volar en planeadores exige que el piloto sea sumamente preciso en sus técnicas para operar la aeronave de manera segura. Esto les permite mejorar habilidades como el control de los comandos, la percepción del espacio y la profundidad, así como la elegancia en los movimientos de la aeronave a lo largo de todo el vuelo. Entre las destrezas desarrolladas, el análisis del tiempo y el espacio se presenta como una de las más relevantes, ya que los pilotos deben evaluar constantemente la energía potencial y cinética disponible para llevar a cabo los cambios necesarios en altura y velocidad.

Otra habilidad perfeccionada mediante el vuelo en planeador está relacionada con la toma de decisiones asertivas. El piloto debe ejecutar los procedimientos y análisis con mayor agilidad que en un avión propulsado para mantener la seguridad operacional en todo momento. Debe identificar situaciones anormales y ser capaz de conectarlas con experiencias previas, poniéndolas a prueba mediante la práctica (Nardi y Araújo, 2021).

## Mecanismo de lanzamiento del planeador: el Skylaunch

Un cabrestante, también conocido como *winch* es un dispositivo mecánico que consta de un rodillo o cilindro giratorio con eje vertical, que es impulsado por una máquina eléctrica o hidráulica, y está conectado a un cable de acero o material sintético que ayuda a levantar y mover objetos de un lado a otro (figura 4).

La marca Skylaunch describe algunas características del *Skylaunch Cable Retrieve Winch*, diseñado para el lanzamiento de planeadores. Este tipo de cabrestante puede lanzar hasta 30 planeadores por hora, evitando el daño al aeródromo causado por los vehículos de remolque con cable. Además, prolonga la vida útil del cable de lanzamiento. El calzo de la rueda pivotante en el chasis (con enclavamiento de arranque) y el freno de mano del remolque aseguran una

configuración rápida y segura para el lanzamiento. El sistema de transmisión final incluye un mecanismo de desembrague para permitir la rueda libre y eliminar la resistencia al planeador (Skylaunch, s. f.).

Conforme al manual “BGA Gliding Basics” (2019), el lanzamiento de un planeador desde un cabrestante se realiza normalmente en dirección a la corriente de viento. Esto genera una mayor eficacia en las superficies de control y requiere una menor distancia de despegue para la aeronave.



Figura 4. Plataforma de lanzamiento Skylaunch

Fuente: Skylaunch (s. f.).

## Metodología

El trabajo se fundamentó en un enfoque de investigación inductiva, ya que tenía como objetivo explorar las generalidades del vuelo en planeador con fines de instrucción. Esta aproximación se basó principalmente en la consulta de información documental y bibliográfica. En cuanto al tipo de investigación, predominó un enfoque descriptivo, definido por Hernández *et al.* (2014) como el registro, análisis e interpretación de la naturaleza actual, composición y procesos de fenómenos. Este enfoque se centró en conclusiones predominantes y en cómo personas, grupos o cosas se comportan o funcionan en el presente.

Adicionalmente, la investigación se alineó con un enfoque mixto (Morris y Paris, 2022), lo que permitió la combinación de elementos cuantitativos y cualitativos, con el propósito de lograr una comprensión más profunda y rica del fenómeno en estudio. Esto posibilitó la incorporación de datos visuales, narrativos y verbales de los participantes, enriqueciendo así los datos numéricos y fortaleciendo los aspectos teóricos y prácticos. El trabajo se enriqueció mediante fuentes de información primarias y secundarias, que se utilizaron de la siguiente manera:

Para caracterizar el vuelo en planeador y su relevancia en la formación de pilotos, se recurrió a la consulta documental y a la experiencia de la Academia da Força Aérea (AFA) en Brasil, así como de la Escuela Militar de Aviación en Colombia. Como fuente primaria, se entrevistó al personal de cadetes de cuarto año, que son los más experimentados en el proceso militar y tienen la autonomía de actuar como pilotos instructores y examinadores de planeador. Estos cadetes están vinculados con el proceso de formación en vuelo de la Academia da Força Aérea (AFA) en Brasil.

**Tabla 1.**  
Encuesta dirigida a personal de cadetes de cuarto año relacionados con EVV en Brasil

Pregunta	Opción de respuesta
¿Qué rol cumple en el proceso de formación en vuelo en la Academia da Força Aérea AFA en Brasil?	Soy cadete
	Soy instructor
	Soy oficial relacionado con el proceso de formación en vuelo
¿Ha volado usted planeador dentro de su proceso de formación?	Sí
	No
¿Qué planeador ha volado usted?	
¿Qué planeadores se introducen en el programa de formación de pilotos?	
¿Cuánto dura el programa de formación de pilotos?	
¿Cuántas horas son dedicadas al planeador, dentro del proceso de formación del piloto?	
Explique en una respuesta abierta ¿cómo se introduce el planeador en el proceso de formación de la Academia da Força Aérea AFA en Brasil?	Abierta

Fuente: elaboración propia (2022).

Así mismo, se ha consultado a un experto instructor de vuelo con antigüedad y experiencia en la operación de planeadores en la Emavi, el MY (RA) Andrés Cataño.

Para la identificación de las principales barreras para la implementación del vuelo en planeador en la formación de pilotos de la FAC y para la propuesta de diferentes líneas de acción para la futura implementación del vuelo en planeador en la formación de pilotos de la FAC, se propone como fuente secundaria los antecedentes investigativos documentales, representados en trabajos empíricos y aportes teóricos vinculados en fase de anteproyecto en la investigación.



Figura 5. Propuesta de triangulación para el análisis y procesamiento de datos

Fuente: elaboración propia (2022).

La triangulación, empleada como técnica de recolección de información y como parte del plan de análisis y procesamiento de los datos, posibilitará obtener una comprensión integral del objeto de investigación. Además, guiará la obtención de la información necesaria para analizar el potencial de implementar un programa de ambientación en el vuelo en planeador en la formación de los cadetes y alféreces del programa de Ciencias Militares Aeronáuticas en la Emavi (figura 5).

Por último, se desarrolló un plan exhaustivo para el análisis y procesamiento de los datos procedentes tanto de fuentes primarias como secundarias. En este contexto, se utilizó un cuestionario como instrumento de recolección de información para la encuesta dirigida al personal de cadetes instructores y oficiales involucrados en el proceso de formación en vuelo de la Academia da Força Aérea (AFA) en Brasil, así como desde la experiencia en la Emavi en Colombia.

**Tabla 2.**  
Instrumento tipo cuestionario para entrevista a personal responsable por la operación de planeadores en la Emavi

Pregunta	Acá se ingresa la respuesta
¿Qué rol cumple usted en el proceso de formación en vuelo en la Academia da Força Aérea AFA en Brasil?	
¿Ha volado usted planeador dentro de su proceso de formación? ¿Qué planeadores a volado usted?	
¿Podría usted explicar, como se introduce el planeador en el programa de formación de pilotos de la Academia da Força Aérea AFA en Brasil?	
Mencione por favor ¿cuáles considera que son las principales ventajas o aspectos positivos, de introducir el planeador en el proceso de formación de pilotos?	

Fuente: elaboración propia (2022).

## Resultados

### Caracterización del vuelo en planeador y su importancia en la formación de pilotos

El primer resultado de este estudio aborda la caracterización del vuelo en planeador y evalúa su importancia en la formación de pilotos, empleando tanto fuentes documentales como la experiencia de la Academia da Força Aérea AFA en Brasil y la Emavi en Colombia.

### Caracterización del vuelo en planeador en el proceso de formación de pilotos

En este resultado se busca caracterizar el vuelo en planeador como parte del proceso de formación de pilotos. Para ello se ha tomado en cuenta la opinión y experiencia de ocho cadetes de cuarto año de la Fuerza Aérea de Brasil, que cuentan con experiencia en este tipo de aeronaves: Bretas, Cobo, De Almeida, Cruz, Goulart, Lopes, Toniolo, Vanegas, y el señor mayor oficial de Reserva Activa de la FAC, Ricardo Andrés Cataño Martínez. Las entrevistas se llevaron a cabo el 28 de septiembre de 2022.

El Escuadrón de Vuelo a Vela, conocido por sus siglas como EVV, es una estructura diseñada para introducir a los cadetes recién llegados a la AFA en la actividad aérea. Esta experiencia les permite vivir en la práctica algunas de las doctrinas empleadas en los escuadrones de instrucción primaria y básica en aeronaves con motor. Para la Academia da Força Aérea AFA en Brasil, el planeador representa el primer contacto que el cadete tiene con el vuelo (Bretas, 2022).

Toniolo (2022) respalda esta afirmación al mencionar el lema del Escuadrón de Vuelo a Vela: “Volar antes, volar siempre y volar mejor”. Desde su perspectiva, esto significa que, durante los cuatro años de formación, el cadete tendrá su primer contacto con una aeronave que pondrá a prueba sus habilidades básicas relacionadas con la aviación, lo que a su vez le permitirá mejorar sus capacidades para la instrucción aérea curricular en la Academia.

Este entrenamiento de pilotos se inicia en el EVV desde el primer año de la academia y desempeña un papel fundamental, ya que representa el primer contacto de los cadetes con la aviación. En este proceso, los cadetes adquieren conocimientos fundamentales de pilotaje y teoría de vuelo (Goulart, 2022).

De acuerdo con de Almeida (2022), esta experiencia de vuelo se lleva a cabo exclusivamente los fines de semana y días festivos, durante las misiones denominadas “Pre Solo”, que comprenden un total de 22 misiones. Las misiones 21 y 22 implican que los estudiantes vuelen en solitario. La experiencia final del “Pre Solo” consiste en vuelos sin motor que oscilan entre 15 y 20 minutos, lo cual es altamente valorado en la academia.



Figura 6. Cadetes de la AFA operando un planeador  
Fuente: Fuerza Aérea Brasileira. Capitán Aviador Lery, AFA (2020).

En el contexto colombiano, según Cataño (2022), el proceso de introducción del planeador en el programa de formación de pilotos de la Emavi se enfocó, al igual que en la academia en Brasil, en la familiarización al vuelo para los cadetes, como una preparación previa a su fase de vuelo primaria.

La experiencia de este piloto con los planeadores comenzó inicialmente cuando recibió el curso de familiarización al vuelo a vela como cadete de segundo año, durante el periodo de formación entre 1998 y 2001. Posteriormente, asumió el rol de instructor como oficial en el periodo que abarca desde 2011 hasta 2019.

En su momento, la Emavi ofreció diversos programas que variaron en su Programa de Instrucción y Entrenamiento (PIE), desde 3 hasta 10 misiones. En conjunto, estas misiones representaron para el estudiante el primer contacto con el vuelo, abarcando desde maniobras básicas hasta comunicaciones aeronáuticas y, finalmente, acrobacias, en concordancia con lo observado en la Academia en Brasil. Según la percepción de Cataño (2022), este escuadrón ha sido subvalorado en la Fuerza Aeroespacial Colombiana, a pesar de su potencial para contribuir significativamente a la formación de pilotos. En su experiencia, la falta de un programa continuo y de entrenamiento regular, debido a pausas o periodos sin operación, resulta en una pérdida de autonomía por parte de los pilotos, lo que significa que no logran volar un mínimo de horas en un periodo determinado. Esta falta de continuidad ha generado rupturas en el programa, con largos periodos sin operación de las aeronaves, lo que a su vez ha llevado a la pérdida de capacidades por parte de la FAC en este ámbito.

### Importancia del vuelo en planeador en la formación de pilotos

Después de examinar y cruzar la información recopilada en las entrevistas, se ha identificado la importancia del vuelo en planeador en la formación de pilotos militares, en beneficio de la FAC, como se detalla a continuación:

### El vuelo en planeador es importante para ofrecer una experiencia previa al vuelo

Uno de los argumentos más frecuentemente mencionados por los entrevistados es la oportunidad que brinda a los estudiantes de adquirir experiencia previa en vuelo antes de ingresar a los escuadrones de instrucción. Esto les permite familiarizarse con la cabina y sus instrumentos, así como entrenar las técnicas básicas de vuelo basadas en referencias visuales. Además, les proporciona conocimientos sobre los procedimientos y maniobras que deberán ejecutar en los escuadrones de instrucción. En resumen, esta experiencia les ayuda a reconocerse como pilotos (Bretas, 2022).

### El vuelo en planeador es económico y reduce los costos operativos

Para la Fuerza Aeroespacial Colombiana, la implementación de un programa de vuelo en planeador puede representar un ahorro en los costos de instrucción primaria, al reducir algunas misiones en aeronaves como el T-90 C o el Cessna 172. Esto permitiría que el vuelo a vela enseñe a los cadetes las técnicas primarias de vuelo y, al mismo tiempo, identifique anticipadamente a aquellos alumnos que puedan tener limitaciones fisiológicas.

A partir de esta consideración, se propone reemplazar algunas misiones de vuelo primario en los equipos T-90C y Cessna 172, con el fin de optimizar el proceso de formación de los pilotos, mejorando tanto la calidad de la instrucción como la gestión financiera asociada. Esto se respalda con un análisis basado en datos del Centro de Direccionamiento Operacional de Apoyo a la Fuerza, en el cual se compara el costo por hora de combustible y mantenimiento de los equipos T-90 C y Cessna 172. La información recopilada demuestra que el costo de operación de una aeronave con motor es considerablemente superior al del planeador cuando este último es operado mediante un sistema de lanzamiento con cabrestante.

Los costos de operación de los equipos de instrucción primaria T-90C y Cessna 172 se presentan en la siguiente tabla:

**Tabla 3.**  
Costos de operación por hora de vuelo en los equipos de instrucción primaria de la Emavi

Equipos	Costo hora de mantenimiento	Costo hora de combustible	Total costo hora de vuelo	Total costo curso de vuelo primario por cadete (35 horas aprox.)
T-90C	\$787.227	\$378.000	\$1.165.227	\$40.782.945
Cessna 172	\$1.264.050	\$270.000	\$1.534.050	\$53.691.750

Fuente: Sección de Planeamiento Operacional. Centro de Direccionamiento Operacional de Apoyo a la Fuerza – Codaf (2022).

Teniendo en cuenta que en la fase de vuelo primaria se vuelan en promedio 35 horas por alumno sin tener en cuenta los posibles recheques y demás misiones adicionales, esto nos representa un costo total del curso de vuelo por cadete en el equipo T-90 C de \$40.782.945, y en la aeronave Cessna 172 de \$53.691.750. Estos valores siempre incrementan debido a que la mayoría de los alumnos, por distintas situaciones, necesitan de los ya mencionados vuelos adicionales para alcanzar el estándar exigido, lo que aumenta significativamente el costo total del curso por cadete.

**Tabla 4**  
Costos de operación del planeador por medio de plataforma de lanzamiento

Equipo	Costo de operación Winch (01 lanzamiento)	Costo total del programa (05 misiones por cadete)
Perkoz SZD-54-2	\$100.000	\$500.000

Fuente: Sección de Planeamiento Operacional. Centro de Direccionamiento Operacional de Apoyo a la Fuerza – Codaf (2022).

Relacionando los costos de operación de las aeronaves de instrucción primaria T-90 C y Cessna 172, con los costos del vuelo en planeador mediante la plataforma de lanzamiento *Winch*, se identifica una notable diferencia en la economía.

Al comparar los costos de operación de las aeronaves de instrucción primaria T-90 C y el Cessna 172 con los costos del vuelo en planeador operado mediante la plataforma de lanzamiento *Winch*, se evidencia que la hora de operación del planeador es hasta 10 veces más económica que la de una aeronave con motor.

La Escuela Militar de Aviación gradúa en promedio cerca de 60 alumnos al año como pilotos primarios, lo que conlleva un gasto presupuestal de \$2.700.000.000 COP. Al sustituir 5 misiones de vuelo en el Cessna 172 por 5 misiones de planeador, se logra reducir en \$7.670.250 por cada cadete. Considerando los 60 cadetes, el ahorro total anual ascendería a \$430.215.000.

## Implementación del programa de vuelo en planeador: inversión y ahorro

Aunque la Fuerza Aeroespacial Colombiana no posee actualmente un equipo de lanzamiento tipo *Winch* para planeador, que se estima en un valor aproximado de USD \$150.000; esto constituiría un gasto adicional en la implementación del programa de vuelo en planeador. Sin embargo, en el largo plazo, tal inversión se traduciría en un ahorro sustancial para la FAC. El financiamiento del equipo *Winch* podría lograrse mediante los ahorros generados al sustituir las 5 misiones propuestas por vuelos en planeador, los cuales equivalen a \$430.215.000 como se mencionó previamente. Esta estrategia podría permitir a la FAC recuperar la inversión en la plataforma de lanzamiento en aproximadamente 18 meses.

## Optimización de recursos y reducción de misiones

Además, en la fase de vuelo básico en las aeronaves T-6 Texan y T-27 Tucano, también sería factible suprimir algunas misiones de maniobras y acrobacias, ya que el planeador posibilita la realización de estos procedimientos. Esto permitiría que el alumno adquiera estas capacidades de vuelo, las reconozca y practique en el planeador, reduciendo la necesidad de realizar tantas

misiones en las aeronaves con motor y logrando una optimización de recursos.

## Plan de Instrucción y Entrenamiento (PIE) y la reducción de misiones en aeronaves con motor

El plan de Instrucción y Entrenamiento (PIE) del equipo T-27 Tucano incluye un total de 17 misiones en el periodo de transición, que abarcan maniobras como Ocho Perezosos, Chandell, Rollo, Tonel, entre otras. Según Cobo (2022), todas estas acrobacias pueden ser realizadas durante las misiones de vuelo en planeador, lo que permite la reducción de misiones en los equipos T-6 Texan y T-27 Tucano.

La siguiente tabla presenta los costos de la hora de vuelo en las dos aeronaves disponibles para la formación de los pilotos militares en la fase de vuelo básico y periodo de transición por cadete.

Tabla 5.  
Costos por hora de vuelo en las aeronaves de instrucción básica T-6 Texan y T-27

Equipos	Costo hora de mantenimiento	Costo hora de combustible	Total costo hora de vuelo	Total costo fase de vuelo transición 17 misiones (19 horas aprox.)
T-27	\$3.088.215	\$1.404.000	\$4.492.215	\$85.352.085
T-6 TEXAN	\$4.000.000	\$2.457.000	\$6.457.000	\$122.683.000

Fuente: Sección de Planeamiento Operacional. Centro de Direccionamiento Operacional de Apoyo a la Fuerza – Codaf (2022).

## Optimización de recursos y ahorro económico mediante la implementación del vuelo en planeador

Considerando la sustitución de 5 misiones de vuelo en la aeronave T-27 Tucano durante el periodo de transición, con un costo estimado de \$22.461.075 por 5 misiones de vuelo en planeador operado por plataforma *Winch*, con un costo de \$500.000, se genera un ahorro presupuestal significativo de \$21.961.075 por alumno. En esta fase de vuelo, que gradúa en promedio unos

40 pilotos militares en aeronaves de ala fija, esto se traduce en un ahorro total de recursos de \$378.443.000. Dichos ahorros podrían ser destinados a la adquisición de más aeronaves Perkoz SZD-54, con un valor estimado de \$663.595.500, para ampliar la flota de planeadores y fortalecer el escuadrón de vuelo a vela.

## Importancia del vuelo en planeador para mejorar capacidades técnicas de los alumnos

Lopes (2022) argumenta que el vuelo en planeador contribuye a mejorar las capacidades técnicas de los cadetes, además de ser un factor motivador hacia la aviación y un impulsor del interés en ella. De Almeida (2022) coincide, destacando la mejora en la destreza en los aterrizajes debido a la mayor sensibilidad requerida en el manejo de los controles. Goulart (2022) agrega que la experiencia en planeador ofrece la posibilidad de mejorar las capacidades de comunicación, el conocimiento teórico y práctico, la enseñanza didáctica y el liderazgo.

## Desarrollo de liderazgo y oportunidades de instrucción

Lopes (2022) también señala que el vuelo en planeador proporciona la oportunidad de desarrollar el liderazgo y convertirse en instructor de vuelo, ya que involucra a los cadetes en roles de responsabilidad para operar de manera autónoma. Goulart (2022) respalda esta idea, indicando que convertirse en instructor de vuelo es una meta alcanzada tras cumplir con las marcas operacionales y completar el curso de formación de instructores.

## Mejora en las notas de vuelo y beneficios para la formación

Entrevistas revelan que los cadetes provenientes del escuadrón de vuelo a vela (EVV) tienen un desempeño sobresaliente en sus cursos de vuelo primario y básico. Goulart (2022) atribuye este éxito al tiempo dedicado al entrenamiento en planeador, lo que resulta en

cadetes más competentes en conocimientos aeronáuticos y en la operación y gestión del espacio aéreo.

## Principales barreras para la implementación del vuelo en planeador en la formación de pilotos de la FAC

Diversas barreras obstaculizan la implementación del vuelo en planeador en la formación de pilotos de la FAC. La percepción de inseguridad debido a eventos pasados, como un accidente fatal en 2018, crea reservas en la comunidad. Los altos costos de operación del vuelo a vela, incluido el remolque y la falta de un equipo *Winch*, son desafíos financieros. La complejidad operativa, la disponibilidad limitada de pilotos y la necesidad de ajustar programas y currículos también son barreras identificadas en entrevistas.

La indagación a estos oficiales mediante entrevistas permitió identificar las barreras caracterizadas a continuación.

### Percepción de una operación de vuelo insegura

En el caso de la percepción del riesgo sobre la vida humana del piloto en una aeronave de este tipo, esta se deriva, según refiere Cobo (2022), de experiencias previas que pudieron representar una prevención a este tipo de vuelo.

(...) esto va de la mano con un accidente ocurrido en el 2018 que es muy recordado en la Escuela y en la Fuerza en general, de un planeador Perkoz donde fallecieron 2 personas entonces, este suceso quedó en la memoria de las personas, siendo una experiencia traumática, lo que ha generado y permitido que se originen estos sentimientos de rechazo a la seguridad de vuelo en planeador por parte de la comunidad. (Cobo, 2022, comunicación personal)

### Altos costos de operación del vuelo a vela

Según Cobo (2022), la ausencia del motor, que podría ser considerada como factor de economía, también

implica un costo de remolque que, en la actualidad, se puede considerar como una barrera de operación en la Emavi.

Pero también de la mano con el tema de dificultades y debilidades existe otro tema que es el presupuesto recordando que los planeadores como tal no tienen motor, es decir, tampoco tienen un sistema que les permita despegar, sino que, actualmente, al no disponer de un *Winch*, debe llevarse a cabo por medio de una aeronave remolcadora que lo hala para despegarlo y soltarlo en vuelo. (Cobo, 2022, comunicación personal)

A los costos de operación, el oficial Cobo (2022) le suma el valor de cada aeronave de este tipo, el cual es cercano a los US \$150.000. A lo anterior se suman los costos de combustible de las aeronaves remolcadoras.

Dentro de la Fuerza Aeroespacial los costos en la operación del planeador aumentarían debido al traslado constante de la aeronave Cessna 172 para remolcar el planeador en la Emavi (pues estas aeronaves ya no se encuentran en Cali y tendrían que desplazarse desde Palanquero), según lo referido por el capitán Cobo.

### Complejidades de la operación para su desarrollo

Otra barrera referida por los participantes en la entrevista está relacionada con la complejidad que implica su operación. Según Vanegas (2022), el avión que remolcaba el planeador antiguamente era el T-41, sin embargo, con su salida dado el cese de su vida operacional el 31 de julio del año 2022, se carece de una aeronave que cumpla con la operación de remolque.

### Disponibilidad de pilotos para vuelo a vela

Otra barrera identificada desde las entrevistas es la que reporta el teniente Vanegas (2022), relacionada con la falta de disponibilidad de pilotos.

El segundo punto es el tema de los pilotos, solamente hay dos de planeador que también son instructores del avión T-90 C, existe una doble autonomía, es decir, se vuelan dos tipos de aeronaves al tiempo, por este motivo se debería empezar a organizar el tiempo porque al volar instrucción en T-90 C se limitan las horas para volar el planeador y viceversa. Como piloto operacional se pueden hacer máximo 6 salidas, pero cuando se vuela en instrucción, hay una estandarización la cual dice que se deben realizar máximo 3 vuelos, por lo cual la cantidad de pilotos no es suficiente para desarrollar tal programa.

Según Vanegas (2022), la adjudicación actual del recurso humano a estas aeronaves es mínimo, sin embargo, esta es una barrera de fácil superación, que solo depende de la intención de la Escuela por integrar esta aeronave en el proceso de formación, situación que automáticamente generaría una demanda de pilotos a capacitar.

## Enfoque actual del Programa de Ciencias Militares Aeronáuticas (PCMAE)

Según la percepción del oficial Vanegas (2022), existen antecedentes que han sido desarrollados a modo de investigaciones formales, que podrían servir de referente para argumentar la necesidad de incluir este vuelo en el proceso de formación. A la par de ello, el programa requeriría que se cambiara las personas objeto de aplicación de este vuelo, dado que en la actualidad solo se aplica a los cadetes que no vuelan.

A lo anterior se suma Cataño (2022), quien hace énfasis en la necesidad de ajustar el programa, sobre todo en términos de la malla curricular.

(...) el programa se ve afectado con el pensum actual de los cadetes, se debe estudiar la viabilidad de incluir ese entrenamiento dentro de la malla curricular, así como se incluyó en su momento la instrucción del vuelo primario y básico; que los cadetes y alféreces puedan recibir la instrucción haciendo parte de su proceso de formación y que se puedan hacer obligatorios los espacios requeridos, al igual que una hora de clase magistral o una hora de vuelo en los

equipos ya mencionados. (Cataño, 2022, comunicación personal)

## Rotación del personal

La última barrera identificada en esta fase corresponde con la rotación del personal, mencionada en los aportes de Cataño:

(...) en una Base Aérea los oficiales y suboficiales permanecen durante dos años aproximadamente y después son trasladados, ya sea porque los cambian de aeronave, los ascienden, los destinan a otro curso o cargo, etc., esa alta rotación del personal no permite que se desarrolle una buena doctrina o que la misma se pueda mantener en este tipo de equipos (planeadores), porque no es como en el caso del avión T-41 por ejemplo, que hay muchos pilotos volándolo, entonces, se va cediendo la experiencia de un piloto a otro a través de los años, sino que en planeadores solo son dos o tres instructores y a los tres los trasladan en muy poco tiempo, se pierden las capacidades adquiridas y le toca al oficial que llega empezar desde cero, resultando muy difícil que el Escuadrón pueda desarrollarse de manera óptima. (Cataño, 2022, comunicación personal)

El problema de la pérdida de doctrina debido a la rotación del personal es una barrera que podría superarse, con la formalidad de la asignación de más pilotos de vuelo a vela, y mucho más con la integración de las horas de vuelo, en el programa de formación de manera formal.

## Estrategias para la futura implementación del vuelo en planeador en la formación de pilotos de la FAC

Para explorar las posibles estrategias de implementación del vuelo en planeador en la formación de pilotos de la FAC, se llevaron a cabo entrevistas con dos oficiales con experiencia en este campo: el capitán Fabio Cruz, oficial del curso número 83 del cuerpo de vuelo, quien voló el planeador Perkoz SZD-54, entreno

llevado a cabo en Alemania, donde realizó 35 salidas a vuelo, sirviendo como instructor primario y básico del equipo T90; y el mayor (RA) Andrés Cataño Martínez, quien ya había participado en la investigación.

A ambos oficiales se les aplicó una sola pregunta de indagación: “¿Qué actividades se deberían realizar para lograr en el futuro la implementación del vuelo en planeador en la formación de pilotos de la FAC?”. El oficial Cruz identificó siete líneas estratégicas en total:

**Establecimiento del vuelo en planeador como requisito previo:** Cruz propuso que el vuelo en planeador se convierta en un requisito previo al vuelo motorizado. Esta acción obligaría a la Emavi a incorporar el programa directamente en el currículo académico, asegurando viabilidad legal e institucional.

**Creación de espacios e instructores:** sugirió la asignación de lugares de instrucción y formación de instructores específicos para el vuelo en planeador. Esto permitiría establecer un entorno autónomo para los participantes y definir roles de cadetes u oficiales, tomando como referencia el empoderamiento que se observa en Brasil.

**Definición de lugar y frecuencia en el currículo:** propuso determinar dónde encajaría el vuelo en planeador en el curso de vuelo y cuántas misiones serían necesarias. Esta alineación podría basarse en análisis comparativos con la Academia da Força Aérea en Brasil.

**Vinculación con directivas académicas:** Cruz planteó la necesidad de alinear el programa con las directivas del Grupo Académico. Esto involucraría determinar si las materias y horas de vuelo podrían ser consideradas como créditos en asignaturas específicas, buscando una vinculación directa del vuelo en planeador con el programa PCMAE para enriquecer la formación académica y profesional de los cadetes.

**Definición de proeficiencia esperada:** propuso establecer el nivel de proeficiencia deseado en relación con la cantidad de misiones y el nivel de habilidades requeridas. Esta definición permitiría diseñar el programa de manera que los cadetes adquieran habilidades sólidas antes de iniciar la instrucción primaria.

**Disponibilidad proporcional de aeronaves:** sugirió proporcionar la cantidad adecuada de aeronaves

en proporción a la demanda de instrucción de vuelo en planeador. Este equilibrio aseguraría una formación efectiva y eficiente.

**Apoyo organizacional y del alto mando:** Cruz subrayó la importancia de la legalización organizacional y el respaldo del alto mando de la Fuerza Aeroespacial. Dado que un proyecto de esta magnitud involucra recursos y decisiones fundamentales, contar con el apoyo del comando de la FAC es esencial.

En resumen, las estrategias propuestas por el capitán Cruz se sintetizan en la tabla 6. Estas líneas de acción se presentan como orientación para la planificación de la futura implementación del vuelo en planeador en la formación de pilotos de la FAC.

Tabla 6.  
Líneas de acción desde el aporte del oficial Cruz

Entrevistado 1. CT. Fabio Cruz	
1	Establecimiento del vuelo en planeador como requisito previo.
2	Creación de espacios e instructores para cadetes y oficiales.
3	Definición de lugar y frecuencia en el currículo.
4	Vinculación con directivas académicas.
5	Definición de proeficiencia esperada.
6	Disponibilidad proporcional de aeronaves.
7	Apoyo organizacional y del alto mando.

Fuente: elaboración propia (2022).

## Estrategias propuestas por el mayor (RA) Andrés Cataño para la implementación del vuelo en planeador en la formación de pilotos de la FAC

El mayor (RA) Andrés Cataño presentó una serie de estrategias para la implementación exitosa del vuelo en planeador en la formación de pilotos de la FAC:

**Respaldo del alto mando y aprobación institucional:** como punto de partida, sugirió asegurar el respaldo y la aprobación del alto mando para esta estrategia. Reconoció que, sin su apoyo, la integración del vuelo a vela en el proceso de formación sería inviable.

**Capacitación de personal clave:** propuso la capacitación de pilotos, técnicos y controladores de

tráfico aéreo. Identificó la importancia vital de este personal en la operación diaria de la aeronave. Sugirió una cooperación con la escuela de Brasil, que tiene experiencia en el proceso, para adquirir doctrina y conocimientos en el uso del planeador con fines de instrucción.

**Mantenimiento preventivo y correctivo:** definió la necesidad de mantener la aeronave del planeador en condiciones óptimas a través del mantenimiento preventivo y correctivo. Garantizar la disponibilidad de esta aeronave para la operación es fundamental.

**Adquisición de equipo y accesorios:** planteó la compra de equipo ETAA certificado (equipo terrestre de apoyo aeronáutico) y accesorios necesarios para respaldar la operación del escuadrón de vuelo a vela.

**Diseño de programa de vuelo y doctrina:** Cataño consideró esencial diseñar un programa de vuelo sólido respaldado por manuales y doctrina. Este programa debe estar justificado por argumentos basados en la estrategia operacional de la FAC.

**Integración en la malla curricular:** propuso la inclusión del programa de vuelo en planeador dentro de la malla curricular actual, asegurando coherencia en los contenidos y una adecuada integración con el resto del plan de estudios.

**Colaboración con escuelas y clubes civiles:** sugirió un acercamiento con escuelas y clubes civiles para compartir vuelos, experiencias y doctrina. Esto permitiría liderar la operación de vuelo a vela y enriquecer el programa a partir de experiencias externas.

**Colaboración con UAEAC:** propuso colaborar con la Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil (UAEAC) para desarrollar conjuntamente la doctrina en el país. Hasta el momento, la regulación y el conocimiento de la operación de vuelo a vela son limitados.

**Participación en festivales y competencias:** recomendó la participación en festivales y competencias internacionales. Esto brindaría a los cadetes la oportunidad de demostrar las habilidades adquiridas en el programa.

**Mantenimiento y actualización de la flota:** propuso asegurar el mantenimiento, compra o actualización constante de la flota aérea necesaria para respaldar la misión del escuadrón de vuelo a vela.

Estas estrategias, presentadas por el mayor (RA) Andrés Cataño, se resumen en la tabla 7 y ofrecen un enfoque integral para la futura implementación del vuelo en planeador en la formación de pilotos de la FAC.

Tabla 7.  
Líneas de acción desde la percepción del oficial Cataño

Entrevistado 2. Mayor (RA) Andrés Cataño	
1	Respaldo del alto mando y aprobación institucional.
2	Capacitación de personal clave.
3	Mantenimiento preventivo y correctivo.
4	Adquisición de equipo y accesorios.
5	Diseño de programa de vuelo y doctrina.
6	Integración en la malla curricular.
7	Colaboración con escuelas y clubes civiles.
8	Colaboración con UAEAC - Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil.
9	Participación en festivales y competencias internacionales.
10	Mantenimiento y actualización de la flota.

Fuente: elaboración propia (2022).

Las líneas de acción que se observaron anteriormente pretenden orientar una posible integración del vuelo a vela en el proceso de formación de cadetes. Las mismas surgen de la experiencia de oficiales inmersos en el proceso, por lo que podrían ser un adecuado punto de partida para la consolidación de una estrategia que aproveche el potencial del vuelo en planeador y su posible implementación como programa de ambientación complementario a las fases de vuelo en la Escuela Militar de Aviación Marco Fidel Suárez.

## Discusión

Relacionando la importancia de todos los resultados obtenidos de acuerdo con lo que se expuso con el planteamiento del problema, ¿cuál es el potencial del vuelo en planeador y de su posible implementación como programa de ambientación complementario a

las fases de vuelo en la Escuela Militar de Aviación de la Fuerza Aeroespacial Colombiana? Se puede decir que describiendo y caracterizando todo este proceso del vuelo en planeador para la formación de pilotos, y teniendo como base otra fuerza aérea del continente, la operación en planeador previo a unas fases de vuelo tiene un carácter valioso y su potencial va más allá de lo que puede ser común y conocido en los actuales procesos de formación de pilotos de la FAC.

La fuerza aérea brasilera nos generó un gran aporte con el programa de ambientación al vuelo, permitiendo analizar cómo este programa es autosostenible y al mismo tiempo mostrar las bondades y el potencial que tiene para el desarrollo de habilidades en alumnos de vuelo. Facilitó el análisis de un programa estructurado en el que cadetes de la escuela son los alumnos e instructores de acuerdo con la antigüedad en la escuela y su rendimiento en estos equipos.

Por parte de la FAC, esta nos permite identificar cuáles son las principales barreras encontradas para la implementación de este programa en la Escuela Militar de Aviación “Marco Fidel Suárez”, la cual es considerada la cuna y alma mater, no solo de la oficialidad, sino de los pilotos militares en Colombia. La formación de los cadetes y alféreces de vuelo de la Emavi persigue una mejora continua año tras año, pudiendo tratar todas las barreras encontradas y de esta forma obtener los múltiples beneficios del programa propuesto en la presente investigación.

Finalmente, posterior al análisis de un programa de vuelo en planeador en la AFA y la identificación de unas barreras para la implementación de este programa complementario a las fases de vuelo en Emavi, se proponen unas líneas de acción que conllevan a la materialización de este programa con fines de optimizar procesos, habilidades, identificar problemas fisiológicos previos al vuelo, realizar una adaptación al mismo, reducir costos en la instrucción, entre otros.

Contrastando los resultados obtenidos, las personas encuestadas y el material bibliográfico utilizado, todo da constancia del potencial del vuelo en planeador para la formación de pilotos previo a las fases de vuelo como es en el caso de la Emavi.

## Conclusiones

Finalizado el presente documento de investigación que pretendía analizar el potencial del vuelo en planeador y su posible implementación como programa de ambientación complementario a las fases de vuelo en la Escuela Militar de Aviación de la Fuerza Aeroespacial Colombiana, es posible llegar a ciertas conclusiones derivadas de los objetivos específicos de investigación planteados inicialmente.

En cuanto a la caracterización del vuelo en planeador y su importancia para la formación de un piloto desde la consulta documental, desde la experiencia de la Academia da Força Aérea AFA en Brasil y desde la experiencia de Emavi, Colombia, se reconoció la forma como ha sido introducido el planeador en el proceso de formación en la Academia da Força Aérea AFA en Brasil; fue identificado, además, el tipo de aeronave que vuelan; la duración total del curso; la proporcionalidad temporal destinada al planeador; sus funciones; objetivos; y demás información relevante para caracterizar el vuelo en planeador. De manera comparativa, tales resultados fueron analizados con la operación de planeadores en la Emavi, con el fin de identificar el listado de ventajas y debilidades de la operación de vuelo en planeador en la institución, respecto al proceso de formación de un piloto.

Para esta primera fase de investigación, el análisis fue guiado por el documento que regula el vuelo en planeador en la Academia en Brasil, el Programa de Instrução e Manutenção Operacional AFA (PIMO), de manera específica haciendo una revisión de los cuatro niveles de formación, uno denominado de preparación (PR); otro denominado de respuesta guiada (RO); otro denominado de respuesta mecánica (RM) y el último orientado a respuesta abierta compleja (RC).

Con la información recopilada se determina que el vuelo a vela sí tiene potencial como un programa de formación, porque se logró identificar la importancia de este desde la consulta documental en la AFA en Brasil y la experiencia en Emavi, siendo posible concluir que al implementar el vuelo en planeador en el proceso de aprendizaje de los cadetes, este les genera una

mayor proeficiencia, adquiriendo conceptos básicos de pilotaje como liderazgo, comunicación, raciocinio lógico, manejo del espacio aéreo y reconocimiento de actitudes de vuelo, las cuales permiten que un cadete o en general un alumno de vuelo, al culminar el curso, llegue mejor preparado a la instrucción que recibirá posteriormente en una aeronave con motor. La implementación de un curso de ambientación complementario de vuelo en planeador significaría para la Fuerza Aeroespacial Colombiana un gran ahorro de recursos en la instrucción de pilotos debido a su bajo costo de operación, siendo operado por una plataforma de lanzamiento y sugiriendo que en caso de implementarse sean suprimidas algunas misiones en las fases primario y básico, de esta manera, según el análisis realizado y teniendo en cuenta los datos aportados por el Centro de Direccionamiento Operacional de la FAC, es posible afirmar que se podría economizar aproximadamente la cifra de \$808.658.000 al año, que al inicio se usarían para la financiación del equipo *Winch* y para la compra de 4 o 5 planeadores Perkoz SZD-54 que amplíen la flota de aeronaves disponibles para la instrucción, siendo esta una gran ventaja para la recuperación de estas capacidades en la FAC, la economía de los recursos y un mejor programa de entrenamiento para los pilotos.

Para poder identificar la posible implementación del programa, es importante mencionar que en todo proceso existen limitaciones como las encontradas en la investigación, las cuales deben ser identificadas previo a la aplicación. Pese a las barreras encontradas, como la carencia de pilotos, las complejidades que representa la operación del planeador en la Emavi, el enfoque actual del programa PCMAE, como también la alta rotación del personal y la falta de apoyo del alto mando, se evidencia que un programa de tal magnitud e impacto es posible implementarlo a mediano plazo, teniendo en cuenta algunas líneas de acción que fueron determinadas por expertos en el tema en la presente investigación.

Finalmente, en cuanto a las líneas de acción para la futura implementación, los oficiales entrevistados propusieron unos cursos de acción, que pueden servir de orientación general si la FAC determina incluir esta actividad dado el potencial que representa. Según lo

referido por los entrevistados, algunas orientaciones generales nombradas fueron establecer este programa como requisito previo a la fase de vuelo, la legalización organizacional y el apoyo del alto mando, disponer una flota de planeadores que cumpla la demanda del programa, entrenamiento a pilotos, técnicos y personal de torre de control como también el acercamiento con escuelas y clubes civiles que aporten para construir la doctrina del vuelo en planeador. Estas líneas son fundamentales como antecedente y en el mediano plazo se puede estudiar la posibilidad real de crear este proyecto, beneficiando ampliamente el desarrollo de capacidades y entrenamiento de los pilotos de la FAC.

De esta forma, la implementación de un programa de ambientación complementario a las fases de vuelo en la Emavi es posible, aplicando las líneas de acción propuestas como también destacando los beneficios que aportaría para la formación de los futuros pilotos militares de la Fuerza Aeroespacial Colombiana.

## Referencias bibliográficas

- Aeroflap. (2020). *Escuadrón de vuelo a vela de la AFA participa en el Campeonato Brasileño de Vuelo en Planeador*. Aeroflap.
- Araujo, R. (2016). *O voo a vela e sua influência no desenvolvimento do Piloto*. Universidade Do Sul de Santa Catarina.
- Bretas, F. (28 de septiembre de 2022). *Encuesta caracterización e importancia del vuelo en planeador*. (L. Riaño, entrevistador).
- Cataño, A. (28 de septiembre de 2022). *Encuesta caracterización e importancia del vuelo en planeador*. (L. Riaño, entrevistador).
- Cobo, D. (28 de septiembre de 2022). *Encuesta caracterización e importancia del vuelo en planeador*. (L. Riaño, entrevistador).
- Cruz, F. (28 de septiembre de 2022). *Encuesta caracterización e importancia del vuelo en planeador*. (L. Riaño, entrevistador).
- De Almeida, J. (28 de septiembre de 2022). *Encuesta caracterización e importancia del vuelo en planeador*. (L. Riaño, entrevistador).

- Fuerza Aérea Colombiana (FAC). (2019). #TBT planeadores acrobáticos Perkoz de la Fuerza Aérea Colombiana. Departamento Estratégico de Comunicaciones. <https://www.fac.mil.co/es/noticias/tbt-planeadores-acrobaticos-perkoz-de-la-fuerza-aerea-colombiana>
- Goulart, P. (28 de septiembre de 2022). *Encuesta caracterización e importancia del vuelo en planeador*. (L. Riaño, entrevistador).
- Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6.ª ed.). McGraw-Hill.
- Lopes, J. (28 de septiembre de 2022). *Encuesta caracterización e importancia del vuelo en planeador*. (L. Riaño, entrevistador).
- Morris, J. L. y Paris, L. F. (2022). Rethinking arts-based research methods in education: enhanced participant engagement processes to increase research credibility and knowledge translation, *International Journal of Research & Method in Education*, 45(1), 99-112. <https://doi.org/10.1080/1743727X.2021.1926971>
- Nardi, L. E. & Araújo, T. (2021). Influência do voo a vela no desenvolvimento de habilidades para pilotagem de aeronaves de asa fixa. *Revista Brasileira de Aviação Civil & Ciências Aeronáuticas*, 1(3), 59–80. <https://rbac.cia.emnuvens.com.br/revista/article/view/43>
- Solano, E. y Vanegas, E. (2014). *Propuesta para la implementación del curso de planeador en el segundo año de escuela del cadete de la Escuela Militar de Aviación “Marco Fidel Suárez”*. (Trabajo de grado). Escuela Militar de Aviación “Marco Fidel Suárez”.
- Força Aérea Brasileira (FAB). (2022). *Programa de instrução e manutenção operacional AFA (PIMO)*. <https://www2.fab.mil.br/imae/index.php/2014-12-11-17-51-57/226-pimo2022>
- Sección de Planeamiento Operacional. (2022). *Centro de Dirección Operacional de Apoyo a la Fuerza – Codaf*. (Informe interno). Documento reservado.
- Skylaunch. (s. f.). *Skylaunch Cable Retrieve Winch*. <http://www.skylaunch.com/retrieve.php>
- Toniolo, M. (28 de septiembre de 2022). *Encuesta caracterización e importancia del vuelo en planeador*. (L. Riaño, entrevistador).
- Vanegas, E. (28 de septiembre de 2022). *Encuesta caracterización e importancia del vuelo en planeador*. (L. Riaño, entrevistador).

# Helamiento en aeronaves: un desafío para la seguridad y la eficiencia aérea

| Fecha de recibido: 02 de junio 2023 | Fecha de aprobado: 07 de septiembre 2023 |

| Reception date: June 2, 2023 | Approval date: September 07, 2023 |

| Data de recebimento: 02 de junho de 2023 | Data de aprovação: 07 de setembro de 2023 |

## Zharik Nicole Lee Cruz

<https://orcid.org/0009-0007-1746-3975>  
znleec@libertadores.edu.co

Estudiante  
Ingeniería Aeronáutica – Fundación  
Universitaria Los Libertadores, Colombia  
Rol del investigador: teórico y escritura  
Grupo de investigación GIDAD

Student  
Aeronautical Engineering - Fundación  
Universitaria Los Libertadores, Colombia  
Role of the researcher: theoretical and writing  
GIDAD research group

Estudante  
Engenharia Aeronáutica - Fundação Universitaria Los  
Libertadores, Colombia  
Função do pesquisador: teórico e redação  
Grupo de pesquisa GIDAD

## Juan Pablo Gutiérrez Mora

<https://orcid.org/0009-0005-0874-4498>  
juanpgutierrez2310@gmail.com

Estudiante  
Ingeniería Aeronáutica – Fundación  
Universitaria Los Libertadores, Colombia  
Rol del investigador: teórico y escritura  
Grupo de investigación GIDAD

Student  
Aeronautical Engineering - Fundación  
Universitaria Los Libertadores, Colombia  
Role of the researcher: theoretical and writing  
GIDAD research group

Estudante  
Engenharia Aeronáutica - Fundação  
Universitaria Los Libertadores, Colombia  
Função do pesquisador: teórico e redação  
Grupo de pesquisa GIDAD

## Santiago José Méndez Rozo

<https://orcid.org/0009-0002-5447-7261>  
sjmendezr@libertadores.edu.co

Estudiante  
Ingeniería Aeronáutica – Fundación  
Universitaria Los Libertadores, Colombia  
Rol del investigador: teórico y escritura  
Grupo de investigación GIDAD

Student  
Aeronautical Engineering - Fundación  
Universitaria Los Libertadores, Colombia  
Role of the researcher: theoretical and writing  
GIDAD research group

Estudante  
Engenharia Aeronáutica - Fundação  
Universitaria Los Libertadores, Colombia  
Função do pesquisador: teórico e redação  
Grupo de pesquisa GIDAD

## Ana Maria Arango Guzman

<https://orcid.org/0009-0000-5743-8853>  
amarangog@libertadores.edu.co

Estudiante  
Ingeniería Aeronáutica – Fundación  
Universitaria Los Libertadores, Colombia  
Rol del investigador: teórico y escritura  
Grupo de investigación GIDAD

Student  
Aeronautical Engineering - Fundación  
Universitaria Los Libertadores, Colombia  
Role of the researcher: theoretical and writing  
GIDAD research group

Estudante  
Engenharia Aeronáutica - Fundação  
Universitaria Los Libertadores, Colombia  
Função do pesquisador: teórico e redação  
Grupo de pesquisa GIDAD

## Joel Sebastián Riascos Hurtado

<https://orcid.org/0009-0005-7008-4910>  
jsriascosh@libertadores.edu.co

Estudiante  
Ingeniería Aeronáutica – Fundación  
Universitaria Los Libertadores, Colombia  
Rol del investigador: teórico y escritura  
Grupo de investigación GIDAD

Student  
Aeronautical Engineering - Fundación  
Universitaria Los Libertadores, Colombia  
Role of the researcher: theoretical and writing  
GIDAD research group

Estudante  
Engenharia Aeronáutica - Fundação Universitaria Los  
Libertadores, Colombia  
Função do pesquisador: teórico e redação  
Grupo de pesquisa GIDAD

## Richard Giovanni Avella Sarmiento

<https://orcid.org/0000-0001-8081-7587>  
rgavellas@unal.edu.co

Doctor en Ciencias-Física  
Docente – Fundación Universitaria  
Los Libertadores, Colombia  
Rol del investigador: teórico y escritura  
Grupo de investigación GIDAD

Doctor of Science-Physics  
Professor - Fundación Universitaria  
Los Libertadores, Colombia  
Role of the researcher: theoretical and writing  
GIDAD research group

Doutor em Ciências - Física  
Professor - Fundação Universitaria  
Los Libertadores, Colombia  
Função do pesquisador: teórico e redação  
Grupo de pesquisa GIDAD

**Cómo citar este artículo:** Lee Cruz, Z. N., Gutierrez Mora, J. P., Mendez Rozo, S. J., Arango Guzman, A. M., Riascos Hurtado, J. S., y Avella Sarmiento, R. G. (2023). Helamiento en aeronaves: un desafío para la seguridad y la eficiencia aérea. *Ciencia y Poder Aéreo*, 19(1), 68-80. <https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaereo.786>



## Helamiento en aeronaves: un desafío para la seguridad y la eficiencia aérea

**Resumen:** El helamiento en aeronaves, conocido como *aircraft icing*, es un fenómeno complejo y potencialmente peligroso que ocurre cuando la superficie de una aeronave se cubre de hielo durante el vuelo en condiciones meteorológicas adversas. Este proceso puede tener graves implicaciones en la seguridad y el rendimiento de las aeronaves, afectando la aerodinámica, la estabilidad y el control.

Con este trabajo se pretende analizar los mecanismos de formación de hielo en aeronaves, clasificar y caracterizar los tipos de helamiento, evaluar las condiciones atmosféricas para la formación de hielo, identificar zonas críticas vulnerables al helamiento, explorar estrategias de prevención y mitigación del helamiento y comparar sistemas de protección contra el hielo. Mediante la consecución de estos objetivos, se espera obtener un entendimiento profundo y completo sobre el fenómeno del helamiento en aeronaves, desde sus mecanismos hasta las estrategias para su prevención y mitigación.

**Palabras clave:** congelación de aeronaves; formación de hielo; efectos del helamiento; estrategias de prevención: mitigación; avances tecnológicos.

## Icing in aircraft: a challenge for safety and air efficiency

**Abstract:** Aircraft Icing is a complex and potentially dangerous phenomenon that occurs when the surface of an aircraft becomes covered in ice during flight in adverse weather conditions. This process can have serious implications for the safety and performance of aircraft, affecting aerodynamics, stability, and control.

This work aims to analyze ice formation mechanisms in aircraft, classify and characterize types of icing, evaluate atmospheric conditions for ice formation, identify vulnerable critical zones to icing, explore icing prevention and mitigation strategies, and compare ice protection systems. By achieving these objectives, a thorough and comprehensive understanding of the icing phenomenon in aircraft is expected to be obtained, ranging from its mechanisms to strategies for its prevention and mitigation.

**Keywords:** Aircraft icing; icing formation; effects of icing; prevention strategies: mitigation; technological advances.

## Congelamento em aeronaves: um desafio para a segurança e eficiência aérea

**Resumo:** A formação de gelo em aeronaves é um fenômeno complexo e potencialmente perigoso que ocorre quando a superfície de uma aeronave fica coberta de gelo durante o voo em condições meteorológicas adversas. Esse processo pode ter sérias implicações para a segurança e o desempenho das aeronaves, afetando a aerodinâmica, a estabilidade e o controle. Este trabalho tem como objetivo analisar os mecanismos de formação de gelo em aeronaves, classificar e caracterizar tipos de formação de gelo, avaliar as condições atmosféricas para a formação de gelo, identificar zonas críticas vulneráveis à formação de gelo, explorar estratégias de prevenção e mitigação de gelo e comparar sistemas de proteção contra gelo. Ao alcançar esses objetivos, espera-se obter uma compreensão completa e abrangente do fenômeno de formação de gelo em aeronaves, desde seus mecanismos até estratégias para sua prevenção e mitigação.

**Palavras-chave:** formação de gelo em aeronaves; formação de gelo; efeitos do gelo; estratégias de prevenção: mitigação; desenvolvimentos tecnológicos.

## Introducción

El hielo en las aeronaves es un fenómeno climático de alto riesgo que puede afectar el funcionamiento de las estructuras y componentes de la aeronave, poniendo en peligro la integridad de los pasajeros y la tripulación a bordo (Adsuar, 2003). Según la Administración Federal de Aviación (FAA, 2015), la estrategia utilizada para prevenir o resolver el problema del hielo en una aeronave varía dependiendo del tipo de hielo que se forme y las partes críticas que se vean afectadas. Teniendo en cuenta esto, el hielo puede generar diversos efectos negativos en las aeronaves, tales como la disminución de la capacidad de sustentación, el aumento del peso y la resistencia, la necesidad de aumentar la potencia de los motores, así como el potencial fallo en el funcionamiento de ciertos instrumentos en la cabina (Comandancia Departamento del Ejército Washington, 1982).

Es fundamental comprender el origen y las repercusiones de este fenómeno en una aeronave, ya que nos permite desarrollar técnicas y sistemas de protección efectivos para prevenir o mitigar sus efectos. Dentro de este amplio tema, existen conceptos importantes para tener en cuenta, siendo el factor principal la presencia de nubes y congelación de gotas de agua que impactan a la aeronave (Retallack, 1984).

El tema del congelamiento en las aeronaves ha sido abordado por varias fuentes bibliográficas, las cuales han proporcionado valiosa información sobre los diversos aspectos relacionados con este fenómeno. Uno de los factores fundamentales para considerar es la presencia de nubes. De acuerdo con Tan *et al.* (2017), se han identificado dos tipos de nubes que tienen una influencia significativa en la formación de hielo en las aeronaves: las cumuliformes y las estratiformes. Estas nubes presentan temperaturas medias de  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , respectivamente. Aunque comparten características similares, existe una diferencia crucial: el contenido de agua líquida (LWC, por sus siglas en inglés). Cuanto mayor sea el contenido de agua líquida en las nubes, mayor será la formación de hielo sobre la aeronave.

Además, es importante tener en cuenta el tipo de hielo que puede formarse en la estructura de la aeronave y por qué es fundamental prevenirlo o controlarlo en tierra para evitar causar la pérdida de *performance* o daños mecánicos, y así mantener la seguridad y eficiencia aérea (EASA, 2017). Como afirma Jeck (1983), en su base de datos de variables de las nubes y sus implicaciones en la formación de hielo en aviones, es común encontrar cristales de hielo en las capas superiores de la atmósfera, específicamente en las nubes altas que se desarrollan a altitudes superiores a los 20.000 pies (6096 metros) y que están compuestas principalmente por estos cristales de hielo.

A pesar de que la acumulación de cristales de hielo en el fuselaje no se clasifica como un riesgo crítico, es de vital importancia considerar sus efectos en múltiples componentes esenciales de la aeronave, estos incluyen los compresores de aire, las superficies de sustentación, tanto primarias como secundarias, el tren de aterrizaje, las sondas de presión total y los sistemas de motor y/o entrada de este (Cuesta, 1991). Es crucial reconocer que esta influencia adquiere una relevancia significativa, especialmente en situaciones donde se presentan cambios abruptos en la dirección del flujo de aire, aumento en la velocidad del aire y la velocidad de la aeronave (Cáceres, 2017).

Considerando la causa, el tipo de hielo que puede formarse alrededor de la estructura y el posible impacto en la aeronave, se han desarrollado diversos sistemas, con el propósito de abordar este problema de manera limitada. Según Landsberg *et al.* (2004), se distinguen dos tipos de sistemas: el primero es el sistema antihielo, que tiene como objetivo prevenir la formación de glaseado; el segundo es el sistema de deshielo, que actúa una vez que el glaseado está presente en la aeronave.

Basándonos en lo anterior, en este artículo se abordarán diversos temas que nos permitirán comprender de forma clara y concisa la formación del hielo en las aeronaves. Nos enfocaremos en los factores que influyen en la formación de hielo, seguido de las técnicas de investigación utilizadas para evaluar su impacto en el rendimiento de las aeronaves. Además, se explorarán los diferentes sistemas que las aeronaves

pueden emplear para prevenir o eliminar el hielo, considerando los diversos mecanismos y fluidos que utilizan dichos sistemas. Por último, se expondrán las conclusiones del presente artículo

## Metodología

La formación de hielo en aeronaves plantea un desafío de importancia crítica en el campo de la aviación. Se trata de un fenómeno de naturaleza compleja y potencialmente peligrosa que se manifiesta cuando, en medio de condiciones climáticas adversas, la superficie de una aeronave se ve cubierta por una capa de hielo durante su vuelo. La acumulación de hielo en las distintas partes de la aeronave puede tener implicaciones sumamente serias en lo que respecta a su seguridad y su capacidad de desempeño, afectando aspectos esenciales como su aerodinámica, estabilidad y control.

Esta metodología se desarrolla con el objetivo de abordar en detalle los diferentes aspectos relacionados con el helamiento en aeronaves. A través de un enfoque riguroso y sistemático, se busca comprender los mecanismos de formación de hielo, analizar los tipos de helamiento, evaluar las condiciones atmosféricas propicias y explorar estrategias de prevención y mitigación. Además, se considerarán sistemas de protección contra el hielo y su eficacia en la lucha contra este fenómeno.

Para lograr una comprensión completa, se investigan fuentes académicas, literatura especializada y publicaciones científicas en español e inglés. A través de este análisis multidimensional, se examinan los riesgos asociados con el helamiento en aeronaves y se identifican soluciones efectivas para abordar este desafío. Con el fin de proporcionar una base sólida y práctica, se incluyen ejemplos de casos reales que ilustran cómo estas estrategias se aplican en situaciones reales y su impacto en la seguridad y el rendimiento de las aeronaves.

La presente metodología se presenta como una guía detallada que permitirá explorar de manera

sistemática los componentes esenciales del helamiento en aeronaves. A través de este enfoque estructurado, se aspira a generar un conocimiento sólido y práctico que contribuya a una comprensión profunda de este fenómeno y sus implicaciones en la industria de la aviación.

- 1. Recolección de información:** se lleva a cabo una revisión exhaustiva de fuentes académicas, libros especializados y publicaciones científicas relacionadas con el helamiento en aeronaves. La información será recopilada tanto en español como en inglés para asegurar una comprensión completa del tema.
- 2. Análisis de mecanismos de formación de hielo:** se investigan y describen en detalle los distintos mecanismos de formación de hielo en aeronaves, incluyendo el helamiento estructural y el de carburador. Se identifican los factores que contribuyen a cada tipo de helamiento y se analizan sus consecuencias en la seguridad y rendimiento de la aeronave.
- 3. Tipos de helamiento y condiciones atmosféricas:** se clasifican y explican los diferentes tipos de helamiento, considerando las variaciones en las condiciones atmosféricas que conducen a su formación. Se examinan factores como la temperatura, la humedad y la altitud que influyen en la presencia de hielo en la superficie de la aeronave.
- 4. Identificación de zonas críticas:** se realiza un estudio detallado de las zonas críticas de una aeronave que son especialmente propensas al helamiento, como las alas, los estabilizadores y las superficies de control. Se explica cómo el hielo en estas áreas puede afectar la aerodinámica y el control de la aeronave.
- 5. Estrategias de prevención y mitigación:** se exploran las estrategias existentes para prevenir y mitigar el helamiento en aeronaves. Se discuten en profundidad los sistemas de protección contra el hielo, como la calefacción de superficies y los sistemas hidrofóbicos. Además, se analizan los sistemas de descongelación utilizados para combatir la acumulación de hielo en vuelo.

6. **Comparación y evaluación de sistemas de protección:** se lleva a cabo una comparación crítica de los diferentes sistemas de protección contra el hielo y de descongelación disponibles en términos de eficacia, complejidad y aplicabilidad en diversas situaciones climáticas.
7. **Aplicación práctica y estudios de caso:** se presentan ejemplos de casos reales en los que el helamiento ha tenido un impacto en la seguridad y operatividad de aeronaves. Se analizan cómo las estrategias de prevención y mitigación han sido aplicadas en estas situaciones y su efectividad.
8. **Conclusiones y futuras investigaciones:** se resumen los hallazgos clave de la investigación y se destaca la importancia de abordar el helamiento en aeronaves. Se identifican áreas que requieren investigaciones futuras y posibles innovaciones en la prevención y mitigación del helamiento.

Mediante esta metodología, se pretende ofrecer una comprensión exhaustiva y sólida del fenómeno de helamiento en aeronaves, sus mecanismos, efectos y estrategias para enfrentarlo.

## Mecanismos de formación de hielo en las aeronaves

La formación de hielo en las aeronaves ocurre por condiciones atmosféricas frías y húmedas. El hielo se acumula en diversas áreas que afectan el rendimiento y la seguridad de la aeronave, este tiene la capacidad de cambiar la configuración aerodinámica del avión en pocos segundos, afectar los controles de vuelo y por esta razón conducir incluso a la muerte (Vivas, 2016). Por lo tanto, es de vital importancia conocer los mecanismos de formación de hielo que permitan tener un protocolo de prevención y actuación frente a este problema. Esta acumulación de hielo es producida generalmente a partir de las siguientes condiciones.

Cuando en las aeronaves una parte de su estructura está a una temperatura por debajo del punto de congelación del agua (por lo general, 0 °C y 1atm de

presión), si impacta agua líquida en ella, puede formar hielo (EASA, 2017). Cuando la aeronave se encuentra en vuelo, el hielo tiende a formarse cerca del borde de ataque de los planos, el parabrisas, antenas, entradas del motor y hélices (Vivas, 2016). Las gotas de agua en suspensión en las nubes con una temperatura por debajo del punto de congelación del agua no siempre se convierten en hielo. Si no hay partículas alrededor de las cuales puedan formar hielo, las gotas de agua pueden permanecer sobre enfriadas en forma líquida hasta una temperatura de -40 °C (EASA, 2017). Estas gotas de agua sobreenfriadas se encuentran frecuentemente en nubes convectivas con temperaturas desde justo por debajo del punto de congelación, hasta temperaturas de unos -10 °C. Llamamos nubes convectivas a las que se han formado debido al fenómeno de la convección, pueden llegar hasta el nivel de la tropopausa (zona de transición entre la troposfera y la estratosfera, que se sitúa entre los 9 km y 17 km de altitud), como resultado de un fuerte calentamiento. En relación con lo anterior, las corrientes convectivas son creadoras de nubes copiosas llamadas cúmulos. También pueden formar nubes tormentosas llamadas cumulonimbus (Švancárová y Jarošová, 2022). Los cúmulos tienen aspecto de colinas o torres. Están formados por gotas de agua primarias, pero en sus puntas también podemos encontrar cristales de hielo. Por lo general, la lluvia suele caer de los cúmulos y estos son anteriores a las nubes de tormenta. Pueden tener grandes proporciones, pero también pueden ser pequeñas (Švancárová & Jarošová, 2022). Las nubes convectivas por excelencia son los cumulonimbus (Cb, por su abreviatura), que son las que se encuentran en la etapa última del desarrollo de un cumulus (Cu, por su abreviatura). Su definición, según la Organización Meteorológica Mundial y que se encuentra expresado en (Alemán y Alomar, 2011, p 13):

Nube compacta y densa, con un desarrollo vertical considerable, en forma de montaña o de enormes torres. Parte de su cima es generalmente lisa, fibrosa o estriada, y casi siempre aplastada; esta parte se extiende a menudo en forma de yunque o de vasto penacho. Por debajo de la base de esta nube, a menudo

muy oscura, aparecen con frecuencia nubes bajas desgarradas, unidas o no con ella, y precipitaciones, a veces en forma de virga (que presenta un aspecto alargado y delgado, similar a un hilo o una cola que se extiende hacia abajo desde la nube principal).

Las nubes convectivas pueden ser extremadamente perjudiciales para las aeronaves, puesto que pueden producir peligros en ruta materializados en fenómenos tales como granizo, el propio helamiento, turbulencia y demás (Moreno, 2019). Es común encontrar altas concentraciones de agua líquida sobreenfriada en la parte superior de los cúmulos, que poseen un significativo desarrollo vertical y normalmente contienen una mayor proporción de gotas de agua sobreenfriada (EASA, 2017).

Se observa comúnmente que la condensación no ocurre en el punto de ebullición de la sustancia, y la congelación no ocurre en el punto de fusión de la sustancia, sino que requiere un exceso de subenfriamiento o superenfriamiento (Espinosa, 2019). Y es cuando esta agua sobreenfriada impacta con las superficies de la aeronave, que se convierte en estado sólido y genera acumulación de hielo en el borde de ataque de la aeronave, el estabilizador horizontal, la entrada de los motores y los sensores expuestos, como la sonda Pitot. Sin embargo, al momento del impacto de la gota con alguna parte de la aeronave, la gota no cristaliza inmediatamente, porque libera una cierta cantidad de calor que se enfrenta a la temperatura ambiente, lo que sumado al tamaño de la gota, afecta más o menos la velocidad de congelación (Retallack, 1984). La cantidad de gotas de agua determinarán el tamaño de la capa de hielo que se pueda conformar, así como su tamaño también influirá en la rapidez de solidificación.

Cabe resaltar que, a mayor tiempo de solidificación del hielo, este se formará con mayor resistencia y aumentará así el peligro, debido a la dificultad para eliminarlo una vez haya sido creado (Vivas, 2016). La presencia de ciertas partículas existentes en la atmósfera facilita la nucleación heterogénea de las gotas de agua super enfriadas al ayudar a superar las fuerzas de tensión superficial, favoreciendo la formación de cristales de hielo a temperaturas por debajo de  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Ayón *et al.*, 2022). Lo que ocasiona que partículas en el aire como el polvo contribuyan a la formación de cristales de hielo en las nubes a partir de las gotas de agua sobreenfriadas.

Según la FAA (2015), en su reporte 91-74B, existen varios tipos de formación de hielo en aeronaves (figura 1) que se definen como:

- **Icing de formación:** también conocido como “icing claro”. Ocurre cuando el agua líquida se enfría y se congela al entrar en contacto con la superficie de una aeronave a una temperatura inferior al punto de congelación. Este tipo de *icing* puede formar una capa de hielo lisa y transparente en la aeronave, lo cual puede afectar negativamente su rendimiento aerodinámico.
- **Icing de escarcha:** este tipo de formación de hielo ocurre cuando pequeñas gotas de agua en suspensión en el aire se enfrían y se congelan al entrar en contacto con la superficie de una aeronave a una temperatura inferior al punto de congelación. La escarcha resultante puede tener una apariencia rugosa y esponjosa, lo que puede alterar el flujo de aire sobre la aeronave y provocar una pérdida de sustentación.

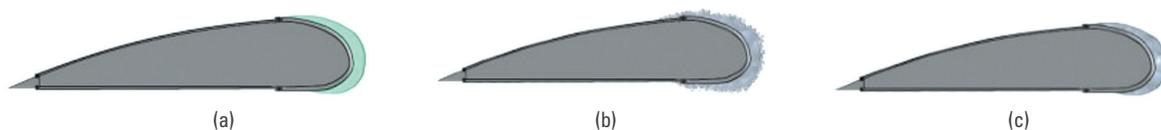


Figura 1. Tipos de formación de hielo en el ala  
(a) *Icing* de formación, (b) *Icing* de escarcha y granulado, (c) *Icing* de cristales de hielo

Fuente: adaptado de FAA (2015, pp. 21-22).

- **Icing de nieve:** ocurre cuando la nieve se adhiere a la superficie de una aeronave. Esto puede suceder durante la precipitación de nieve o cuando la aeronave atraviesa una capa de nubes que contiene cristales de hielo. La acumulación de nieve en la aeronave puede aumentar su peso y alterar su perfil aerodinámico.
- **Icing de hielo granulado:** también conocido como “icing en ráfaga”, es similar al icing de escarcha. Se produce cuando pequeñas partículas de hielo en suspensión en el aire se adhieren a la aeronave. Estas partículas de hielo pueden tener forma irregular y causar una acumulación desigual en la superficie de la aeronave, lo que puede afectar su estabilidad y control.
- **Icing de cristales de hielo:** este tipo de formación de hielo ocurre en condiciones de nubes compuestas principalmente por cristales de hielo. Estos cristales pueden adherirse a la aeronave y formar una capa de hielo irregular. El icing de cristales de hielo es un fenómeno complejo y puede tener un impacto significativo en la aeronave, especialmente en las zonas donde el flujo de aire es más lento.

A medida que la acumulación de hielo en las superficies y demás sistemas de la aeronave se incrementa, se experimenta una significativa pérdida de control y eficiencia. En primer lugar, la sustentación disminuye considerablemente, lo que a su vez reduce el ángulo de ataque seguro en el que la aeronave puede operar, dando lugar a un potencial riesgo. Según la Administración Federal de Aviación (FAA, 2015), el rendimiento de la aeronave solo se verá afectado si la acumulación de hielo persiste durante más de una hora. Además, es fundamental considerar el grosor del hielo, como se ilustra en la tabla 1, ya que este también influye en el

grado de severidad de la formación de hielo. Según Li *et al.* (2020, pg 8), “el rendimiento del vuelo no se verá gravemente afectado si la aeronave no permanece en un estado de formación de hielo prolongado, incluso en condiciones severas de formación de hielo”

Entonces, el grosor del hielo nos determinará el riesgo durante el vuelo, no dependerá de la tasa de formación, sino del espesor que este posea, el artículo presenta sus secciones con la premisa de entender la formación de hielo, para posteriormente compararla con los estudios recientes y definir posibles soluciones a este fenómeno que genera inconvenientes en el campo aeronáutico.

El estudio de la formación de hielo en las aeronaves abarca una gran importancia, la premisa de comprender los mecanismos de formación de hielo, sus características y su impacto en las superficies y sistemas de la aeronave es fundamental para desarrollar estrategias de prevención y mitigación. Como se ha mencionado, la acumulación de hielo en el ala y otras áreas críticas puede afectar la aerodinámica, disminuir la sustentación y alterar el control del avión. De allí que enfatizamos en el estudio detallado de la formación de hielo en las aeronaves, permitiendo el desarrollo de tecnologías y prácticas que minimicen los riesgos asociados a este fenómeno.

## Técnicas de investigación

Existen diversas técnicas utilizadas para el estudio del fenómeno del *icing* en las aeronaves. Estas técnicas permiten comprender mejor los mecanismos de formación de hielo, evaluar su impacto en el rendimiento de la aeronave y desarrollar estrategias de prevención y mitigación. A continuación, se describen algunas de las técnicas más comunes:

Tabla 1.  
Severidad del espesor del hielo

Nivel de severidad de la formación de hielo	Baja	Moderada	Alta	Severa
Espesor máximo (mm)	0.1-0.5	5.1-15	15.1-30	>30

Fuente: adaptado de Li *et al.* (2020).

## Modelos y simulaciones numéricas

Hoy día este método de investigación es cada vez más común, gracias a sus costos reducidos para la realización de investigaciones, y por sus excelentes aproximaciones a la realidad, permitiendo estudiar el comportamiento del hielo en diferentes partes de la aeronave, evaluando su impacto en el rendimiento aerodinámico. Estos modelos ayudan a optimizar el diseño de la aeronave y los sistemas de protección contra el *icing*, por ejemplo, el estudio de Wu y Cao (2013), quienes simularon las gotas de las nubes y su interacción con las superficies de la aeronave utilizando aproximaciones a soluciones de las ecuaciones Euler-Lagrange, demostrando la influencia en vuelo.

Acompañado además de modelos de simulación por computadora que consideran factores como la temperatura, la velocidad del aire, la geometría de la aeronave y las características del hielo, resultados que ayudan a comprender el fenómeno y guiar el diseño de sistemas de protección contra el *icing*, un claro ejemplo es el estudio de Li *et al.* (2020), que a partir del uso de un algoritmo de aprendizaje automático entrenado (*machine learning*, en inglés), simularon la formación de hielo sobre el borde de ataque de un perfil simétrico NACA 0012, donde después de comparar los resultados obtenidos con datos experimentales, obtuvieron muy buenas predicciones por parte del algoritmo.

Uno de los problemas de este tipo de métodos de estudio se origina al estar limitado a la complejidad del caso de estudio, en el sentido que hoy en día las aeronaves ya no utilizan perfiles simétricos, entonces su aplicación en la industria es limitada. Sin embargo, el uso del perfil simétrico permite que los cálculos en la formación de hielo no sean tan complejos, permitiendo corregir el algoritmo, lo que no sería más factible para perfiles asimétricos.

## Vuelos de investigación

Se utilizan aeronaves especialmente equipadas con instrumentos de medición para recolectar datos en tiempo real durante vuelos en condiciones de formación de hielo. Estos vuelos permiten obtener información

detallada sobre la distribución de las condiciones meteorológicas y la acumulación de hielo en la aeronave. Los datos recopilados se utilizan para mejorar la comprensión del fenómeno y validar modelos de simulación. Este método es considerado el pionero en el estudio de la formación de hielo en aeronaves, fe de ello se evidencia en uno de los primeros estudios de *icing* en aeronaves, dirigido por la NASA (Wu y Cao, 2013, p. 3).

Donde se utilizó un DHC-6 twin otter, un avión bimotor turbohélice, con el cual les fue posible realizar la toma de datos en tiempo real del comportamiento aerodinámico del avión cuando se acumulaba hielo en las superficies de control de este, el estudio conducido por Potapczuk, Mark (2013) les permitió generar soluciones al *icing* en aeronaves que para ese entonces había sido causa de más de 542 accidentes de avión.

## Túneles de viento

Los túneles de viento se utilizan para simular condiciones de vuelo y estudiar el comportamiento del hielo en diferentes partes de la aeronave. Mediante la generación controlada de condiciones de formación de hielo, se pueden evaluar los efectos aerodinámicos y estructurales de la acumulación de hielo en la aeronave. Esto ayuda a diseñar sistemas de protección contra el *icing* y optimizar la geometría de las superficies de la aeronave para minimizar la acumulación de hielo. Un ejemplo es el estudio de Shi *et al.* (2021), que demuestra las diferentes formaciones de hielo, en el ala.

## Pruebas en laboratorio

Se realizan pruebas en laboratorio utilizando modelos a escala reducida o secciones de aeronaves para estudiar el comportamiento del hielo en condiciones controladas. Estas pruebas permiten analizar las características físicas del hielo, como su adherencia, estructura y resistencia, así como evaluar la eficacia de los sistemas de protección contra el *icing*. Por ejemplo, Ma *et al.* (2021) condujeron un estudio de capas para la mitigación de la formación de hielo en los bordes de ataque del ala de una aeronave, usando un túnel

de viento tipo *icing*, que se encuentra en el *Advance Flow Diagnostics & Experimental Aerodynamics Laboratory*, de la Iowa State University; uno de los pocos laboratorios que estudian el *icing* sobre las aeronaves, del mundo.

## Investigación teórica y experimental

Se realizan estudios teóricos y experimentales para analizar los mecanismos físicos involucrados en la formación de hielo en aeronaves. Esto incluye la investigación de la termodinámica de las nubes, el proceso de nucleación y crecimiento de los cristales de hielo, y la interacción entre el hielo y la superficie de la aeronave. Estos estudios proporcionan conocimientos fundamentales sobre el fenómeno del *icing* y guían el desarrollo de tecnologías y estrategias de prevención. Por ejemplo, el libro de Pruppacher y Klett, (2010) aborda los procesos de nucleación y formación de nubes, además de su composición e interacción con el medio, con esto es posible entender de forma esencial el fenómeno y dar posibles soluciones.

## Sistemas antihielo y deshielo

En determinadas condiciones atmosféricas la formación de hielo puede producirse rápidamente en superficies de control, así como en entradas de aire, por lo que estudios experimentales como los de Andreev t Bogatyrev (2014), hacen posible la idea de la prevención y eliminación más precisa de la formación de hielo en una aeronave, así como los sistemas para implementarse a partir de una clasificación de aeronaves, considerando el “grado de necesidad e instalación óptima del sistema de protección contra hielo” (IPS, por sus siglas en inglés), en función de las condiciones atmosféricas en las que una aeronave se someta sin que el funcionamiento de estos sistemas se vea afectado, y pueda mantenerse el rendimiento y control en vuelo. La idea de una predicción del engelamiento que se causa sobre una superficie es inexacta, debido a la imposibilidad de la toma de dimensiones y

densidad de todas las gotas de agua que lleguen a haber al atravesar las nubes (Vivas, 2016). Sin embargo, es posible evitar el engelamiento identificando su mecanismo de acción para así minimizar sus efectos (Cáceres, 2017). Así como determinar las zonas de mayor riesgo de engelamiento para de esta forma huir mediante un vuelo a distinto nivel o con el accionamiento de los sistemas de protección contra hielo (Vivas, 2016). Dichos sistemas de protección pueden clasificarse en tres procedimientos: **mecánicos, térmicos y químicos**.

Los **sistemas térmicos** utilizan fuentes de calor, ya sean: energías eléctricas, fuentes calefactoras y/o el aire caliente del motor que son distribuidas a través de las superficies de control y estos pueden actuar como sistemas antihielo o deshielo, según la función que se desee satisfacer en vuelo. En contraste con el IPS de pulsos, este sistema tiene un consumo considerable, sin embargo, tiene más variedades en las configuraciones de aplicación; estos sistemas usualmente se utilizan en los *slats*, en las alas, en los estabilizadores y en las entradas a los motores (FAA, 2015).

Los **sistemas de pulsos**, según la FAA: deshuelan las superficies utilizando pulsos de energía que generan movimientos rápidos de flexión en la superficie de la piel del avión, rompiendo el hielo acumulado (FAA, 2015, pp. 21-22). Se sabe que este es el menos utilizado en la industria por su complejidad, este sistema es capaz de romper la adhesión del hielo sobre las superficies, además de mantener la forma aerodinámica del ala, permitiendo que las características aerodinámicas de esta no se vean afectadas.

No requieren una fuente de calor constante, por lo que son óptimas para reducir el consumo de energía. Este sistema tiene un consumo considerable, sin embargo, tiene más variedades en las configuraciones de aplicación; estos sistemas usualmente se utilizan en los *slats*, en las alas, en los estabilizadores y en las entradas a los motores

Los **sistemas neumáticos** consisten en tubos de goma ubicados a lo largo del ala o estabilizador de la aeronave, estos se encuentran succionados por una bomba de vacío, para evitar interrupciones en el flujo a través del ala, al momento de formarse el hielo en la

aeronave, selectivamente o de forma intermitente, la bomba los infla para lograr romper la capa de hielo (figura 2).



Figura 2. Funcionamiento del sistema neumático en aeronaves  
Fuente: adaptado de FAA (2015, pp. 21-22).

Los **sistemas químicos** son procedimientos que se usan para descongelar hélices y cristales de cabina; se basan en las propiedades que presentan ciertas sustancias para bajar el punto de congelación del agua, y evitan de igual manera la formación de hielo y la disolución de este una vez formado sobre la estructura del avión (Retallack, 1984). Consta de una bomba que impulsa un anticongelante químico a través de las tuberías y conductos ubicados cerca de las áreas críticas. Estos están diseñados de manera que el fluido se distribuya uniformemente sobre las superficies que deben mantenerse libres de hielo.

Actualmente existen muchos métodos para prevenir o fracturar el hielo, como el sistema antihielo, el cual fue diseñado para prevenir la acumulación de hielo, este entra en funcionamiento antes de que se forme el hielo sobre superficies críticas de la aeronave. Por otro lado, el sistema de deshielo cuenta con botas neumáticas diseñadas para la eliminación de hielo después de estar acumulado, usualmente en las alas, los estabilizadores y los bordes de ataque.

Es importante tener en cuenta que el sistema de calefacción eléctrica de deshielo y antihielo en las aeronaves es solo una medida temporal para evitar la formación de hielo. En condiciones de precipitación continua, se requerirán otros métodos, como el uso de sistemas de pulverización de líquido deshielante o el

cambio de altitud, para evitar que el hielo se acumule en las aeronaves.

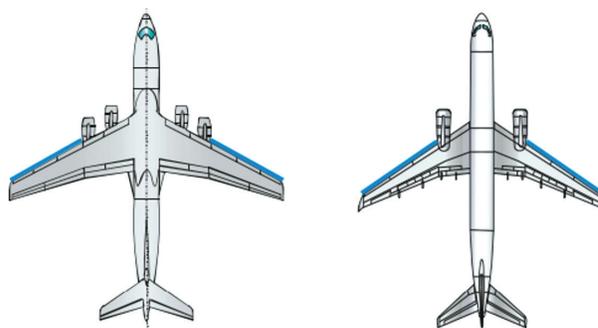
Según Andreev y Bogatyrev (2014), las zonas más afectadas son los bordes de ataque de las alas y los estabilizadores, los extradós e intradós del ala, ventanas de la cabina de los pilotos y en tubos *pitot*.

Los autores plantean una clasificación por grupos en función de las distancias operativas y tipos de alas; a partir de los cuales obtienen un acercamiento a la ubicación de formación de hielo, así como la ubicación de los sistemas de protección, estos grupos son:

- **Grupo I:** aeronaves de larga distancia y carga pesada con alas en flecha (figura 3).
- **Grupo II:** aeronaves de medio alcance con alas en flecha (figura 3).
- **Grupo III:** aeronaves de corto alcance con alas en flecha (figura 4).
- **Grupo IV:** aeronaves turbohélice de corto alcance con alas rectas (figura 4).
- **Grupo V:** aeronaves turbohélice con alas rectas para aerolíneas locales y transporte ligero (figura 5).
- **Grupo VI:** aeronaves de aviación general (figura 5).

Figura 3. Aeronaves de grupo I, II y ubicación de los IPS

### Grupo I y Grupo II



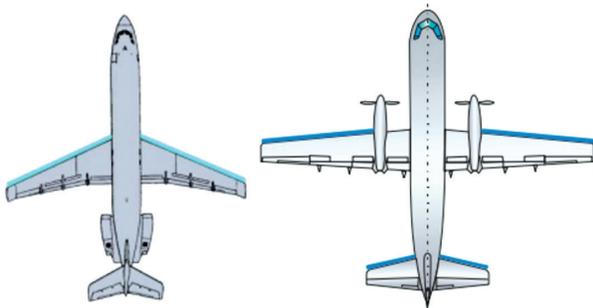
Fuente: adaptado de Andreev y Bogatyrev (2014).

Los grupos I y II (figura 1) utilizan un **sistema térmico** y un **sistema de pulsos**, ubicados parcialmente sobre las alas.

Todos los sistemas se aplican en una aeronave, principalmente considerando el grado de necesidad, esto debido a los consumos adicionales de energía y mantenimiento (Andreev y Bogatyrev, 2014).

Figura 4. Aeronaves de grupo III, IV y ubicación de los IPS

### Grupo III y Grupo IV

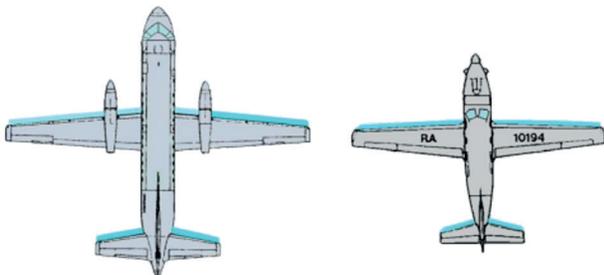


Fuente: adaptado de Andreev y Bogatyrev (2014).

El grupo III utiliza únicamente un **sistema térmico**, por otra parte, el grupo IV utiliza un **sistema térmico** y un **sistema de pulsos**.

Figura 5. Aeronaves de grupo V, VI y la ubicación de los IPS

### Grupo V y Grupo VI



Fuente: adaptado de Andreev y Bogatyrev (2014).

El grupo V utiliza **sistemas térmicos** y **neumáticos**, por otra parte, el grupo IV utiliza un **sistema térmico** y un **sistema de pulsos**.

## Nuevas tecnologías

Se han desarrollado técnicas y sistemas de detección para identificar la presencia de condiciones de formación de hielo y su acumulación en aeronaves. Estos incluyen sensores y dispositivos de medición utilizados tanto en vuelo como en tierra, por ejemplo, el estudio realizado por Wei, *et al.* (2019), donde utilizan sensores ultrasónicos para medir el grosor de la capa de hielo, este tipo de sistemas acompañados de resultados obtenidos por las simulaciones hechas en CFD o por simulaciones numéricas, que se ajustan bastante a las condiciones que sufre el avión, puede dar como resultado sistemas de protección más efectivos, con mejores resultados.

## Resultados y métodos

Los resultados de este estudio revelaron una comprensión sólida y detallada del fenómeno de helamiento en aeronaves, en línea con los objetivos establecidos. Se logró una identificación precisa de los mecanismos de formación de hielo, junto con una descripción detallada de los factores que contribuyen a su desarrollo.

En términos de la clasificación de los tipos de helamiento, se establecieron categorías claras y definidas, considerando las características físicas y las condiciones atmosféricas asociadas con cada tipo. Se determinó que ciertas condiciones climáticas, como temperaturas cercanas a cero grados Celsius y alta humedad, favorecen la acumulación de hielo en las superficies de la aeronave.

Las zonas críticas vulnerables al helamiento fueron identificadas con precisión, incluyendo las alas, los estabilizadores y las superficies de control. Se comprendió cómo la acumulación de hielo en estas áreas puede afectar la estabilidad y el rendimiento de la aeronave, poniendo en peligro la seguridad de los vuelos.

Las estrategias de prevención y mitigación del helamiento fueron exploradas exhaustivamente. Se evaluaron sistemas de protección contra el hielo, como la calefacción de superficies y los sistemas hidrofóbicos,

así como sistemas de descongelación. Los resultados resaltan la importancia de la elección de sistemas adecuados según las condiciones climáticas y el tipo de helamiento.

En la comparación de sistemas de protección contra el hielo, se evidenciaron diferencias en términos de eficacia y complejidad. Se observó que ciertos sistemas eran más efectivos en condiciones específicas, lo que subraya la necesidad de considerar factores contextuales al implementar estrategias de protección.

## Métodos

- a) **Revisión bibliográfica:** se llevó a cabo una búsqueda de literatura científica, libros especializados y publicaciones relevantes sobre el helamiento en aeronaves. La revisión se realizó en inglés y en español para asegurar la inclusión de fuentes pertinentes.
- b) **Clasificación y análisis de tipos de helamiento:** se analizaron casos de helamiento en distintos tipos de aeronaves y condiciones climáticas. Se categorizaron los tipos de helamiento y se describieron sus características físicas y condiciones asociadas.
- c) **Análisis de condiciones atmosféricas:** se recopiló datos climáticos relacionados con la formación de hielo en aeronaves. Se evaluaron parámetros como temperatura, humedad y altitud para identificar patrones asociados al helamiento.
- d) **Identificación de zonas críticas:** se estudiaron manuales técnicos de aeronaves y se consultaron expertos en aeronáutica para identificar las áreas más vulnerables al helamiento y comprender su impacto en el vuelo.
- e) **Exploración de estrategias de prevención y mitigación:** se analizaron sistemas de protección contra el hielo existentes y se evaluó su aplicabilidad en diferentes escenarios. Se investigaron técnicas de calefacción de superficies y sistemas de descongelación.
- f) **Comparación de sistemas de protección:** se realizó una comparación detallada de los sistemas

de protección contra el hielo en función de su eficacia y complejidad. Se utilizaron datos reales y simulaciones para evaluar su desempeño.

La combinación de estos métodos permitió alcanzar los objetivos propuestos y generar conocimiento valioso sobre el helamiento en aeronaves, desde su formación hasta las estrategias para enfrentarlo.

## Conclusiones

La formación de hielo en aeronaves es un fenómeno climático peligroso que puede afectar significativamente la seguridad y el rendimiento de las aeronaves. Durante el vuelo, las aeronaves están expuestas a diversas condiciones meteorológicas, incluyendo temperaturas bajas y presencia de nubes y precipitación. Estas condiciones pueden propiciar la formación de hielo en la superficie de la aeronave, lo cual puede comprometer la capacidad de vuelo y la estabilidad aerodinámica.

El estudio del fenómeno de *icing* ha sido objeto de una amplia investigación científica y técnica. Los expertos han buscado comprender los mecanismos físicos que están involucrados en la formación de hielo en aeronaves, así como desarrollar técnicas y sistemas de protección efectivos para prevenir o mitigar sus efectos.

Varias fuentes bibliográficas han abordado el tema del *icing* en aeronaves, proporcionando información valiosa sobre los diferentes aspectos relacionados con este fenómeno.

El fenómeno del *icing* en aeronaves ha sido objeto de una amplia investigación científica y técnica en las últimas décadas. Los estudios se han centrado en comprender los mecanismos físicos de formación de hielo, desarrollar técnicas de detección y prevención, así como mejorar el diseño y funcionamiento de sistemas de protección contra el *icing*. A continuación, se presenta un estado del arte sobre la investigación en *icing aircraft*, junto con referencias bibliográficas relevantes.

## Referencias

- Adsuar, J. C. (2003). *Meteorología: conocimientos teóricos para la licencia de piloto* (2.ª ed.). Ediciones Parainfo.
- Alemán, J. J. y Alomar, M. (2011). *Convección atmosférica*. Asociación Canaria de Meteorología.
- Andreev, G. & Bogatyrev, V. (2014). *Investigation of icing effects on aerodynamic characteristics of aircraft at tsagi*. 29th Congress of The International Council of the Aeronautical Sciences.
- Ayón, A., Salomón, J., Llanes, J. y Sierra, L. (2022). *Pronóstico de engelamiento de aeronaves en la región de información de vuelos de Cuba*. *Ingeniería energética*. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1815-59012022000300048&lng=es&tlng=pt](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59012022000300048&lng=es&tlng=pt)
- Cáceres, R. (2017). *Meteorología aplicada a la seguridad de las operaciones aéreas*. Escuela de Posgrados de la Fuerza Aérea Colombiana.
- Comandancia Departamento del Ejército de Washington. (1982). *Meteorología para aviadores militares. Manual de operaciones n.º FM 1-230, DC, 14.1-14.19*.
- Cuesta, M. (1991). Cinco condiciones ambientales adversas para el vuelo. *Revista de Aeronáutica y Astronáutica*. <https://www.divulgameteo.es/fotos/meteoroteca/5-condiciones-adversas.pdf>
- EASA. (2017). *Formación de hielo en vuelo. GA10*. <https://www.easa.europa.eu/en/downloads/24118/es#:~:text=Cuando%20en%20una%20aeronave%20una,general%2C%20es%20f%C3%A1cil%20de%20ver>
- Espinosa, J. (2019). *Nucleación de sólidos cristalinos por simulación*. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=230047>
- FAA. (2015). *AC 91-74B, Pilot Guide: Flight in Icing Conditions*. [https://www.faa.gov/documentlibrary/media/advisory\\_circular/ac\\_91-74b.pdf](https://www.faa.gov/documentlibrary/media/advisory_circular/ac_91-74b.pdf)
- Jeck, R. K. (1983). *A New Data Base of Supercooled Cloud Variables for Altitudes up to 10,000 Feet AGL and the Implications for Low Altitude Aircraft Icing*. FAA.
- Landsberg, B., Murphy, K., Bell, L., Ells, S. & Hummel, K. (2004). *Aircraft Deicing and Anti-icing Equipment*. AOPA Air Safety Foundation.
- Li, S., Qin, J., He, M. & Paoli, R. (2020). Fast Evaluation of Aircraft Icing Severity Using Machine Learning Based on XGBoost. *Aerospace*, 18.
- Ma, L., Zhang, Z., Gao, L., Liu, Y. & Hu, H. (2021). Bio-Inspired Icephobic Coatings for Aircraft Icing Mitigation: A Critical Review. *Progress in Adhesion and Adhesives*, 6, 171-201.
- Moreno, N. (2019). *Estructura metodológica para el estudio de imágenes satelitales en la identificación de nubes convectivas que surgen en la aviación*. <http://hdl.handle.net/11349/22529>
- Potapczuk, Mark. (2013). Aircraft Icing Research at NASA Glenn Research Center. *Journal of Aerospace Engineering*, 26, 260-276. 10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0000322.
- Pruppacher, H. & Klett, J. (2010). *Microphysics of Clouds and Precipitation*. Springer Science & Business Media.
- Retallack, B. J. (1974). *Compendio de meteorología. Volumen I, parte II. Meteorología aeronáutica*. Organización Meteorológica Mundial (OMM).
- Shi, L., Feng, F., Guo, W. & Li, Y. (2021). Research and Development of a Small-Scale Icing Wind Tunnel Test System for Blade Airfoil Icing Characteristics. *International Journal of Rotating Machinery*, 12.
- Švancárová, N. & Jarošová, M. (2022). *Impact of clouds on the aviation, práce a štúdie*. University of Žilina.
- Tan, W., Cao, Y. & Wu, Z. (2017). *Aircraft icing: an ongoing threat to aviation safety*. Aerospace Science and Technology.
- Vivas, E. O. (2016). ¿Cómo afecta el hielo el vuelo de un avión? *TecnoESUFA: Revista de Tecnología Aeronáutica*, 24. <https://publicacionesfac.com/index.php/TecnoESUFA/article/view/511>
- Wei, K., Yang, Y., Hongyan, Z. & Zhong, D. (2019). A review on ice detection technology and ice elimination technology for wind turbine. *Wiley*, 25.
- Wu, Z. & Cao, Y. (2013). Numerical simulation of airfoil Aerodynamic Penalties and Mechanisms in Heavy Rain. *Advances in Mechanical Engineering*, 13.

# Evaluación de las celdas de hidrógeno como alternativa al queroseno en la aviación: un enfoque hacia la sostenibilidad energética aeronáutica

| Fecha de recibido: 18 de julio 2023 | Fecha de aprobado: 12 de septiembre 2023 |

| Reception date: July 18, 2023 | Approval date: September 12, 2023 |

| Data de recebimento: 18 de julho de 2023 | Data de aprovação: 12 de setembro de 2023 |

## Luisa Fernanda Mónico Muñoz

<https://orcid.org/0000-0002-3597-6332>  
Luisa.monico@libertadores.edu.co

Doctora en Sistemas Propulsivos en Medios de Transporte  
Docente Tiempo Completo – Fundación  
Universitaria Los Libertadores, Colombia  
Rol del investigador: teórico y escritura

Grupo de investigación en diseño, análisis y desarrollo de sistemas de ingeniería (GIDAD)

PhD in Propulsive Systems in Means of Transportation

Full Time Teacher - Fundación Universitaria Los Libertadores, Colombia

Researcher's role: theoretical and writing

Research group in design, analysis and development of engineering systems (GIDAD).

Doutorado em Sistemas Propulsivos em Meios de Transporte

Professor em tempo integral - Fundação Universitaria Los Libertadores, Colombia

Função do pesquisador: teórico e redação

Grupo de pesquisa em design, análise e desenvolvimento  
de sistemas de engenharia (GIDAD).

## Sofía Guadalupe Ríos Esparza

sofia.riosparza@gmail.com

Estudiante

Instituto Tecnológico de Hermosillo, México  
Rol del investigador: teórico y escritura

Student

Hermosillo Institute of Technology, Mexico  
Role of the researcher: theoretical and writing

Estudiante

Instituto Tecnológico de Hermosillo, México  
Função do pesquisador: teórica e redação

**Cómo citar este artículo:** Mónico Muñoz, L. F., y Ríos Esparza, S. G. (2023). Evaluación de las celdas de hidrógeno como alternativa al queroseno en la aviación: un enfoque hacia la sostenibilidad energética aeronáutica. *Ciencia y Poder Aéreo*, 19(1), 81-99. <https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaereo.793>



## Evaluación de las celdas de hidrógeno como alternativa al queroseno en la aviación: un enfoque hacia la sostenibilidad energética aeronáutica

## Evaluation of hydrogen cells as an alternative to kerosene in aviation: an approach towards aeronautical energy sustainability

**Resumen:** Este estudio se enfoca en analizar en detalle el uso de celdas de hidrógeno como una posible alternativa al queroseno, el combustible tradicionalmente empleado en la aviación, con el propósito de enfrentar los desafíos relacionados con la sostenibilidad energética en el ámbito aeronáutico. La investigación se centra en evaluar tanto el impacto ambiental como la viabilidad a largo plazo al adoptar celdas de hidrógeno en la industria de la aviación.

En primer lugar, se examina el impacto ambiental de las celdas de hidrógeno en comparación con el queroseno. Se analizan los beneficios potenciales en términos de reducción de emisiones de carbono y contaminantes atmosféricos, lo que podría contribuir significativamente a la mitigación del cambio climático y la mejora de la calidad del aire en las áreas cercanas a los aeropuertos y las rutas de vuelo. Estos beneficios se basan en el hecho de que las celdas de hidrógeno producen energía mediante reacciones químicas que generan vapor de agua.

Sin embargo, también se consideran los desafíos asociados con la producción y el suministro sostenible del hidrógeno. Para que las celdas de hidrógeno sean una opción viable a largo plazo en la aviación, se necesita una infraestructura adecuada para producir, almacenar y distribuir el hidrógeno de manera sostenible. Esto implica superar obstáculos como la generación de hidrógeno a partir de fuentes renovables, el desarrollo de tecnologías de almacenamiento seguras y eficientes y la implementación de una red de suministro que abarque los aeropuertos y las rutas de vuelo.

Los resultados obtenidos en este estudio proporcionan una información fundamental de la viabilidad de las celdas de hidrógeno y, así mismo, comparar las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas al uso de celdas de hidrógeno en relación con el queroseno. Se destacan sus posibilidades para abordar los desafíos de sostenibilidad en el sector aeronáutico, lo que puede conducir a una reducción significativa de las emisiones de carbono y sus contaminantes atmosféricos. Sin embargo, se subraya la importancia de superar los desafíos asociados con la producción y el suministro sostenible de hidrógeno para garantizar la viabilidad a largo plazo de esta tecnología en la aviación.

**Palabras clave:** hidrógeno; celdas de combustible; queroseno; aviación; emisiones; renovable; contaminación; transporte aéreo; sostenibilidad energética.

**Abstract:** This study focuses on analyzing in detail the use of hydrogen cells as a possible alternative to kerosene, the fuel traditionally used in aviation, in order to meet the challenges related to energy sustainability in the aeronautical field. The research focuses on assessing both the environmental impact and the long-term viability of adopting hydrogen cells in the aviation industry.

First, the environmental impact of hydrogen cells compared to kerosene is examined. The potential benefits in terms of reducing carbon emissions and air pollutants are analyzed, which could contribute significantly to climate change mitigation and improved air quality in areas near airports and flight routes. These benefits are based on the fact that hydrogen cells produce energy through chemical reactions that generate water vapor.

However, the challenges associated with the production and sustainable supply of hydrogen are also considered. For hydrogen cells to be a viable long-term option in aviation, adequate infrastructure is needed to produce, store and distribute hydrogen sustainably. This involves overcoming obstacles such as the generation of hydrogen from renewable sources, the development of safe and efficient storage technologies, and the implementation of a supply network covering airports and flight routes.

The results obtained in this study provide an informed information on the viability of hydrogen cells and also compare the greenhouse gas emissions associated with the use of hydrogen cells in relation to kerosene. It highlights its potential to address sustainability challenges in the aeronautical sector, which can lead to a significant reduction in carbon emissions and air pollutants. However, it underlines the importance of overcoming the challenges associated with the production and sustainable supply of hydrogen to ensure the long-term viability of this technology in aviation.

**Keywords:** Hydrogen; fuel cells; kerosene; aviation; emissions; renewable; pollution; air transport; energy sustainability.

## Avaliação das células de hidrogénio como alternativa à parafina na aviação: uma abordagem para a sustentabilidade energética da aviação

**Resumo:** Este estudo centra-se na análise pormenorizada da utilização de células de hidrogénio como uma possível alternativa à parafina, o combustível tradicional utilizado na aviação, a fim de enfrentar os desafios relacionados com a sustentabilidade energética na aviação. A investigação centra-se na avaliação do impacto ambiental e da viabilidade a longo prazo da adoção de células de hidrogénio na indústria da aviação.

Em primeiro lugar, é examinado o impacto ambiental das pilhas de hidrogénio em comparação com a parafina. São analisados os potenciais benefícios em termos de redução das emissões de carbono e de poluentes atmosféricos, que poderão contribuir significativamente para a atenuação das alterações climáticas e para a melhoria da qualidade do ar nas zonas próximas dos aeroportos e das rotas de voo. Estes benefícios baseiam-se no facto de as células de hidrogénio produzirem energia através de reacções químicas que geram vapor de água.

No entanto, são também considerados os desafios associados à produção e ao fornecimento sustentáveis de hidrogénio. Para que as células de hidrogénio sejam uma opção viável a longo prazo na aviação, é necessária uma infraestrutura adequada para produzir, armazenar e distribuir o hidrogénio de forma sustentável. Para tal, é necessário ultrapassar obstáculos como a produção de hidrogénio a partir de fontes renováveis, desenvolver tecnologias de armazenamento seguras e eficientes e implementar uma rede de abastecimento que abranja aeroportos e rotas de voo.

Os resultados obtidos neste estudo fornecem informações fundamentadas sobre a viabilidade das células de hidrogénio e comparam as emissões de gases com efeito de estufa associadas à utilização de células de hidrogénio em relação à parafina. Destacam o seu potencial para enfrentar os desafios da sustentabilidade no sector da aviação, o que pode levar a reduções significativas das emissões de carbono e de poluentes atmosféricos. No entanto, sublinha a importância de ultrapassar os desafios associados à produção e ao fornecimento sustentáveis de hidrogénio para garantir a viabilidade a longo prazo desta tecnologia na aviação.

**Palavras-chave:** hidrogénio; pilhas de combustível; parafina; aviação; emissões; renováveis; poluição; transporte aéreo; sustentabilidade energética.

## Introducción

En los últimos años, la búsqueda de alternativas más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente en la industria de la aviación ha adquirido una importancia creciente. La quema de queroseno, principal combustible utilizado en las aeronaves convencionales, ha sido responsable de una gran parte de las emisiones de gases de efecto invernadero y de la contaminación atmosférica en todo el mundo, debido al gran número de aeronaves que operan diariamente.

Por lo anterior, las celdas de hidrógeno han surgido como una prometedora alternativa para reemplazar al queroseno en la aviación. Según Firestone (2023), las celdas de hidrógeno, también conocidas como celdas de combustible, son dispositivos electroquímicos que convierten la energía química del hidrógeno y el oxígeno en electricidad y calor. Al ser un elemento que es posible encontrarlo en grandes cantidades en el planeta tierra, y al ser muy amigable con el medio ambiente, ya que no genera importantes cantidades de emisiones contaminantes durante todo su ciclo de vida, lo convierte en una muy buena opción de fuente de energía alternativa.

La idea de utilizar celdas de hidrógeno en el ámbito aeronáutico no es nueva. Desde hace varias décadas se han realizado investigaciones y desarrollos en este campo, pero ha sido en los últimos años que ha ganado mayor atención debido al aumento de la conciencia sobre la necesidad de abordar el cambio climático y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Diversos estudios han demostrado que las celdas de hidrógeno pueden ofrecer beneficios significativos en términos de sostenibilidad energética aeronáutica. Al utilizar hidrógeno como combustible, los niveles de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), principales causantes del calentamiento global se reducirían considerablemente, ya que la única emisión producida por las celdas de hidrógeno es agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ), es decir, a diferencia de los combustibles de origen fósil, no generarían, azufre, óxidos de nitrógeno, partículas de materia u otro tipo de contaminantes (Adler y Martins, 2023).

Es por lo anterior, que la evaluación de las celdas de hidrógeno como alternativa al queroseno en la aviación es un tema de vital importancia para avanzar hacia una industria aeronáutica más sostenible y respetuosa con el medio ambiente. El presente trabajo se enfocará en recopilar los aspectos clave relacionados con esta tecnología, con el objetivo de proporcionar información relevante y contribuir al desarrollo de soluciones energéticas más limpias y eficientes para la aviación del futuro.

Esta investigación tiene como objetivos específicos informar las diferentes alternativas que existen para poder almacenar y crear hidrógeno cuidando las propiedades de este y, a su vez, procurando la economía de este cumpliendo con los requerimientos para la aviación. De igual modo, se busca comparar entre los diferentes tipos de almacenamiento, la generación, tipos de celdas y costos para que el beneficiario pueda equiparar estas características y tomar la mejor alternativa dependiendo el producto que se busca realizar, teniendo en cuenta las ventajas y desventajas que se tiene al momento de producir hidrógeno.

## Metodología

La investigación adopta un enfoque cualitativo para explorar las perspectivas y experiencias de los actores relevantes, y se basa en una revisión teórica para proporcionar un marco conceptual sólido sobre la viabilidad del hidrógeno en la aeronáutica y el uso de celdas de hidrógeno como alternativa al queroseno en la aviación.

Este trabajo incluye una primera fase teórica, donde se realiza la búsqueda de información sobre los diversos mecanismos o procesos que se han desarrollado para la generación de hidrógeno, con sus ventajas y desventajas. La segunda fase describe las celdas de hidrógeno, los tipos, ventajas y contras de cada una. Posteriormente, se presentan los mecanismos existentes para el almacenamiento del hidrógeno. Luego se exponen algunos casos en los cuales ya se han

realizado ensayos con este componente y su viabilidad económica. Finalmente, se presentan las principales conclusiones a las que se llegó al realizar esta investigación netamente teórica.

Se recurre a diversas fuentes confiables, que incluye libros especializados en aeronáutica y tecnologías de propulsión, artículos científicos y técnicos sobre el tema, así como las páginas web de fabricantes de aeronaves y empresas aeronáuticas líderes. Estas fuentes proporcionan información integral sobre la viabilidad y los desafíos asociados con las celdas de hidrógeno en la aviación, además de ofrecer resultados actualizados de investigaciones y pruebas realizadas por la industria aeronáutica en este campo. En la figura 1 se presenta la metodología seguida en este trabajo.



Figura 1. Metodología proceso de investigación

Fuente: elaboración propia.

## Hidrógeno: la alternativa aérea

### Generación del hidrógeno

El hidrógeno es el elemento más abundante en el planeta tierra, por tal motivo, puede obtenerse de distintas fuentes. De acuerdo con Venegas *et al.* (2016), los principales métodos para obtener este elemento son:

- Combustible fósil reformado:** es un método de producción de hidrógeno a partir de combustibles fósiles. Siendo el procedimiento menos costoso y más común para generar hidrógeno a partir de combustibles fósiles. Como indica Acar y Dincer (2013), se emite hidrógeno (H<sub>2</sub>), monóxido

de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). En este procedimiento, el gas natural (CH<sub>4</sub>) debe ser limpiado de impurezas, se lo mezcla con carbón y se lo hace circular por un reactor (fuente de calor externa).

- Gasificación de carbono:** durante este procedimiento, se lleva a cabo una oxidación parcial del carbono utilizando vapor y oxígeno en un reactor de alta presión y temperatura. En el proceso de gasificación, el carbón es parcialmente oxidado con vapor, lo que produce principalmente H<sub>2</sub>, y vapor, junto con CO<sub>2</sub> (gas de síntesis). Este gas de síntesis se somete a una reacción de desplazamiento para aumentar la cantidad de hidrógeno (Acar y Dincer, 2013). En la figura 2 se presenta de forma esquemática cómo se desarrolla este proceso.

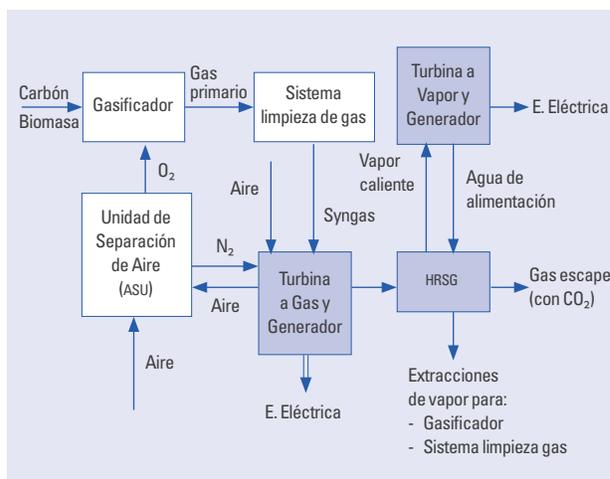


Figura 2. Gasificación de carbón para generación de energía eléctrica

Fuente: Concha *et al.* (2009).

- c. En casos en los que sea necesario recuperar azufre elemental o ácido sulfúrico, el gas de producto puede ser procesado y purificado. A pesar de algunas ventajas de la gasificación de carbón, como el alto contenido de carbono presente, este método genera mayores emisiones de en comparación con otras tecnologías de producción de hidrógeno. Actualmente, el costo de este proceso es ligeramente mayor que el de la reforma de gas natural con vapor, pero los costos de la materia prima son más bajos, lo que hace que sea viable a gran escala.
- d. *División termoquímica del agua*: estos métodos incluyen la conversión térmica nuclear del agua a través de diferentes procesos químicos, como el ciclo de sodio-yodo y la electrólisis del agua utilizando energía nuclear. El ciclo de sodio-yodo es un ejemplo de un ciclo termoquímico que descompone el agua sin requerir catalizadores para llevar a cabo la reacción química. Con excepción del agua, que es la fuente de material para la producción de hidrógeno, todos los productos químicos utilizados en el proceso termoquímico pueden ser reciclados (Sharma, 2015).
- e. *Electrólisis a alta temperatura*: este método de electrólisis implica la disociación del vapor de agua en hidrógeno ( $H_2$ ) y oxígeno ( $O_2$ ) a temperaturas que oscilan entre los 700 y 1000 C. Se considera más eficiente en comparación con la electrólisis realizada a temperatura convencional. En este proceso, el agua se convierte en vapor utilizando energía térmica. Los componentes del sistema son calentados, ya sea directamente mediante el suministro de vapor o indirectamente a través de la transferencia de calor. Por lo tanto, la demanda de energía eléctrica en esta forma de electrólisis es menor que en la electrólisis convencional. Otra ventaja significativa de este método es la posibilidad de lograr emisiones de gases de efecto invernadero nulas cuando se dispone de una fuente de calor limpia, como la energía solar, geotérmica o nuclear (Acar y Dincer, 2015).
- f. *Electrólisis PV*: es uno de los métodos más costosos para la producción de hidrógeno, siendo

aproximadamente 25 veces más caro que las alternativas basadas en combustibles fósiles. Por otro lado, la fotocatalisis es un proceso que convierte la energía fotónica, proveniente de la irradiación solar, en energía química en forma de hidrógeno. La energía transportada por los fotones está relacionada con la frecuencia de la radiación, representada por " $h\nu$ ", donde " $h$ " es la constante de Planck y " $\nu$ " es la frecuencia. Cuando un fotón golpea el fotocatalizador, se genera un par electrón-hueco y se obtiene carga eléctrica que se utiliza para disociar el agua (Venegas et al., 2016). La electrólisis PV y la fotocatalisis utilizan la energía solar para producir hidrógeno, una alternativa relevante en la aviación para reducir emisiones y depender menos de combustibles fósiles. Aunque prometedoras, la electrólisis PV requiere espacio para paneles solares, y la fotocatalisis está en desarrollo y necesita mejoras para ser viable en aeronaves. Ambos métodos permiten un almacenamiento eficiente de hidrógeno, esencial para vuelos sostenibles.

- g. *Energía eólica*: este tipo de energía aprovecha la fuerza del viento para hacer girar una turbina y generar electricidad. El viento es una forma indirecta de energía solar, ya que aproximadamente el 2 % de la radiación solar que llega a la superficie terrestre se convierte en energía cinética del aire en movimiento. Según los informes más recientes del Departamento de Energía de Estados Unidos (2022), la energía eólica ha contribuido con el 22 % de la capacidad eléctrica recién instalada en el país. Además, estos informes confirman que la energía eólica continúa siendo una de las fuentes de electricidad de más rápido desarrollo y menor costo en Estados Unidos, y se encuentra en una posición propicia para un crecimiento aún más significativo en el futuro cercano.
- h. *Electrólisis de agua*: este método no requiere partes móviles y utiliza corriente eléctrica directa (CC), lo que lo hace muy simple para la producción de hidrógeno. La descomposición electroquímica del agua es confiable y no genera contaminantes. De acuerdo con Turner (2008), la eficiencia en

la obtención de hidrógeno es extremadamente alta, alcanzando el 99.999 %.

La electrólisis del agua se puede clasificar en dos tipos según el pH del medio acuoso: la AWE (electrólisis alcalina) ha sido ampliamente utilizada en aplicaciones industriales y existen numerosas unidades en funcionamiento; y PEWE (electrólisis ácida), la cual tiene una aplicación limitada en términos de capacidad de producción debido a su escasa vida útil y la tendencia a la corrosión de las celdas (Acar y Dincer, 2015).

- i. *Conversión termoquímica de biomasa, gasificación y reformado de biocombustible*: la biomasa es considerada como una opción altamente prometedora y posee un gran potencial para satisfacer las necesidades energéticas y garantizar el suministro de combustible en el futuro. De acuerdo con Sharma (2015), se estima que, para el año 2050, el potencial futuro de la biomasa podría representar hasta el 25 % de la energía primaria mundial. Esto se lograría mediante el aprovechamiento de recursos como los bosques, residuos urbanos y cultivos energéticos perennes.

Las tecnologías de conversión de biomasa se dividen en dos categorías principales: 1) los procesos bioquímicos, que tienden a ser menos costosos, ya que se pueden operar a temperaturas más altas, lo que aumenta la velocidad de reacción. De acuerdo con Balat (2010), entre estos procesos se encuentran la gasificación y la pirolysis, que consiste en calentar la biomasa en ausencia de oxígeno para producir un gas rico en hidrógeno conocido como “syngas” (una mezcla de hidrógeno y monóxido de carbono); 2) los procesos termoquímicos.

## Ventajas de producir hidrógeno

La producción de hidrógeno presenta varias ventajas significativas, que incluyen (Becherif *et al.*, 2015; Pérez *et al.*, 2015; Turner, 2004; Venegas *et al.*, 2016):

1. Es elemento químico más ligero, simple y abundante en el universo.

2. Se produce principalmente en combinación con otros elementos, como el oxígeno en el agua, y con carbono, nitrógeno y oxígeno en materiales vivos y combustibles fósiles.
3. Es un combustible muy limpio, lo que contribuye a mejorar la calidad del aire. En las celdas de combustible, cuando se combina con oxígeno, no genera dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), hidrocarburos, gases de efecto invernadero ni emisiones de óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>). El único subproducto es el agua.
4. Contribuye a la seguridad energética al reducir la dependencia de las importaciones de petróleo.
5. Promueve la sostenibilidad al aprovechar fuentes de energía renovable para su producción.
6. Ofrece viabilidad económica en la formación de futuros mercados energéticos a nivel mundial.
7. Puede utilizarse en la generación de energía hidroeléctrica para abastecer zonas remotas o aisladas.
8. Tiene un alto contenido de energía por unidad de masa en comparación con el petróleo.

## Desventajas de producir hidrógeno

La generación de hidrógeno trae consigo diversos desafíos o inconvenientes por vencer, entre los que se encuentran (Balat, 2010; Beach, 2005; Shahid, 2012):

1. Desarrollar una técnica de producción económicamente viable.
2. El almacenamiento de hidrógeno representa uno de los principales desafíos que afectan la economía futura del hidrógeno. Tanto para aplicaciones estacionarias como móviles, las instalaciones de almacenamiento de hidrógeno son complicadas debido a su muy bajo punto de ebullición (20.2 K) y su baja densidad, tanto en forma gaseosa (0.09 kg/Nm<sup>3</sup>) como líquida (70.9 kg/Nm<sup>3</sup>). El hidrógeno puede almacenarse físicamente mediante cambios en sus condiciones de temperatura, presión y fase, así como química o fisicoquímicamente en varios compuestos sólidos y líquidos, como hidruros metálicos, nanoestructuras de

carbono, borohidruros, metano, metanol e hidrocarburos ligeros.

3. Debido a que el hidrógeno tiene la molécula más pequeña, tiene una mayor tendencia a escapar a través de aberturas pequeñas en comparación con otros combustibles líquidos o gaseosos. Basándonos en propiedades como la densidad, viscosidad y coeficiente de difusión del hidrógeno en el aire, su propensión a fugarse a través de agujeros o uniones en líneas de combustible a presión puede ser solo de 1.26 a 2.8 veces más rápida que una fuga de gas natural a través del mismo agujero.
4. Algunos aceros de alta resistencia pueden sufrir fragilización por hidrógeno. La exposición prolongada al hidrógeno, especialmente a altas temperaturas y presiones, puede causar la pérdida de fuerza del acero y eventualmente provocar su ruptura. La fragilización por hidrógeno es una preocupación específica en industrias y aplicaciones donde se utilizan aceros de alta resistencia en condiciones extremas de presión y temperatura, y donde la integridad estructural es crítica. Sin embargo, no es una preocupación generalizada en todos los contextos de uso del hidrógeno. En aplicaciones más comunes, como el almacenamiento y transporte de hidrógeno, esta fragilización suele ser menos relevante.
5. El riesgo a una explosión violenta debido a la expansión de vapor en caso de falla de la válvula de alivio de presión en un líquido con punto de ebullición bajo.

## Celdas de hidrógeno

Las celdas de combustible son dispositivos electroquímicos que transforman el combustible y el oxidante en electricidad y calor mediante una reacción química. A diferencia de las pilas convencionales, que dependen de la cantidad de reactivos contenidos en ellas, las celdas de combustible requieren un suministro constante de combustible y oxidante para generar energía eléctrica de manera continua. Estas celdas están compuestas por dos electrodos: el ánodo, donde se encuentra

el combustible; y el cátodo, donde se encuentra el oxidante. Entre estos electrodos se coloca una membrana que permite el paso de los electrones desde el ánodo hacia el cátodo (Aguirre, 2013).

La celda de combustible consta de dos electrodos ubicados dentro de un electrolito. El ánodo es alimentado con hidrógeno o combustible, mientras que el cátodo recibe oxígeno u oxidante. Un catalizador separa los electrones de las moléculas de hidrógeno, permitiendo que los iones de hidrógeno pasen a través de una membrana por el electrolito, mientras que los electrones se desplazan hacia el ánodo, donde se recombinan con el oxígeno y el hidrógeno, formando agua. Las celdas de combustible se pueden conectar en serie para obtener el voltaje deseado, creando así una pila de combustible (Aguirre, 2013).

## Tipos de celdas de combustible

Existen diversos tipos de celdas de combustible que varían según el electrolito utilizado, ya sea sólido o líquido. La elección del electrolito determina las características de funcionamiento de la celda, y factores como la temperatura de operación, los gases reactantes y los materiales de construcción influyen en su durabilidad y aplicaciones específicas.

- a. *Celdas de combustible tipo membrana de intercambio protónico (CCMIP)*: de acuerdo con Tibquirá (2009), este tipo de celda utiliza hidrógeno como combustible y una membrana de polímero como electrolito. En el ánodo, el hidrógeno fluye y se descompone en protones y electrones en la capa catalizadora. Los protones atraviesan la membrana, la cual está diseñada para permitir el paso de cationes, pero es impermeable a la corriente eléctrica, gases y aniones. De esta manera, los electrones son forzados a circular a través del circuito externo, generando energía eléctrica. Posteriormente, los electrones y protones reaccionan en el cátodo con el oxígeno presente en el aire, junto con la ayuda de la capa catalizadora del cátodo, formando agua.

b. *Celdas de combustible de óxido sólido (SOFC)*: según Mayén (2011), las celdas de combustible de óxido sólido funcionan mediante la generación de energía eléctrica a partir de una reacción química que involucra un intercambio de electrones. Estas reacciones, conocidas como reacciones de oxidación-reducción (RedOx), implican que uno de los reactivos se reduce al recibir electrones del otro reactivo, que a su vez se oxida. Aunque las reacciones RedOx son comunes en la naturaleza, es necesario controlarlas para obtener una corriente eléctrica útil. La clave reside en separar los reactivos en compartimentos independientes y conectarlos mediante un conductor eléctrico. De esta manera, los electrones liberados por el reactivo que se oxida fluyen a través del conductor hacia el reactivo que se reduce.

En este sistema, donde los reactivos están en compartimentos separados, es importante evitar la acumulación de especies iónicas en cada uno de ellos, ya que podría resultar en la cancelación inmediata de la reacción. En la práctica, los compartimentos se interconectan mediante una membrana de intercambio iónico. Esta membrana, como su nombre indica, permite el paso de las especies cargadas (oxidadas y/o reducidas), pero no el paso de los reactivos en su forma original. De esta manera, las cargas generadas se neutralizan entre sí y la reacción puede continuar su curso de manera efectiva.

c. *Celdas de combustible de carbonatos fundidos (MFC)*: son celdas que operan a altas temperaturas. Su electrolito consiste en una mezcla de sales de carbonatos fundidos, suspendidos en una matriz cerámica porosa compuesta de beta-alúmina, un material químicamente inerte. En el ánodo, tiene lugar una reacción entre el combustible (hidrógeno) y los iones de carbonato, los cuales reaccionan para producir dióxido de carbono, agua y electrones. Las ventajas y desventajas asociadas a este tipo de celdas están estrechamente relacionadas con su alta temperatura de funcionamiento. Estas celdas pueden ser alimentadas directamente con hidrógeno,

monóxido de carbono, gas natural y propano. No requieren catalizadores de metales nobles para las reacciones de oxidación y reducción electroquímica (Alvarado, 2013).

d. *Celdas de combustible de ácido fosfórico (PAFC)*: son consideradas como uno de los sistemas más prometedores para la generación de electricidad. Según lo señalado por Alvarado (2013), estas celdas utilizan electrodos de papel carbón y un electrolito líquido compuesto por ácido fosfórico ( $H_3PO_4$ ). El ácido fosfórico, que es una solución transparente e incolora, se utiliza comúnmente en fertilizantes, detergentes, saborizantes de alimentos y productos farmacéuticos. La conductividad iónica de este electrolito es baja a temperaturas más bajas, entre 150 y 220 °C.

En este tipo de celdas de combustible, el ion hidrógeno ( $H^+$  o protón) actúa como el portador de carga. Los protones se desplazan desde el ánodo hacia el cátodo a través del electrolito, mientras que los electrones generados regresan al cátodo a través del circuito externo, generando así corriente eléctrica. En el electrodo catódico, se forma agua como resultado de la reacción entre los electrones, los protones y el oxígeno, en presencia de un catalizador de platino que acelera las reacciones. Normalmente, el agua generada se utiliza para aplicaciones de calentamiento. Sin embargo, es importante destacar que la operación continua del sistema a 40 °C es un desafío constante debido a la solidificación del ácido fosfórico a esta temperatura (Alvarado, 2013).

e. *Celdas de combustible de electrolito alcalino (AFC)*: son una de las primeras tecnologías desarrolladas para generar energía eléctrica y agua a bordo de naves espaciales. Como menciona Aguirre (2013), estas celdas se caracterizan por utilizar un electrolito alcalino, como hidróxido de potasio, y pueden emplear catalizadores no preciosos en los electrodos. Operan a temperaturas que oscilan entre 230 °C y 700 °C. Una ventaja de las celdas AFC es que su electrolito acuoso permite una reacción química más rápida en el cátodo, lo que resulta en una eficiencia cercana al 70 %.

Además, los materiales necesarios para su funcionamiento, como el electrolito y los catalizadores, son más económicos en comparación con las celdas PEMFC. Aunque las AFC utilizan tanto metales preciosos como no preciosos, como el níquel, se enfrentan al desafío del envenenamiento y son altamente sensibles al  $CO_2$ , lo que ha llevado a un declive en el interés por esta tecnología en favor de las celdas PEM. La principal desventaja de las celdas AFC es su susceptibilidad al envenenamiento por  $CO_2$ , lo que reduce su vida útil y requiere la purificación del hidrógeno y el oxígeno suministrados. Además, las AFC tienen tiempos de vida cortos, lo que afecta su fiabilidad.

- f. *Celdas de combustible de metanol directo (DMFC)*: el funcionamiento de las DMFC se lleva a cabo de una reacción electroquímica en el ánodo, produciendo dióxido de carbono, protones y electrones, que son portadores de energía en forma de trabajo eléctrico. Esta reacción es resultado de la interacción previa entre el metanol y el agua. Por otro lado, el cátodo recibe los iones positivos transportados por el electrolito de polímero, los cuales reaccionan con el oxígeno para generar agua. Aunque las celdas de combustible de metanol directo se consideran sistemas básicos, se dividen en dos modelos utilizados en la actualidad: el modelo DMFC y el modelo RMFC (celda de combustible de metanol reformado), que ofrece una alta densidad de potencia. Es importante destacar que es necesario utilizar una mezcla de metanol y agua para que el proceso de reformado pueda llevarse a cabo en el modelo RMFC (Rincón, 2020).
- g. *Celdas de combustible de zinc (Z AFC)*: estas celdas están equipadas con un electrodo de difusión de gas conocido como *gas diffusion electrode (GDE)*, un ánodo de zinc separado del GDE por una membrana electrolítica y un separador mecánico que asegura la rigidez del sistema. El GDE actúa como una membrana que permite el paso del oxidante, y el ion  $OH^-$  reacciona con el agua para formar hidróxido de zinc, el cual reacciona con el zinc del ánodo para generar corriente eléctrica. Las

celdas Z AFC comparten muchas características con otros dispositivos similares, pero en términos de suministro de combustible, se asemejan más a las baterías. Estos dispositivos cuentan con un depósito que contiene zinc en forma de polvo o limaduras, las cuales se regeneran después de su uso en la celda. Cuando se consume el combustible, los electrones liberados reaccionan con el oxígeno del aire, generando una serie de compuestos intermedios del zinc. Después de aprovechar la circulación de los electrones en la carga, se utiliza la electrólisis para devolver estos compuestos a su estado original en forma de polvo de zinc y oxígeno (Aguirre, 2013).

- h. *Celdas de combustible cerámicas (PCFC)*: es un avance reciente en el campo de los generadores electroquímicos de potencia. De acuerdo con Aguirre (2013), estas celdas se basan en un electrolito cerámico con una alta conductividad protónica a temperaturas elevadas. A diferencia de otros tipos de celdas de combustible, las PCFC son capaces de transportar protones a través del electrolito a temperaturas mucho más altas. Gracias a esta propiedad, las celdas de combustible cerámicas ofrecen no solo las mismas ventajas cinéticas y térmicas que las celdas de carbonatos fundidos y óxidos sólidos, sino también características eléctricas similares a las de las celdas PEM y PAFC.

La operación a temperaturas muy altas es crucial en estos dispositivos para lograr una alta eficiencia en el consumo de combustible, ya que este se oxida rápidamente en el ánodo, eliminando la necesidad de un paso intermedio de reformado para obtener hidrógeno, lo cual puede resultar costoso. Después de la oxidación, los átomos de hidrógeno se liberan y son absorbidos por el electrolito cerámico. La generación de energía eléctrica se logra mediante la reacción de oxidación del hidrógeno obtenido directamente a partir de la oxidación del combustible. Es importante mencionar que, a diferencia de otras celdas de combustible de alta temperatura, la oxidación ocurre en el ánodo de la pila (Aguirre, 2013).

- i. *Celdas de combustible biológicas (BFC)*: son dispositivos bioelectroquímicos en los cuales el ánodo, y a veces también el cátodo, contienen microorganismos que tienen la capacidad de generar y mantener un gradiente electroquímico, que se utiliza principalmente para generar energía eléctrica. En la configuración más estudiada, el ánodo alberga bacterias heterótrofas en un entorno anaeróbico, las cuales son capaces de oxidar moléculas orgánicas, liberando protones, electrones y otros subproductos. Los protones liberados pueden alcanzar el cátodo, generalmente a través de una membrana o un puente salino, mientras que los electrones viajan a través de un circuito externo, generando un flujo de corriente que puede ser fácilmente medido (Saavedra, 2014).

De acuerdo con la información anterior, es posible afirmar que, para la industria aeronáutica, las celdas de combustible de hidrógeno más idóneas son: la de tecnología de las celdas de combustible de membrana de intercambio protónico, que se destaca por su alta eficiencia, respuesta rápida y densidad de potencia. Estas celdas utilizan una membrana de intercambio protónico como electrolito, lo que les permite operar a temperaturas más bajas y arrancar rápidamente. Estas características las hacen adecuadas para aplicaciones de alta potencia en la aviación. Y, por otro lado, las celdas de combustible de óxido sólido, que, aunque su uso en la aviación es menos común debido a su temperatura de operación relativamente alta, las SOFC ofrecen ventajas como alta eficiencia y flexibilidad en la elección del combustible, permitiendo la utilización de hidrógeno o biogás como fuente de energía (Mayén, 2011).

Con base en lo anterior, las celdas de combustible de membrana de intercambio protónico son una tecnología prometedora para la aviación debido a su eficiencia, capacidad de respuesta y densidad de potencia. Sin embargo, la elección de la tecnología más adecuada para una aplicación específica dependerá de diversos factores, como los requisitos de rendimiento, los costos, la infraestructura de abastecimiento de combustible y la disponibilidad de tecnología y materiales en el momento de su implementación.

## Ventajas y desventajas de las celdas de hidrógeno

Las celdas de hidrógeno en la aviación presentan una serie de ventajas y desventajas que deben considerarse al evaluar su implementación en el sector aeronáutico. De acuerdo con Alvarado (2013), en términos de ventajas, se destaca su sostenibilidad ambiental, ya que generan electricidad sin emitir contaminantes ni gases de efecto invernadero. Esto se logra mediante la reacción química entre hidrógeno y oxígeno, que produce agua como único subproducto. Al utilizar hidrógeno producido a partir de fuentes renovables, las celdas de hidrógeno pueden contribuir significativamente a la reducción de las emisiones de carbono en la aviación. Además, estas celdas ofrecen una alta eficiencia energética al convertir directamente la energía química del hidrógeno en electricidad, lo que puede resultar en una mejor utilización de la energía y una mayor autonomía de vuelo de las aeronaves. Otro beneficio importante es la reducción del ruido, ya que las celdas de hidrógeno son más silenciosas que los motores de combustión interna.

No obstante, también existen desafíos asociados con las celdas de hidrógeno en la aviación. Según Alvarado (2013), uno de ellos es la infraestructura limitada de abastecimiento de hidrógeno, que requiere una red de producción, almacenamiento y distribución a gran escala para respaldar su adopción generalizada en el sector. Esto implica superar desafíos logísticos y de inversión para establecer una infraestructura adecuada. Asimismo, el almacenamiento y la distribución de hidrógeno plantean desafíos debido a su baja densidad energética en comparación con los combustibles fósiles. Se necesitan sistemas de almacenamiento y distribución especializados, como el almacenamiento a alta presión o en forma líquida criogénica, lo que puede requerir un mayor espacio en las aeronaves y plantear desafíos adicionales en términos de seguridad. Por último, los costos iniciales de las tecnologías de celdas de hidrógeno suelen ser más altos que los sistemas convencionales basados en queroseno, lo que incluye los costos de desarrollo, fabricación y la infraestructura asociada. Sin embargo, se espera

que los costos disminuyan a medida que se realicen avances tecnológicos y se logre una mayor escala de producción.

## Almacenamiento de hidrógeno

El almacenamiento es una fase crucial en el desarrollo de la economía del hidrógeno, ya que dependiendo de las aplicaciones en las que se consume, se debe seleccionar el método más apropiado para cada caso. El hidrógeno se caracteriza por una densidad muy baja a temperatura ambiente, lo que requiere volúmenes de almacenamiento muy grandes y tanques pesados (Massaro *et al.*, 2023).

*Tanques a presión:* la forma convencional de almacenar hidrógeno gaseoso es en botellas de acero o en tanques de fibra de carbono ligeros que han demostrado su capacidad para operar a presiones de 350 bar. Una solución prometedora es el uso de botellas de almacenamiento a 700 bar, aunque actualmente se encuentran en fase de demostración. Sin embargo, antes de que se pueda iniciar la producción comercial de sistemas de almacenamiento de hidrógeno a alta presión, es necesario abordar varios aspectos, incluyendo la seguridad, la resistencia (efecto de los ciclos de carga en la vida útil del tanque) y el costo, considerando el alto costo actual de los tanques compuestos para alta presión y la energía requerida para comprimir hasta esos niveles. Además, la forma cilíndrica ideal dificulta la adaptación del almacenamiento al espacio disponible en el vehículo (González, s.f.).

*Microesferas de vidrio:* representan una opción interesante para el almacenamiento de hidrógeno, ya que son económicas y pueden retener hidrógeno a muy baja presión. Estas esferas de vidrio se calientan, lo que aumenta la permeabilidad de sus paredes, luego se llenan sumergiéndolas en gas hidrógeno a alta presión. Posteriormente, las esferas se enfrían a temperatura ambiente y el hidrógeno queda atrapado en su interior. Un aumento adicional en la temperatura libera el hidrógeno contenido en estas esferas. El principal desafío radica en comprender cómo activar y desactivar todo el proceso de manera controlada. Este enfoque tiene el potencial de ser un método de

almacenamiento de hidrógeno portátil, seguro, económico y recargable/reciclable (Izkarate, 2010).

*Hidruros recargables:* el hidrógeno tiene la capacidad de reaccionar con varios metales de transición, formando compuestos conocidos como hidruros. Durante décadas se ha estudiado a fondo los hidruros y se conocen bien sus propiedades. Estas reacciones son reversibles bajo condiciones adecuadas de presión y temperatura, lo que permite cargar y descargar una masa determinada de metal un número prácticamente ilimitado de veces, convirtiéndolo en un sólido depósito de almacenamiento de hidrógeno. La mayoría de los hidruros operan a presiones moderadas, no presentan pérdidas y también permiten la purificación del hidrógeno. El hidrógeno se libera al aplicar calor a los materiales, como calentar el tanque, o al reducir la presión. Este tipo de almacenamiento es seguro y manejable, y permite almacenar una mayor cantidad de hidrógeno por unidad de volumen en comparación con el hidrógeno líquido. Sin embargo, debido a los bajos niveles de retención de hidrógeno, el sistema resulta pesado, lo que lo hace menos adecuado para aplicaciones móviles. Sin embargo, es especialmente útil en aplicaciones estacionarias aisladas que requieren energía eléctrica proveniente de fuentes renovables (González, s.f.).

*Bulk amorphous materials (BAM):* son materiales metálicos compuestos principalmente de titanio, aluminio y hierro, que tienen la capacidad de almacenar altas cantidades de hidrógeno, llegando hasta un 5 % o 6 % de su peso total. Estos materiales están basados en aleaciones multicomponente, como las basadas en Ti-Al-Fe, y se presentan en forma de empaquetados con porosidad controlada en una fase líquida superenfriada. Se ha observado que tienen una alta resistencia a la fragilización y desintegración, y podrían ser producidos a gran escala a un bajo costo. Actualmente, se está trabajando en verificar su capacidad de almacenamiento y liberación de hidrógeno (Azkarate, 2010).

*Hidrógeno líquido:* el hidrógeno puede ser almacenado en forma líquida a temperaturas criogénicas. Una de las principales ventajas del hidrógeno líquido es su alta densidad de energía por unidad de volumen, incluso a presiones relativamente bajas, lo cual

lo diferencia del hidrógeno gaseoso. Sin embargo, también presenta desventajas. Durante el proceso de licuefacción del hidrógeno, se pierde aproximadamente entre el 30 % y el 40 % de la energía. Además, hay pérdidas por evaporación durante los periodos en los que el sistema no se utiliza, y se requiere el uso de contenedores criogénicos altamente aislados para su almacenamiento (González, s.f.).

*Hidruros metálicos:* son aleaciones que actúan como una especie de esponja, absorbiendo hidrógeno gaseoso y formando compuestos sólidos de hidrógeno mediante una reacción química bajo presión. Este método de almacenamiento en materiales sólidos ofrece una alternativa segura y eficiente para almacenar grandes volúmenes de hidrógeno. Cuando se necesita utilizar el hidrógeno, se libera del hidruro en condiciones específicas de temperatura y presión. Este proceso puede repetirse sin que se pierda la capacidad de almacenamiento del material. Un factor clave es la facilidad con la que se puede recuperar el hidrógeno, lo cual está determinado por la presión de disociación del material, una propiedad dependiente de la temperatura. Sin embargo, es necesario mejorar la comprensión del mecanismo y la termodinámica de la formación del hidruro a partir del hidrógeno gaseoso (Azkarate, 2010).

*Hidrógeno comprimido:* es un método utilizado para almacenar hidrógeno en estado gaseoso en cilindros o tanques a alta presión. Consiste en comprimir el hidrógeno a presiones superiores a la presión atmosférica, generalmente en el rango de 200 a 700 bares (bar), para reducir su volumen y aumentar su densidad de energía. En este proceso, el hidrógeno gaseoso es introducido en un recipiente especialmente diseñado y sellado, que puede ser un cilindro de acero o una estructura similar, capaz de soportar las altas presiones. El hidrógeno se comprime utilizando sistemas de compresión, donde se aplican fuerzas para reducir el volumen del gas y aumentar su densidad. Una vez comprimido, el hidrógeno se almacena en el cilindro o tanque hasta que se necesite su uso posterior (Sastresa y Bribián, 2011).

Lo anterior, ha permitido identificar que las dos opciones más prometedoras para el almacenamiento son las de hidrógeno comprimido y el almacenamiento

de hidrógeno líquido. El hidrógeno comprimido implica almacenar el hidrógeno gaseoso a alta presión en cilindros o tanques especialmente diseñados. Este método es ampliamente utilizado y se considera seguro y maduro en términos de tecnología. Ofrece un acceso rápido y una recarga conveniente, lo que es beneficioso en la aviación para minimizar el tiempo de inactividad entre vuelos. Según Sastresa y Bribián (2011), su principal limitación es la baja densidad de energía, lo que significa que se requiere un mayor volumen para almacenar la misma cantidad de energía en comparación con otros métodos.

De acuerdo con González (s.f.), el almacenamiento de hidrógeno líquido implica enfriar el hidrógeno gaseoso a temperaturas muy bajas para convertirlo en líquido y almacenarlo en tanques criogénicos. Este método ofrece una mayor densidad de energía en comparación con el almacenamiento de hidrógeno comprimido. Esto es especialmente ventajoso en la aviación, donde el espacio disponible en las aeronaves es limitado. Sin embargo, el almacenamiento de hidrógeno líquido requiere sistemas de almacenamiento y manipulación criogénicos más complejos, lo que implica costos adicionales y requisitos de seguridad más estrictos.

El almacenamiento de hidrógeno comprimido ofrece una recarga conveniente, mientras que el almacenamiento de hidrógeno líquido proporciona una mayor densidad de energía. La elección entre estos métodos dependerá de factores como los requisitos específicos de la aeronave, el rango de vuelo, la eficiencia, la infraestructura disponible y los costos asociados.

## Compañías precursoras de las celdas de hidrógeno

En el ámbito de la aviación, algunas compañías que hoy en día han desarrollado, aplicado y realizado ensayos con celdas de hidrógeno son:

- a. *ZeroAvia:* es una empresa con sede en el Reino Unido y en Estados Unidos, que se dedica al desarrollo de tecnologías de propulsión de hidrógeno

para aviones comerciales. Han trabajado en la adaptación de motores de aviones existentes para utilizar celdas de hidrógeno, con el objetivo de lograr vuelos comerciales de cero emisiones. Tal como afirma Pérez (2021), se logró comprobar la efectividad y el funcionamiento del motor de hidrógeno diseñado para aviones de tamaño medio, con capacidad de generar 600 kW de potencia. Específicamente, este motor está destinado a aviones con hasta 19 asientos. La prueba y demostración se llevaron a cabo en tierra, donde se ubicó el motor sobre una plataforma móvil de 15 toneladas proporcionada por la empresa HyperTruck. Dicha plataforma se basa en un camión militar M977 HEMTT diseñado para soportar sistemas eléctricos de hidrógeno para aviones de 40 a 80 asientos. El nuevo motor, parte del proyecto HyFlyer II de ZeroAvia, se colocó sobre esta plataforma, sentando así las bases para futuros vuelos con emisiones cero. Esta prueba no solo demostró la resistencia del HyperTruck, sino que también validó el potencial de la futura mecánica ZA-600 para aviones de 19 pasajeros desarrollados por ZeroAvia. Una vez que se haya demostrado su validez, este motor será instalado en los próximos meses en un avión Dornier 228 como parte del proyecto HyFlyer II. Las pruebas en condiciones reales se llevarán a cabo a finales de este mismo año en las instalaciones de ZeroAvia en Kemble, Reino Unido.

- b. *Universal Hydrogen*: es una empresa con sede en Estados Unidos, que se enfoca en crear una cadena de suministro de hidrógeno para la aviación. Su objetivo es proporcionar hidrógeno de forma segura y rentable para su uso en aviones, trabajando en colaboración con aerolíneas, fabricantes de aviones y proveedores de infraestructura. Según lo señalado por Urrea (2023), un avión regional de 40 pasajeros, perteneciente a Universal Hydrogen, realizó un vuelo de prueba utilizando propulsión de celda de combustible de hidrógeno. Durante el vuelo, conocido como *Lightning McClean*, la aeronave alcanzó una altitud de 3500 metros sobre el nivel del mar y voló durante

15 minutos. El despegue tuvo lugar a las 8:41 de la mañana en el Aeropuerto Internacional del Condado de Grant, Washington. Este vuelo, realizado bajo un certificado de aeronavegabilidad especial otorgado por la FAA, marca el inicio de una serie de pruebas que se llevarán a cabo durante dos años.

Como menciona Urrea (2023), la compañía tiene como objetivo finalizar estas pruebas en 2025, con el lanzamiento del servicio de pasajeros en el avión regional ATR 72, que ha sido modificado para funcionar con hidrógeno. En el vuelo histórico estuvieron presentes representantes y clientes de Universal Hydrogen, así como de otras empresas que están incursionando en la tecnología de aviones de hidrógeno en Estados Unidos y Europa. Este hito marca un paso importante hacia la implementación de aviones propulsados por hidrógeno en la industria aeronáutica.

- c. *Airbus*: es uno de los principales fabricantes de aviones a nivel mundial, ha estado explorando el uso de celdas de hidrógeno en la aviación. Han presentado conceptos de aviones propulsados por hidrógeno, como el Airbus ZEROe, que podrían ser impulsados por celdas de hidrógeno y emitir cero emisiones de carbono. De acuerdo con Forbes Staff (2022), Airbus se encuentra en proceso de desarrollar un motor de celda de combustible de hidrógeno como parte de su estrategia para lanzar un avión comercial propulsado por este tipo de combustible en 2035. Este sistema es una de las opciones consideradas para un posible avión basado en hidrógeno de emisiones cero. Aunque esta es la primera vez que el principal fabricante de aviones del mundo se embarca directamente en el desarrollo de tecnología de motores, Glenn Llewellyn, jefe del proyecto de cero emisiones de Airbus, afirmó que la empresa no necesariamente llevaría a cabo el desarrollo del sistema por sí sola si otra compañía lo implementara. Airbus explicó que existen dos formas de utilizar el hidrógeno como combustible para la propulsión de aeronaves: mediante la combustión del hidrógeno en una turbina de gas o utilizando celdas de combustible que convierten el

hidrógeno en electricidad para alimentar un motor eléctrico. También es posible combinar ambas técnicas.

- d. *Boeing*: empresa que está explorando soluciones de propulsión de hidrógeno para la aviación. Han realizado investigaciones y estudios de viabilidad sobre el uso de celdas de hidrógeno en aviones comerciales y han presentado conceptos como el Boeing ecoDemonstrator, que evalúa tecnologías sostenibles para la aviación, incluyendo celdas de hidrógeno. En consonancia con María (2021), Boeing fue responsable del diseño del primer prototipo de avión de hidrógeno, el cual fue sometido a pruebas por primera vez en el 2008. Sin embargo, el vuelo de su pequeño avión monomotor de prueba tuvo una duración de solo 20 minutos. Recientemente, Boeing reconoció que las celdas de combustible no pudieron suministrar la energía primaria necesaria para aviones comerciales de gran tamaño. El nuevo concepto de FlyZero difiere de esto, ya que opera alimentando directamente los motores con hidrógeno, en lugar de utilizar varios motores eléctricos. Se estima que los primeros vuelos de prueba de esta tecnología tendrán lugar en el año 2030.
- e. *Rolls-Royce*: conocida por sus motores aeroespaciales, está investigando y desarrollando tecnologías de propulsión de hidrógeno para aviones. Han presentado conceptos de aviones propulsados por hidrógeno y están trabajando en la adaptación de sus motores existentes para utilizar celdas de hidrógeno. También están colaborando con otras compañías y entidades para impulsar la adopción de tecnologías de hidrógeno en la aviación.

Según Fuentes (2022), Rolls-Royce continúa avanzando en su compromiso con el hidrógeno y ha anunciado una colaboración con Hyundai para llevar la tecnología de pilas de combustible al ámbito de los taxis voladores, es decir, en el campo de los viajes aéreos urbanos y regionales.

Además, la compañía está llevando a cabo un nuevo proyecto para demostrar que el hidrógeno será el combustible que impulsará los aviones

del futuro, y ya ha establecido una fecha para la primera prueba en un motor Rolls-Royce AE 2100. De acuerdo con la empresa británica, Rolls-Royce y Hyundai Motor Group tienen como objetivo introducir la propulsión totalmente eléctrica y la tecnología de celdas de combustible de hidrógeno en el mercado de la movilidad aérea avanzada, con un primer prototipo programado para el año 2025. De esta manera, ambas compañías se dedican a desarrollar celdas de combustible de hidrógeno, sistemas de almacenamiento e infraestructura para la movilidad aérea sostenible, impulsando así la adopción de esta tecnología en aeronaves y sistemas de propulsión totalmente eléctricos e híbridos de la reconocida empresa especializada en aviación y automóviles de lujo.

De lo anterior, se destaca que varias compañías de la industria de la aviación están llevando a cabo investigaciones y desarrollos en el campo de las celdas de hidrógeno como una alternativa sostenible para la propulsión de aviones. Empresas como ZeroAvia, Universal Hydrogen, Airbus, Boeing y Rolls-Royce están trabajando en diferentes proyectos y colaboraciones para explorar y demostrar la viabilidad de esta tecnología.

Estos avances y colaboraciones demuestran el creciente interés de la industria aeronáutica en el uso del hidrógeno como combustible, con el objetivo de lograr vuelos de emisiones cero y reducir el impacto ambiental de la aviación en el futuro.

## Costos de las celdas de combustibles

El costo de las celdas de combustible de hidrógeno para la aviación puede variar ampliamente dependiendo de varios factores, como el tamaño y la capacidad de las celdas, el nivel de producción y la tecnología utilizada.

De acuerdo con Aguirre (2013), las celdas de combustible de hidrógeno son tecnologías aún en desarrollo y se consideran relativamente costosas en comparación con los sistemas de propulsión convencionales basados en combustibles fósiles. Sin embargo, se espera

que a medida que la tecnología avance, los costos disminuyan debido a la mejora de la eficiencia y la escala de producción.

La evaluación de costos generalmente se realiza en términos de la inversión de capital por unidad de potencia instalada, expresada en dólares por kilovatio (\$/kW). Dado que el hidrógeno como vector energético puede ser producido mediante diversas tecnologías, esto también afecta significativamente su precio.

En línea con Aguirre (2013), en el caso de los sistemas estacionarios basados en celdas de combustible de óxido sólido (SOFC) y de carbonato fundido (MCFC), otros estudios indican que los costos de unidades con una potencia de 200-300 kW están alrededor de los 12.000 US\$/KW. Nuevas tecnologías y técnicas de producción a gran escala se espera que reduzcan sustancialmente los precios en el futuro. Las celdas de combustible de ácido fosfórico (PAFC) tienen dificultades para reducir sus costos debido a su tecnología madura y a los requerimientos de platino. Algunas empresas que fabricaban estas celdas han optado por cambiar a otra tecnología con un mayor potencial de reducción de costos.

Para hacer una primera comparación de paridad, se puede contrastar el costo de inversión en celdas de combustible con el de centrales de ciclo combinado alimentadas con gas natural, que tienen costos de inversión alrededor de 600-700 US\$/kW y una eficiencia del 60 %. Las centrales de ciclo combinado son consideradas los principales competidores de esta tecnología en aplicaciones estacionarias, mientras que para aplicaciones móviles se estima que el rango competitivo en el sector automotriz se encuentra entre 50 y 200 US\$/kW.

El costo de las celdas de combustible de hidrógeno para la aviación es un aspecto clave para considerar en la adopción de esta tecnología. Si bien actualmente se consideran relativamente costosas en comparación con los sistemas convencionales, se espera que los avances tecnológicos, la escalabilidad de la producción y la mejora de la eficiencia contribuyan a reducir significativamente los costos en el futuro.

Los estudios sugieren que el costo de las celdas PEMFC podría reducirse por debajo de los 100 US\$/kW en unos 15 a 20 años, mientras que se espera que las celdas SOFC y MCFC para sistemas estacionarios también experimenten una disminución sustancial en los precios a medida que se desarrollen nuevas tecnologías y se implementen técnicas de producción a gran escala.

A pesar de los desafíos actuales en cuanto a los costos, es importante tener en cuenta que la adopción de celdas de hidrógeno en la aviación puede ofrecer beneficios significativos en términos de reducción de emisiones y sostenibilidad ambiental. A medida que la tecnología madure y se implementen economías de escala, es posible que las celdas de combustible de hidrógeno se vuelvan más favorables en términos de costos y competitividad.

Es necesario seguir impulsando la investigación y el desarrollo en este campo, así como fomentar la colaboración entre industrias y gobiernos para acelerar la adopción de tecnologías de celdas de combustible de hidrógeno en la aviación y alcanzar los objetivos de movilidad sostenible y reducción de emisiones en el sector aeronáutico.

Tabla 1.  
Comparación de las celdas de combustible con otros sistemas de generación eléctrica

	Motor alternativo: diésel	Generador de turbina	Fotovoltaica	Turbina de viento	Celda de combustible
<b>Rango de capacidad</b>	500 kW – 50 MW	500 kW – 5 MW	1 kW – 1 MW	10 kW- 1 kW	200 kW – 2MW
<b>Eficiencia</b>	35 %	29-42 %	6-19 %	25 %	40-85 %
<b>Costo de capital (\$/kW)</b>	200-350	450-870	6600	1000	1500-3000
<b>Costo de operación y mantenimiento (\$/kW)</b>	0.005-0.015	0.005-0.0065	0.001-0.004	0.01	0.0019-0.0153

Fuente: Alvarado (2013).

## Conclusiones

La presente investigación se centró en la obtención de hidrógeno como fuente de energía primaria para la aviación, evaluando diversos métodos y fuentes para su producción. Se identificaron diferentes enfoques, como el reformado de combustible fósil, la gasificación de carbono, la división termoquímica del agua, la electrólisis a alta temperatura, la electrólisis fotovoltáica entre otros, cada uno con características particulares en términos de eficiencia, costos y emisiones de gases.

Los resultados mostraron que la transición hacia un futuro más sostenible requiere la exploración y desarrollo de tecnologías que permitan la producción eficiente, limpia y económica de hidrógeno. Se destacó la abundancia de hidrógeno en el universo y su carácter limpio, lo que contribuye a mejorar la calidad del aire y promueve la seguridad energética, sostenibilidad y viabilidad económica a nivel mundial. Sin embargo, se identificaron desafíos significativos en relación con el almacenamiento de hidrógeno, debido a su baja densidad y punto de ebullición, así como los riesgos asociados con fugas, fragilización de aceros y posibles explosiones. Estos desafíos representan obstáculos que deben abordarse para establecer una producción de hidrógeno económicamente viable y segura.

Se examinaron dos tecnologías principales de celdas de combustible de hidrógeno: las celdas de combustible de membrana de intercambio protónico y las celdas de combustible de óxido sólido. Cada una mostró ventajas y aplicaciones específicas, dependiendo de los requisitos de rendimiento, costos, infraestructura y disponibilidad tecnológica y de materiales en el momento de su implementación en la aviación. Para el almacenamiento de hidrógeno en aviación, se consideraron dos opciones prometedoras: el almacenamiento de hidrógeno comprimido y el almacenamiento de hidrógeno líquido, ambas con ventajas y desventajas en términos de densidad de energía y complejidad de los sistemas.

El análisis de costos de las celdas de combustible de hidrógeno en la aviación reveló que, si bien

actualmente son relativamente costosas en comparación con los sistemas convencionales, se espera que los avances tecnológicos, la producción a gran escala y las mejoras en eficiencia contribuyan a reducir significativamente los costos en el futuro. La proyección sugiere que las celdas de combustible de membrana de intercambio protónico podrían alcanzar precios competitivos en 15 a 20 años, mientras que las celdas de óxido sólido para sistemas estacionarios también experimentarán reducciones de precios con el tiempo.

En conclusión, los resultados de esta investigación enfatizan la importancia de continuar la investigación y desarrollo de tecnologías de celdas de combustible de hidrógeno en la aviación. Asimismo, subrayan la necesidad de fomentar la colaboración entre industrias y gobiernos para acelerar la adopción de estas tecnologías y alcanzar los objetivos de movilidad sostenible y reducción de emisiones en el sector aeronáutico. Con el tiempo y a medida que la tecnología madure y se implementen economías de escala, se espera que las celdas de combustible de hidrógeno se vuelvan más competitivas en términos de costos y desempeñen un papel clave en la promoción de una aviación más limpia y respetuosa con el medio ambiente.

## Referencias

- Acar, C. & Dincer, I. (2013). Comparative assessment of hydrogen production methods from renewable and non-renewable sources. *Int. J. Hydrogen Energy*, 39(1), 1-12.
- Acar, C. & Dincer, I. (2015). Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability. *Int. J. Hydrogen Energy*, 40(34), 11094-11111.
- Aguirre, O. (2013). *Celdas de hidrógeno y su potencial de aplicación*. Universidad Veracruzana.
- Adler, E. J. & Martins, J. R. (2023). *Hydrogen-powered aircraft: fundamental concepts, key technologies, and environmental impacts*. Progress in Aerospace Sciences.
- Alvarado, J. (2013). Estudio comparativo de las diferentes tecnologías de celdas de combustible. *Cerámica y Vidrio*, 53, 105-117. <https://doi.org/10.3989/cyv.142013>
- Azkarate, I. (2010). *Almacenamiento de hidrógeno*. Asociación Nacional de Ingenieros de ICAI.

- Beach, P. (2005). *Towards a hydrogen economy n.º 5*.
- Becherif, M., Ramadan, H., Cabaret, K. & Bethoux, O. (2015). Hydrogen Energy Storage: New Techno-Economic Emergence Solution Analysis. *Energy Procedia*, 74, 371-380.
- Centro Tecnológico Agrario y Agroalimentario. (s.f.). *Biomasa, biocombustibles y sostenibilidad*. <http://sostenible.palencia.uva.es/system/files/publicaciones/Biomasa%20%20Biocombustibles%20y%20Sostenibilidad.pdf>
- Concha, A., Andalaft, A. y Farías, Ó. F. (2009). Gasificación de carbón para generación de energía eléctrica: análisis con valoración de opciones Reales. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 17(3). <https://doi.org/10.4067/s0718-33052009000300008>
- Departamento de Energía de Estados Unidos. (2022). *El Departamento de Energía de EE. UU. proyecta un fuerte crecimiento en el sector de la energía eólica*. <https://www.energy.gov/articles/el-departamento-de-energia-de-eeuu-proyecta-un-fuerte-crecimiento-en-el-sector-de-la#:~:text=La%20edici%C3%B3n%20de%202023%20del,2.5%20millones%20de%20hogares%20estado unidenses>.
- Firestone. (2023). *Conoce las celdas de hidrógeno: el combustible del futuro*. <https://www.firestone.com.mx/tips-firestone/tecnologia-de-llantas/conoce-las-celdas-de-hidrogeno/>
- Fuentes, P., Samuel, Á. & Arboleda, A. (s.f.). *Celdas de hidrógeno: impacto de la implementación de estaciones de combustible de hidrógeno frente a las ventas de estos vehículos*. [https://repository.cesa.edu.co/bitstream/handle/10726/3263/ADM\\_1018496788\\_2020\\_2.pdf?sequence=4&isAllowed=y](https://repository.cesa.edu.co/bitstream/handle/10726/3263/ADM_1018496788_2020_2.pdf?sequence=4&isAllowed=y)
- Fuentes, V. (2022). *Rolls-Royce quiere llevar la pila de combustible de hidrógeno a los taxis voladores, y ya ha elegido a una marca para hacerlo*. Motor Pasión. <https://www.motorpasion.com/tecnologia/rolls-royce-quiere-llevar-pila-combustible-hidrogeno-a-taxis-voladores-ha-elegido-a-marca-para-hacerlo>
- González, A. (s.f.). *Producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno*. Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial.
- Llorca, J. (2010). *El hidrógeno y nuestro futuro energético* (1.ª ed.). Editions UPC.
- María, F. (2021). *El avión de hidrógeno hará viajes sin emisiones de carbono*. Ok Diario <https://okdiario.com/ciencia/avion-hidrogeno-hara-viajes-sin-emisiones-carbono-8286624>
- Massaro, M. C., Biga, R., Kolisnichenko, A., Marocco, P., Monteverde, A. H. & Santarelli, M. (2023). Potential and technical challenges of on-board hydrogen storage technologies coupled with fuel cell systems for aircraft electrification. *Journal of Power Sources*, 555, 232397.
- Mayén, R. (2011). Celdas de combustible de óxido sólido. ¿Una de las soluciones al problema energético? *Ide@s Concyteg*, 6(72), 647-661.
- Naciones Unidas. (2022). *Las emisiones mundiales de CO<sub>2</sub> repuntaron en 2021 hasta su nivel más alto de la historia*. <https://unfccc.int/es/news/las-emisiones-mundiales-de-co2-repuntaron-en-2021-hasta-su-nivel-mas-alto-de-la-historia>
- Nuevo, D. (2022). *Tipos de celdas de combustible*. Es Hidrógeno. <https://eshidrogeno.com/celda-combustible/>
- Pérez, A. (2021). Éxito para ZeroAvia en la primera prueba en tierra de su motor de hidrógeno. Híbridos y Eléctricos. [https://www.hibridosyelectricos.com/aviones/zeroavia-exito-primer-prueba-tierra-nuevo-motor-hidrogeno\\_48128\\_102.html](https://www.hibridosyelectricos.com/aviones/zeroavia-exito-primer-prueba-tierra-nuevo-motor-hidrogeno_48128_102.html)
- Pérez, C. F., Di Caprio, D., Mahé, É., Damien, F. & Lamare, J. (2015). Cyclic voltammetry simulations with cellular automata. *Journal of Computational Science*, 11, 269-278.
- Rincón, E. D., García, J. J. y Bermúdez, J. R. (2020). Estado del arte de las celdas de combustible. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada (RCTA)*, 1(33), 36-49. <https://ojs.unipamplona.edu.co/ojsviceinves/index.php/rcta/article/view/8333>.
- Rozo, Q. S. y Tibaquirá, G. E. (2007). Celdas de combustible tipo membrana de intercambio protónico. *Scientia et Technica*, vol. XIII(37), 279-283. Universidad Tecnológica de Pereira.
- Saavedra, A. U., Figueredo, F. y Cortón, E. (2014). Celdas de combustible biológicas basadas en el metabolismo fotosintético. *Química Viva*, 3(12), 174-186. Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Departamento de Química Biológica.
- Sastresa, L. y Bribián, I. (2011). *Hidrógeno: producción, almacenamiento y usos energéticos*.
- Shahid, M. (2012). Production and enhancement of hydrogen from water. *A Review Systems*, 134, 1-4.
- Forbes Staff. (2022). *Airbus desarrolla un motor de celda de combustible para un avión de hidrógeno*. Forbes Chile. <https://forbes.cl/sostenibilidad/2022-12-01/airbus-desarrolla-un-motor-de-celda-de-combustible-para-un-avion-de-hidrogeno>

- Tibaquirá, J. y Posner, J. (2009). Diseño y construcción de una celda de combustible tipo membrana de intercambio protónico. *Revistas UTP*, 2(42). <https://doi.org/10.22517/23447214.2569>
- Turner, J. A. (2004). Sustainable hydrogen production. *Science*, 305(5686), 972-974. <https://doi.org/10.1126/science.1103197>
- Turner, G., Severdrup, M. K., Mann, P., Maness, B., Kroposki, M., Ghirardi, R. J. & Blake, D. (2008). *Renewable hydrogen production*.
- Urrea, D. I. (2023). *Vuela el primer avión con combustible de hidrógeno ¿Comienzo de la descarbonización?* Enter.co <https://www.enter.co/cultura-digital/ciencia/vuela-el-primer-avion-con-combustible-de-hidrogeno-comienzo-de-la-descarbonizacion/>
- Venegas, D., Meléndrez, M., Celi, S. y Ayabaca, C. (2016). Métodos amigables de producción de hidrógeno como fuente de energía limpia. II Jornadas Iberoamericanas de Motores Térmicos y Lubricación. Universidad Nacional de La Plata.

# Implementación de polímeros termoplásticos reciclados como materia prima potencial para procesos de manufactura aditiva

| Fecha de recibido: 14 de julio 2023 | Fecha de aprobado: 26 de agosto 2023 |

| Reception date: July 14, 2023 | Approval date: August 26, 2023 |

| Data de recebimento: 14 de julho de 2023 | Data de aprovação: 26 de agosto de 2023 |

## Brallan Esteban Martínez Quiroga

ORCID 0009-0003-4929-9891  
bemartinezq@sena.edu.co

Técnico en Modelado 3D para la Industria  
Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA), Colombia  
Rol del investigador: teórico y escritura  
Grupo de investigación GIMES

Technician in 3D Modeling for Industry  
National Apprenticeship Service (SENA), Colombia  
Role of the researcher: theoretical and writing  
GIMES research group

Técnico em Modelação 3D para a Indústria  
Serviço Nacional de Aprendizagem (SENA), Colombia  
Papel do investigador: teórico e redação  
Grupo de investigação GIMES

## María Isabel Arévalo Ramírez

ORCID 0000-0002-0602-0729  
miarevalo@sena.edu.co

Ingeniera Química  
Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA), Colombia  
Rol del investigador: teórico y escritura  
Grupo de investigación GIMES

Chemical Engineer  
National Apprenticeship Service (SENA), Colombia  
Role of the researcher: theoretical and writing  
GIMES research group

Engenheiro Químico  
Serviço Nacional de Aprendizagem (SENA), Colombia  
Papel do investigador: teórico e redação  
Grupo de investigação GIMES

## Maribel Reyes Hernández

ORCID 0009-0001-6676-7023  
mreyes689@soy.sena.edu.co

Especialización en Ingeniería de Producción  
Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA), Colombia  
Rol del investigador: teórico y escritura  
Grupo de investigación GIMES

Specialization in Production Engineering  
National Apprenticeship Service (SENA), Colombia  
Role of the researcher: theoretical and writing  
GIMES research group

Especialização em Engenharia de Produção  
Serviço Nacional de Aprendizagem (SENA), Colombia  
Papel do investigador: teórico e redação  
Grupo de investigação GIMES

**Cómo citar este artículo:** Martínez Quiroga, B. E., Arévalo Ramírez, M. I., y Reyes Hernández, M. (2023).

Implementación de polímeros termoplásticos reciclados como materia prima potencial para procesos de manufactura aditiva. *Ciencia y Poder Aéreo*, 19(1), 100-111 <https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaero.802>



## Implementación de polímeros termoplásticos reciclados como materia prima potencial para procesos de manufactura aditiva

## Implementation of recycled thermoplastic polymers as potential raw material for additive manufacturing process

## Implementação de polímeros termoplásticos reciclados como potencial matéria-prima para processos de fabrico aditivo

**Resumen:** En los últimos años se ha hecho evidente la problemática ambiental que gira en torno a los polímeros sintéticos, en especial los que son desechados al medio ambiente después de su vida útil. Por tal motivo, este trabajo de investigación se centra en la implementación de polímeros reciclados en tecnologías emergentes, como lo es la manufactura aditiva. Para esto se emplearon polipropileno, polietileno de alta densidad y polietileno de baja densidad reciclados, y se realizó la comparativa con materiales vírgenes de estos. Se realizó la selección, molienda, lavado y secado de los materiales recuperados, para su posterior transformación por proceso de extrusión, en donde se obtuvieron *pellets* de dichos materiales, los cuales fueron alimentados a un equipo de manufactura aditiva en el que se obtuvieron probetas para la caracterización mecánica y microestructural. Hasta el momento se han logrado obtener resultados con el polipropileno reciclado y original debido a que la investigación aún se encuentra en curso. Se observó que el polietileno reciclado presenta mayor adhesión a la cama de impresión y alta contracción en comparación con el original. Además, se presentan dificultades de impresión para el polietileno de alta densidad reciclado y original.

**Palabras clave:** extrusión; deposición fundida (MDF); polímero reciclado; prototipado.

**Abstract:** In recent years, the environmental problems that revolve around synthetic polymers have become evident, especially those that are discarded into the environment after their useful life. For this reason, this research work focuses on the implementation of recycled polymers in emerging technologies such as additive manufacturing. For this, recycled polypropylene, high-density polyethylene and low-density polyethylene were used and a comparison was made with their virgin materials. The selection, grinding, washing and drying of the recovered materials was carried out, for their subsequent transformation by extrusion process, where pellets of said materials were obtained, which were fed to additive manufacturing equipment in which test tubes were obtained for the mechanical and microstructural characterization. Until now, results have been achieved with the recycled and original polypropylene because the research is still ongoing. It was observed that the recycled polyethylene presents greater adhesion to the printing bed and high shrinkage compared to the original. In addition, there are printing difficulties for the original and recycled high-density polyethylene.

**Keywords:** Extrusion; fused deposition modelling (FDM); recycled polymer; prototyping.

**Resumo:** Nos últimos anos, tornaram-se evidentes os problemas ambientais relacionados com os polímeros sintéticos, especialmente aqueles que são descartados no ambiente após a sua vida útil. Por este motivo, este trabalho de investigação centra-se na aplicação de polímeros reciclados em tecnologias emergentes, como o fabrico aditivo. Para o efeito, foram utilizados polipropileno reciclado, polietileno de alta densidade e polietileno de baixa densidade, e foi feita uma comparação com os seus materiais vírgens. Foi realizada a seleção, moagem, lavagem e secagem dos materiais recuperados, para a sua posterior transformação por processo de extrusão, onde se obtiveram pellets destes materiais, que foram alimentados a um equipamento de fabrico aditivo no qual se obtiveram provetes para caracterização mecânica e microestrutural. Até o momento, os resultados foram obtidos com o polipropileno reciclado e original, pois a pesquisa ainda está em andamento. Observou-se que o polietileno reciclado apresenta maior aderência ao leito de impressão e elevada retração em comparação com o original. Além disso, existem dificuldades de impressão para o PEAD reciclado e original.

**Palavras-chave:** extrusão; deposição por fusão (MDF); polímero reciclado; prototipagem.

## Introducción

El consumo de plástico ha aumentado rápidamente en varios campos, lo que ha llevado a un aumento en la producción de residuos durante el siglo pasado (Turku *et al.*, 2018). En Colombia, el manejo de residuos plásticos es un problema controversial que nos lleva a buscar soluciones alternativas para su uso eficiente empleando nuevas tecnologías. Los colombianos producimos en promedio 1.4 millones de toneladas de plástico al año, de los cuales el 56 % son empaques, botellas y embalajes de todos los sectores productivos, de la cifra anterior, el 40 % se utiliza en la industria de alimentos y bebidas que llegan diariamente a manos de los consumidores (algo más de 313 mil toneladas) (Martínez, 2022). Según cifras del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), en el 2020 la tasa de reciclaje y nueva utilización fue de 14.46 % del total de residuos sólidos y productos residuales generados. Respecto a 2019, la tasa presentó un aumento de 2.1 puntos porcentuales (Martínez, 2022), lo que demuestra que en Colombia hay más personas y empresas que se preocupan por reciclar.

El problema ocasionado por los desechos plásticos en la actualidad ha generado que se busquen nuevas alternativas de fabricación de productos; sin embargo, existe una gran preocupación por los residuos generados de este tipo, ya que su tasa de degradación es muy baja, haciendo que estos se acumulan en los ecosistemas. Según datos del Programa para las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), se calcula que entre 19 y 23 millones de toneladas de plástico acaban cada año en lagos, ríos y mares, de los cuales menos del 10 % se recicla (Naciones Unidas, 2023).

Otro factor que afecta de manera directa a la acumulación de materiales plásticos en el ecosistema es que nuestros modelos de aprovechamiento de los recursos han sido hasta hace relativamente poco lineales, en donde todo lo que se fabrica y termina su vida útil es considerado desecho, el cual va a parar al medio ambiente acrecentando el problema actual (Morales *et al.*, 2023). Por esta razón, la economía circular se ha

convertido recientemente en un área de investigación en diseño sostenible, con la intención de mantener los materiales en uso durante tantos ciclos de vida como sea posible (Den Hollander *et al.*, 2017), lo que resulta en un beneficio para la sociedad y la economía en su conjunto, al reducir el uso del entorno natural como sumidero de desechos y disminuir la cantidad de materiales vírgenes empleados para las actividades económicas (Andersen, 2007).

La adopción de la economía circular también está impulsada por la Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) para minimizar el cambio climático, cerrar las brechas sociales y conservar la riqueza natural, entre otros aspectos que apoyan la reducción de la huella ecológica de la actividad humana (Gamez, 2015). Todas estas estrategias pretenden no solo promover el aumento en la tasa de reciclaje y aprovechamiento de residuos, sino también la búsqueda de alternativas innovadoras que generen un valor agregado a los sistemas de producción.

Por lo anterior, se hace de vital importancia la búsqueda de opciones para la implementación de estos materiales, bien sea con técnicas actuales o emergentes de fabricación como lo es la manufactura aditiva.

La manufactura aditiva es una técnica de creación de piezas a través de la adición de material capa a capa. Entre las tecnologías de impresión 3D más empleadas, se utiliza como coordenadas el control numérico por computadora (CNC), este es el caso de la técnica de deposición fundida (MDF) o *fused deposition modelling* (FDM). Para la transformación de material termoplástico por este método, es necesario que se implementen materias primas recuperadas, debido a la baja gama de materiales que se pueden emplear en este método, las cuales se encuentran limitadas a pesar de los avances tecnológicos en esta área (Jin *et al.*, 2020).

Esta tecnología se considera prometedora para la fabricación sostenible, debido a que brinda la oportunidad de ahorrar materias primas, aumentar la funcionalidad del producto, reducir el consumo de energía y también permite la producción bajo demanda de repuestos para reparación, en comparación con las

tecnologías sustractivas (Mani *et al.*, 2014). Esta técnica de fabricación permite la producción de artículos personalizados a precios bajos, ya que al no requerir moldes y herramientas especializadas estas son descontadas del valor final de la pieza, como sucede en el caso de la fabricación tradicional (Kristiawan *et al.*, 2021).

Los polímeros termoplásticos son los materiales más utilizados en las técnicas de modelado por deposición fundida debido a su alta procesabilidad, bajo costo, baja absorción de humedad y fácil manipulación (Kuo *et al.*, 2016). Entre los más empleados se encuentran el ácido poliláctico que ofrece ventajas como una impresión simple, una amplia variedad de colores y patrones, además de considerarse como “biodegradable”. Presenta algunos inconvenientes, como ser frágil y tener propiedades mecánicas débiles. La característica más importante de este material para la impresión 3D es su uso generalizado en la tecnología FDM debido a su bajo punto de fusión, falta de toxicidad, falta de irritación y biocompatibilidad (Liu *et al.*, 2019).

Otro material muy popular para impresión es el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), sin embargo, este presenta problemas al emplearse en prototipos, por lo tanto, debe imprimirse empleando una buena temperatura en la cama y pegamento, ya que es propenso a deformarse (Moradi *et al.*, 2023).

Dentro de las investigaciones recientes se evidencia la experimentación en el área de impresión 3D con diferentes materiales como lo son el tereftalato de polietileno con glicol (*polyethylene terephthalate with glycol* - PETG), polipropileno (*polypropylene* - PP), polietileno de baja densidad (*low-density polyethylene* - LDPE), polietileno de alta densidad (*high-density polyethylene* - HDPE) y poliestireno (*polystyrene* - PS), dando como resultado buenas propiedades de impresión y manejo. Además, menciona que el material con mejores características para este proceso es el HDPE, siendo el polímero con mejor manejo y acabados entre los materiales reciclados. Con un comportamiento similar se encuentra el PP, el cual no posee un diámetro tan uniforme como el HDPE, pero sí cercano al valor de 1.75mm siendo este un inconveniente para la impresión por FDM en cuanto a continuidad y necesitando

un sistema de supervisión adicional (Ramos Espinosa y Lombana Gómez).

Sin embargo, la fabricación de piezas empleando FDM no es perfecta, ya que pueden suceder fallos, lo que conlleva a que se generen desperdicios. Esto presenta una posibilidad de innovación en esta área, por tal motivo las investigaciones han buscado viabilizar el uso de residuos de impresión 3D como materia prima para la manufactura aditiva (Bossart *et al.*, 2020).

Existen investigaciones ya establecidas sobre la reutilización de algunos materiales como insumos para manufactura aditiva, este es el caso de la implementación de ABS reciclado obtenido de partes electrónicas, en donde se demostró que las piezas impresas elaboradas con material reciclado presentaron buenas características (Oliveira *et al.*, 2023). Algunos investigadores han optado por adicionar otros materiales a polímeros recuperados a fin de mejorar las propiedades de ambos materiales, un ejemplo de ello es la investigación realizada por Ahmed *et al.* (2020), en donde se mezcló PLA y arena de sílice en el que se evidenció que al aumentar la cantidad de esta última mejoraron las propiedades mecánicas del polímero recuperado. También, los estudios se han encaminado en la implementación de polímeros menos convencionales para impresión 3D, este es el caso del HDPE recuperado proveniente de barcos después de su vida útil, los cuales pueden transformarse en materiales aptos para el medio marino con tecnología de fabricación aditiva mediante impresión 3D, presentando buenas propiedades y demostrando que es posible emplear dicho material para el prototipado (Daniele *et al.*, 2023).

Esta investigación se centra en la implementación de materiales que aún no se encuentran destinados para la manufactura aditiva, entre estos se encuentran ciertos polímeros reciclados, principalmente, polipropileno reciclado (*recycled polyethylene* - RPP), polietileno de alta densidad reciclado (*recycled high-density polyethylene* - RHDPPE) y polietileno de baja densidad reciclado (*recycled low-density polyethylene* - RLDPE), obtenidos en su gran mayoría de envases y empaques industriales. Por lo anterior, los materiales fueron sometidos a diferentes tipos de transformación, con el objetivo de conocer su comportamiento

mecánico y facilidad de impresión, a fin de que en un futuro estas puedan ser empleadas en la manufactura aditiva como materias primas.

## Materiales y metodología

### Materiales

En esta investigación se emplearon como materias primas *pellets* originales del PP marca Sebia, con punto de fusión de 220 °C y densidad de 0.90 g/cm<sup>3</sup>, HDPE marca Marlex, cuya densidad se encuentra en el rango de 0.91-0.97 g/cm<sup>3</sup>, punto de fusión entre 90 °C-140 °C, y LDPE marca Ecopetrol, con densidad de 0.915-0,925 g/cm<sup>3</sup> y punto de fusión de 200 °C. Adicionalmente, se empleó material reciclado de envases y empaques de los polímeros mencionados anteriormente.

### Equipos

Los equipos empleados en esta investigación son: lavadora termoacuosa Snap-on; molino granulador Shini, modelo SG-1621N, con potencia de 1500 W y 60 Hz de frecuencia; tolva presecadora Moltech, modelo HHD-50 de 4.8 kW de potencia y frecuencia de 60 Hz; línea de extrusión peletizado de doble husillo, referencia PLA-30-30 y equipo de manufactura aditiva Tumaker NX Pro Pellets. Para los ensayos mecánicos se empleó una máquina universal de ensayos marca Besmax con celda de 5 toneladas y un durómetro para polímeros marca Check-Line con indentador. Se empleó un microscopio electrónico de barrido (SEM), marca Phenom GSR Desktop para los análisis microestructurales.

### Preparación del material

Debido a que en este trabajo se emplearon materiales recuperados, se hace necesario realizar varias etapas para que este pueda ser transformado (figura 1).

La primera etapa es la recepción del material; en esta se realiza el acopio de todos los materiales plásticos que se desechan en el centro de materiales y ensayos del SENA, los cuales en su mayoría vienen de embalajes de alimentos (figura 1a).

En la segunda etapa se realiza la selección y clasificación del material. Dentro de la recuperación hay tres tipos de polímeros que destacan; RPP, RHDPE y RLDPE, para su identificación se tiene en cuenta la coloración al flexionar, facilidad de flectar, color de la llama, color de la ceniza y olor después de ser quemado. En el cual cada uno de los polímeros presenta un comportamiento característico (tabla 1).

Con los materiales debidamente seleccionados se da inicio a la tercera etapa, en donde se reduce el tamaño de cada polímero reciclado a 5 mm aproximadamente, empleando un molino granulador (figura 1c). En la siguiente etapa se elimina cualquier contaminante que pueda afectar la calidad final del material, para esto se emplea una lavadora termoacuosa, la cual por medio de un chorro de agua con detergente elimina partículas no deseadas, como se muestra en la figura 1d.

En la etapa final del proceso, se elimina toda la humedad que los materiales adquieren usando una tolva presecadora. Se empleó una temperatura de 88 °C durante dos horas para cada material (figura 1e), teniendo en cuenta que el equipo empleado contiene temperaturas establecidas para el correcto secado de cada uno de los materiales poliméricos.

Tabla 1.  
Datos para la caracterización de polímeros mediante prueba de la llama

Polímero.	Color a la flexión.	Dureza.	Color de la llama.	Olor al ser quemado.	Ceniza.
Polietileno de alta densidad.	Sin coloración.	Media.	Azul con amarillo.	Exosto.	Coloración amarilla.
Polietileno de baja densidad.	Sin coloración.	Baja.	Azul.	Vela.	Sin cambio de color.
Polipropileno.	Blanco.	Alta.	Amarillo.	Aromático.	Blanca lechosa.

Fuente: elaboración propia.

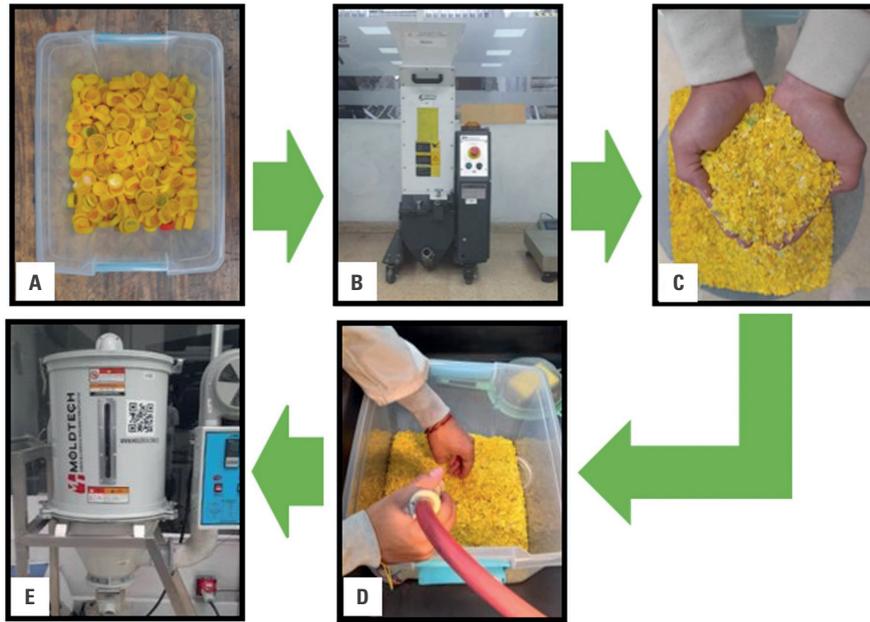


Figura 1. Etapas para el alistamiento del material

Nota: proceso de alistamiento de material recuperado. a) material reciclado de envases; b) molino granulador; c) material reciclado molido; d) lavado de material reciclado; e) secado de material.

Fuente: elaboración propia.

## Proceso de extrusión-peletizado

Los materiales obtenidos (RPP, RLDPE y RHDPE) son transformados por separado empleando una máquina extrusora de doble tornillo. Este proceso inicia con el cargue del material en la tolva de alimentación, en donde este es llevado por los tornillos haciéndolo pasar por cada una de las zonas de temperatura,

generando un ablandamiento en el material, para ser impulsado a través de las boquillas de salida del equipo en forma viscoelástica obteniendo así hilos, seguido a esto se pasa por agua que está a temperatura ambiente (20 °C), para realizar el enfriamiento del material y posteriormente generar hilos, los cuales son cortados en cilindros de 5 mm con ayuda de una peletizadora, como se ilustra en la figura 2.

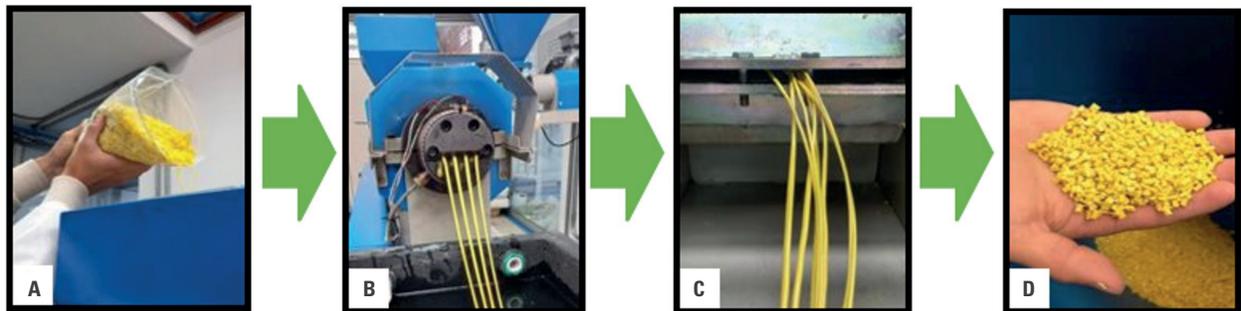


Figura 2. Etapas de extrusión y peletizado del material

Nota: proceso de transformación por extrusión de polímeros recuperados.

a) ingreso del material a la tolva de extrusión; b) extrusión de materia reciclado; c) filamentos para peletizado; d) peletizado material reciclado.

Fuente: elaboración propia.

Los parámetros de transformación en el proceso de extrusión para cada material se encuentran especificados en la tabla 2.

**Tabla 2.**  
Parámetros de extrusión para materiales recuperados

RPP		RHDPE		RLDPE	
Zonas.	Temperatura (°C).	Zonas.	Temperatura (°C).	Zonas.	Temperatura (°C).
1.	50.	1.	50.		50.
2.	100.	2.	110.		80.
3.	130.	3.	130.		120.
4.	150.	4.	145.		150.
5.	175.	5.	175.		160.
Frecuencia de halador (Hz).	30.	Frecuencia de halador (Hz).	30.	Frecuencia de halador (Hz).	55.
Frecuencia de tornillo (Hz).	30.	Frecuencia de tornillo (Hz).	30.	Frecuencia de tornillo (Hz).	39.

Fuente: elaboración propia.

## Proceso de modelado e impresión 3D

El proceso de impresión comienza con un diseño digitalizado en tres dimensiones que se puede obtener de diferentes maneras, una de ellas es empleando técnicas de modelado 3D. En esta investigación se utilizó el programa Rhino7 para generar el diseño tridimensional de las probetas para ensayos mecánicos, microestructurales y las diferentes geometrías que permitirán evaluar la facilidad de impresión de los materiales. Se emplearon las medidas establecidas por las normas ASTM D638 y ASTM D790 para el modelado de las probetas tipo corbatín y cuadrada.

Después de obtener el prototipo digitalizado, se procede a establecer parámetro de impresión haciendo uso del programa de impresión Simplify3D, para esto se cargan los archivos en formato .stl y se modifican los parámetros de impresión, como lo son la orientación de la pieza, porcentaje de relleno, altura de capa, velocidad de impresión, enfriamiento, y otros parámetros adicionales que garantizan una buena impresión. Finalmente, se obtiene un archivo gcode con todas las especificaciones, el cual es cargado a la plataforma de la máquina de prototipado (tabla 3).

**Tabla 3.**  
Parámetros de impresión

Parámetros	Configuración
Temperatura de impresión inspección visual (°C).	210-230.
Temperatura de impresión (°C).	250-270.
Temperatura de cama (°C).	98-110.
Porcentaje de relleno.	100.
Orientación de impresión.	45°/-45°.
Dirección de construcción.	Plano, base mayor.
Altura de capa (mm).	0.15.
Tasa de extrusión Inspección visual.	100 %.
Diámetro de la boquilla (mm).	0.8.

Fuente: elaboración propia.

Con el modelo 3D cargado a la máquina, se procede a alimentar la tolva de la impresora con los pellets del material que se trabajará, para poder iniciar con la impresión. Este equipo cuenta con dos zonas de calentamiento, la primera sirve para preparar el material, calentarlo mediante resistencias e impulsarlo con la ayuda del tornillo sin fin, lo que permite su desplazamiento hacia la segunda zona donde se encuentra la temperatura más alta, la cual corresponde a la boquilla de salida de la máquina. Esta última zona se encarga de fundir el material para que al pasar por esta pueda manipularse, haciendo que se deposite en las coordenadas cartesianas dispuestas por el gcode (figura 3).

## Ensayos mecánicos

Después de la obtención de las probetas para cada material, es necesario que se evalúen sus características mecánicas, para este fin se realizaron ensayos de tensión y dureza. La resistencia a la tensión de los materiales se determinó utilizando una máquina de ensayos universal con celda de 5 toneladas, a una velocidad de 5 mm/min y se emplearon para este ensayo las probetas tipo corbatín manufacturadas, cuyas medidas corresponden a la norma ASTM D 638, bajo características ambientales controladas en el laboratorio, siendo la temperatura ambiente de 20 °C y una humedad del 58 %.

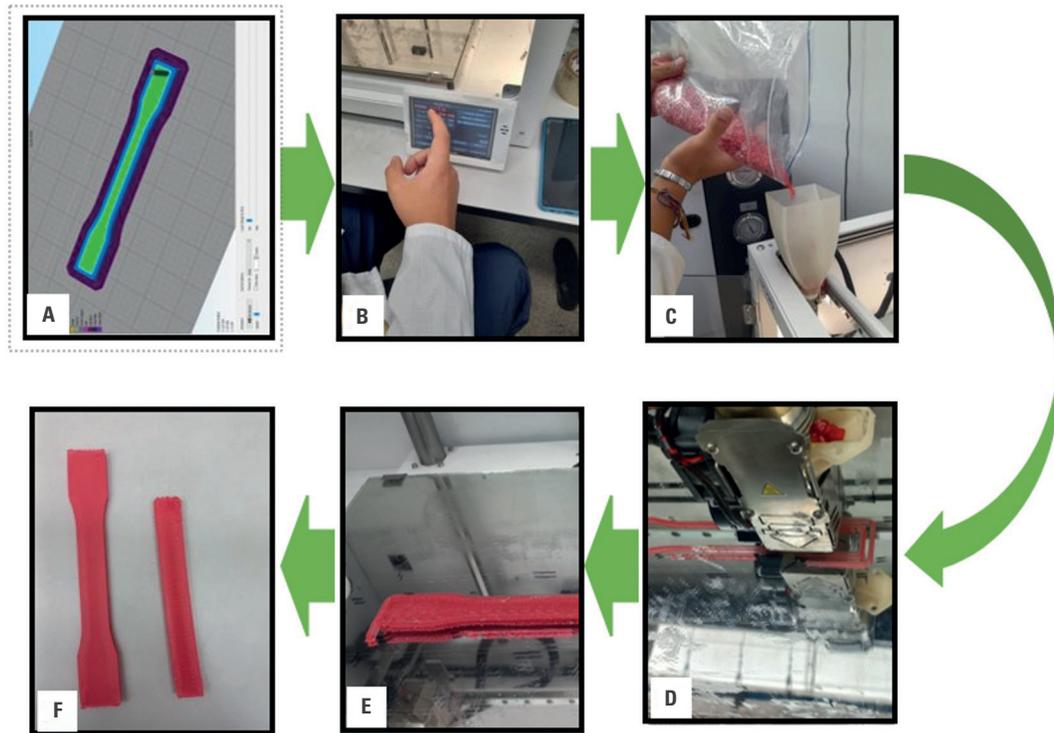


Figura 3. Etapas del proceso de modelado 3D

Nota: modelado e impresión 3D de probetas. a) modelo tridimensional de probetas; b) parámetros de impresión; c) cargue de material a la tolva de impresión; d) prototipado de probetas; e) comportamiento del material en impresión; f) prototipo final de probeta.

Fuente: elaboración propia.

Finalmente, se determinó la dureza del material en escala shore D, con un durómetro de polímeros. Para este ensayo se emplearon probetas cuadradas y se tomó su dureza en cinco puntos diferentes a lo largo del ítem.

### Microscopía electrónica de barrido (SEM)

Para las pruebas microestructurales se empleó un microscopio electrónico de barrido y se observó la zona cercana a la ruptura de cada material después de ser sometidas a esfuerzo. Se tomaron imágenes a 1000 aumentos, con una escala de 200  $\mu\text{m}$  a la parte transversal, así como a la longitudinal, dichas escalas fueron asignadas de esa manera para obtener la mejor calidad de imagen referente a la zona de ruptura y en donde se visualiza mejor las características que este tiene.

## Resultados y discusión

Teniendo en cuenta que la investigación se encuentra en curso, solo se cuentan con resultados parciales de algunos de los materiales empleados.

### Procesos de extrusión y peletizado

El proceso de extrusión de los materiales empleados en esta investigación es un paso fundamental, a fin de obtener una buena calidad en las etapas posteriores. Esto se evidenció debido a que, si el peletizado obtenido al final del proceso presenta irregularidades en su tamaño (Figura 4b), este genera un conflicto en la fase de impresión, ya que no se cumple con el estándar establecido de alimentación de la prototipadora. Por lo

tanto, se requirió modificar velocidades en el halador, para obtener *pellets* con tamaños similares, para esto se tuvo en cuenta la fluidez del material y se realizaron diferentes pruebas modificando la frecuencia del halador entre la velocidad más baja, media y alta, obteniendo así que para el RPP y RHDPE se requirió emplear la frecuencia más baja, y para el RLDPE la más alta. Esto debido a que el RPP y el RHDPE son menos fluidos y presentan baja elasticidad, caso contrario de lo sucede con el RLDPE, sin embargo, en algunos casos se hizo necesario realizar este proceso de manera manual.

### Proceso de modelado e impresión 3D

En esta investigación se trabajó con el mismo modelo 3D para los tres materiales. En cuanto al proceso de impresión se evidenció que la adhesión a la cama es mejor con el RPP que con el PP. En cuanto a la facilidad de impresión se observó que el PP tiene un comportamiento más apropiado que el RPP. Aunque ambos materiales tienen características similares, debido al reprocesamiento y posibles aditivos del RPP, este

presenta una mayor contracción en comparación con el PP (figura 5.). Se observó que el PP presenta una mejor fluidez que el RPP, esto puede deberse en parte a que la geometría del *pellet* del PP es más homogénea que el de RPP. Cabe resaltar que la configuración del peletizado del PP empleado en la investigación es esférica, mientras que la obtenida para el RPP es cilíndrica, lo que pudo interferir en el proceso de impresión.

En cuanto al HDPE y RHDPE se comprueba que no tiene una adherencia óptima para impresión (figura 6.), esto puede deberse en parte a que el material no llega a la temperatura de trabajo correcta, este parámetro se encuentra limitado en la máquina empleada, por lo tanto, no fue posible realizar pruebas con temperaturas superiores. Además, cuando el HDPE y el RHDPE son depositados en la cama por la boquilla, el material se rompe a medida que se va elongando, lo que dificulta la impresión, generando espacios que impiden la correcta adherencia entre capas. Se hace necesario investigar a fondo maneras en las que los tipos de materiales puedan ser empleados en la manufactura aditiva. Es importante tener en cuenta que



Figura 4. Peletizado de materiales recuperados  
Nota: a) *pellets* de RHDPE; b) *pellets* de RPP; c) *pellets* de RLDPE  
Fuente: elaboración propia.

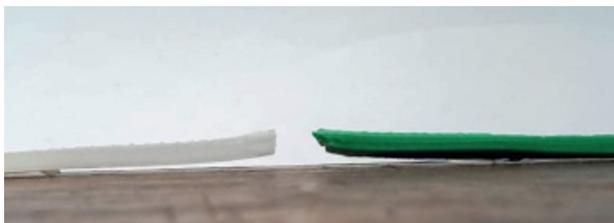


Figura 5. Probeta cuadrada con PP y RPP  
Nota: se evidencia que la contracción en el RPP es más alta que en el PP.  
Fuente: elaboración propia.

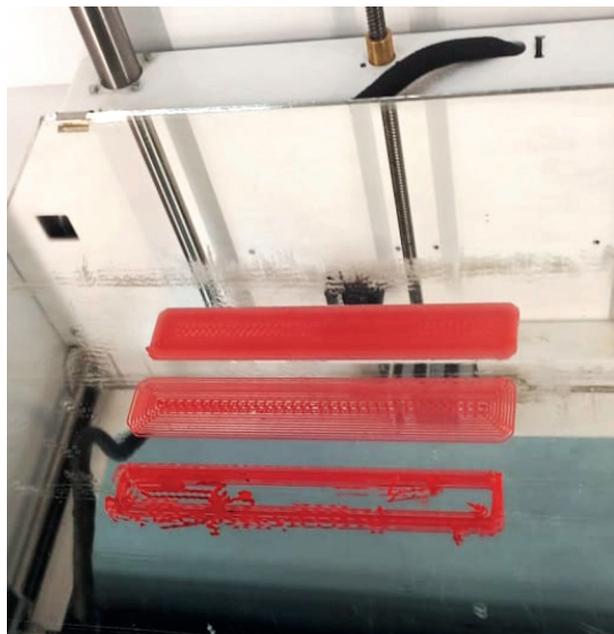


Figura 6. Pruebas de impresión con RHDPE  
Nota: pruebas realizadas con diferentes parámetros de impresión.  
Fuente: elaboración propia.

debido a que estos materiales provienen de otros procesos, como lo son la fabricación de embalaje industrial y se desconoce los posibles aditivos que estos puedan tener, es recomendable en futuras investigaciones que se realiza dicha estandarización, a fin de que estos materiales puedan ser óptimos para el prototipado por FDM.

## Microscopía electrónica de barrido

En esta fase de la investigación se cuentan con los resultados de análisis microestructural del PP y RPP. Como se observa en la figura 1, en a y b se muestran zonas marcadas por el límite de grano, sin embargo, también se denotan partes que no lo presentan, correspondiente al comportamiento semicristalino del PP, mientras que si observamos en la misma figura 1, pero en la c y d no se encuentra definido el límite de grano, lo que se debe a que a medida que el material es sometido a diferentes transformaciones empleando calor, este es obligado a cambiar su morfología de frágil a dúctil (Vidakis *et al.*, 2020).

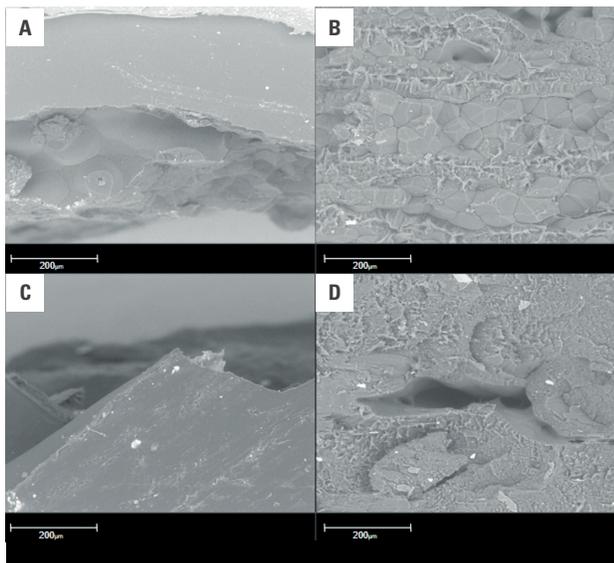


Figura 7. Ensayo de microscopía por barrido

Nota: fotografía del ensayo de microscopía electrónica de barrido.

a) sección longitudinal de PP; b) sección transversal PP;  
c) sección longitudinal RPP; d) sección transversal RPP.

Fuente: elaboración propia.

Este análisis se realizó sobre la sección de la falla por ruptura del material después de los ensayos de tensión, en donde se puede apreciar que se generan más espacios (figura 1) en el proceso de impresión del RPP que del PP, esto también se pudo comprobar en el proceso de manufacturado, ya que se observaba que al imprimir con RPP en muchas ocasiones se generaba la ruptura del material, lo que puede llevar a que este tenga una menor resistencia a la tracción.

La ruptura del RPP que ocasiona concentradores de esfuerzo a lo largo del modelo impreso, es ocasionado principalmente por la pérdida de propiedades, como la viscosidad, ya que se desconoce cuántos reprocesamientos térmicos tuvo el material antes del proceso de extrusión e impresión empleados para esta investigación. Esto puede afectar la calidad final de las piezas, sin embargo, pueden realizarse mezclas con material original o incluso con otros polímeros que ayuden a contrarrestar el problema.

## Conclusiones

Debido a la naturaleza de los resultados, se pudo evidenciar varias conclusiones sobre los materiales recuperados, desde el proceso de extrusión hasta su paso por la impresora 3D. Una de las primeras conclusiones es el comportamiento del polímero en su paso por la extrusora, hay heterogeneidad en los *pellets* de RLDPE, en comparación con los de RLDPE y RPP; aunque aún sigue en curso de investigación el mejoramiento de este proceso.

En segunda instancia, la adhesión del material en la cama de impresión es mucho mejor en el RPP que en el PP, no pudiendo ser comparable con lo que sucedió con el RHDPE, el HDPE, el LDPE y el RHDPE, siendo que no hubo ningún tipo de adhesión y, por el contrario, no fue posible su impresión por FDM.

Debido a que hasta el momento se cuenta con las probetas de RPP y PP se procederá a realizar ensayos mecánicos a estos materiales, en donde se espera evidenciar la pérdida de las propiedades del RPP debido a su reprocesamiento o uso de aditivos.

En cuanto al RHDPE, HDPE, RLDPE y LDPE se espera lograr en las siguientes etapas de la investigación que estos materiales puedan ser empleados en la manufactura aditiva, para ello se han investigado algunas alternativas de modificación a estos materiales, con el fin de mejorar su fluidez, viscosidad y reducir su punto de fusión, esto tentativamente se realizará adicionando otro tipo de materiales.

## Referencias

- Ahmed, W., Siraj, S. & Al-Marzouqi, A. H. (2020). 3D printing PLA waste to produce ceramic based particulate reinforced composite using abundant silica-sand: Mechanical properties characterization. *Polymers*, 12(11), 2579. <https://doi.org/doi:10.3390/polym12112579>
- Andersen, M. S. (2007). An introductory note on the environmental economics of the circular economy. *Sustainability Science*, 2(1), 133-140. <https://doi.org/doi:10.1007/s11625-006-0013-6>
- Bossart, J. L., González, S. R. & Greenberg, Z. (2020). 3D printing filament recycling for a more sustainable library makerspace. *College & Undergraduate Libraries*, 27(2-4), 369-384. <https://doi.org/doi:10.1080/10691316.2021.1899093>
- Daniele, R., Armoni, D., Dul, S. & Alessandro, P. (2023). From nautical waste to additive manufacturing: Sustainable recycling of high-density polyethylene for 3D printing applications. *Journal of Composites Science*, 7(8), 320. <https://doi.org/doi:10.3390/jcs7080320>
- Den Hollander, M. C., Bakker, C. A. & Hultink, E. J. (2017). Product design in a circular economy: Development of a typology of key concepts and terms: Key concepts and terms for circular product design. *Journal of Industrial Ecology*, 21(3), 517-525. <https://doi.org/doi:10.1111/jiec.12610>
- Gamez, M. J. (2015). *Objetivos y metas de desarrollo sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- Gómez, G. A. y Ramos, G. (2019). *Diseño e implementación de un sistema de extrusión de filamento*. Universidad Autónoma de Occidente. <https://red.uao.edu.co/bitstream/handle/10614/11024/T08590.pdf>
- Jin, M., Neuber, C. & Schmidt, H. W. (2020). Tailoring polypropylene for extrusion-based additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 33(101101). <https://doi.org/doi:10.1016/j.addma.2020.101101>
- Kristiawan, R. B., Imaduddin, F., Ariawan, D., Ubaidillah, B. & Arifin, Z. (2021). A review on the fused deposition modeling (FDM) 3D printing: Filament processing, materials, and printing parameters. *Open Engineering*, 11(1), 639-649. <https://doi.org/doi:10.1515/eng-2021-0063>
- Kuo, C. C., Liu, L. C., Teng, W. F., Chang, H. Y., Chien, F. M., Liao, S. J. & Chen, C. M. (2016). Preparation of starch/acrylonitrile-butadiene-styrene copolymers (ABS) biomass alloys and their feasible evaluation for 3D printing applications. *Composites Part B, Engineering*, 86, 36-39. <https://doi.org/doi:10.1016/j.compositesb.2015.10.005>
- Liu, Z., Wang, Y., Wu, B., Cui, C., Guo, Y. & Yan, C. (2019). A critical review of fused deposition modeling 3D printing technology in manufacturing polylactic acid parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 102(9-12), 2877-2889. <https://doi.org/doi:10.1007/s00170-019-03332-x>
- Mani, M., Lyons, K. W. & Gupta, S. K. (2014). Sustainability characterization for additive manufacturing. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 119, 419. <https://doi.org/doi:10.6028/jres.119.016>
- Martínez, S. (2022). *Todo lo que debes saber sobre la ley que prohíbe los plásticos de un solo uso en Colombia*. Goula. <https://goula.lat/todo-lo-que-debes-saber-sobre-la-ley-que-prohibe-los-plasticos-de-un-solo-uso-en-colombia/>
- Moradi, M., Beygi, R., Yusof, N., Amiri, A., da Silva, L. F. & Sharif, S. (2023). 3D printing of acrylonitrile butadiene styrene by fused deposition modeling: Artificial neural network and response surface method analyses. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 32(4), 2016-2028. <https://doi.org/doi:10.1007/s11665-022-07250-0>
- Morales, M. A., Maranon, A., Hernández, C., Michaud, V. & Porras, A. (2023). Colombian sustainability perspective on fused deposition modeling technology: Opportunity to develop recycled and biobased 3D printing filaments. *Polymers*, 15(3), 528. <https://doi.org/doi:10.3390/polym15030528>
- Naciones Unidas. (2023). *Día mundial del medio ambiente*. <https://www.un.org/es/observances/environment-day>

Oliveira, R., Silva, M. H., Agrawal, P., Brito, G., Cunha, C. T. & Mélo, T. J. (2023). *Recycling of acrylonitrile butadiene styrene from electronic waste for the production of Eco-friendly filaments for 3D printing*. 3D Printing and Additive Manufacturing. <https://doi.org/doi:10.1089/3dp.2022.0211>

Ramos Espinosa, G. y Lombana Gómez, G.(2019). *Diseño e implementación de un sistema de extrusión de filamento para impresión 3D a partir de botellas recicladas*. Universidad Autónoma de Occidente. <https://red.uao.edu.co/bitstream/handle/10614/11024/T08590.pdf>

Turku, I., Kasala, S. & Kärki, T. (2018). Characterization of polystyrene wastes as potential extruded feedstock filament for 3D printing. *Recycling*, 3(4), 57. <https://doi.org/doi:10.3390/recycling3040057>

Vidakis, N., Petousis, M., Tzounis, L., Maniadi, A., Velidakis, E., Mountakis, N. & Mechtcherine, V. (2020). Sustainable additive manufacturing: Mechanical response of Polypropylene over multiple recycling processes. *Sustainability*, 13(1), 159. <https://doi.org/doi:10.3390/su13010159>

# Calificación jurídica y régimen de propiedad de los meteoritos en Chile

Fecha de recibido: 07 de junio 2023	Fecha de aprobado: 03 de agosto 2023
Reception date: June 07, 2023	Approval date: August 03, 2023
Data de recebimento: 07 de junho de 2023	Data de aprovação: 03 de agosto de 2023

## Marcela Tobar Garrido

<https://orcid.org/0009-0002-2826-0886>  
mtobar@fach.mil.cl

Magíster en Derecho

Asesora Legal de la Dirección Espacial - Fuerza Aérea de Chile, Chile  
Rol del investigador: teórico y escritura

Mestre em Direito

Assessor jurídico da Direção do Espaço - Força Aérea Chilena, Chile  
Função do pesquisador: teórico e redação

Master in Law

Legal Advisor of the Space Directorate - Chilean Air Force, Chile  
Researcher's role: theoretical and writin

**Cómo citar este artículo:** Tobar Garrido, M. (2023). Calificación jurídica y régimen de propiedad de los meteoritos en Chile. *Ciencia y Poder Aéreo*, 19(1), 112-124. <https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaereo.798>



## Calificación jurídica y régimen de propiedad de los meteoritos en Chile

**Resumen:** La presente investigación tuvo por objetivo estudiar la calificación jurídica de los meteoritos, desde la perspectiva del análisis comparativo de distintos ordenamientos jurídicos, a fin de poder establecer, para el caso de la legislación nacional, la importancia de su regulación para efectos científicos y de certeza jurídica en cuanto a su uso y disposición. La presente investigación fue de carácter exploratoria, para lo cual se recopilaron diversos antecedentes ya existentes para su análisis a través de una metodología cualitativa. En este marco, se analizó la información y textos sobre la materia, evidenciándose las brechas entre la situación normativa actual y la deseable en materia de regulación legal de los meteoritos, lo que permitió formular propuestas de medidas específicas en el ámbito de estudio.

Los meteoritos han sido estudiados desde una perspectiva científica por su gran relevancia en la investigación del origen de nuestro planeta y del universo. Su forma corresponde a formación rocosa similar a la encontrada en nuestro planeta, pero su composición estudiada hasta ahora refiere metales que no tienen registro en la tierra. Los meteoroides, cuya forma más conocida radica en el vocablo “meteorito” son, en la mayoría de los casos, elementos que ingresan a la atmósfera y luego caen a la superficie terrestre. Sin embargo, su régimen legal no ha sido abordado de manera sistémica. Si bien existe el registro de ingreso de meteoroides a la atmósfera, no lo hay respecto a la disposición de sus restos. La importancia de su regulación radica en varios aspectos. El primero, desde la seguridad en su manipulación. Luego, la importancia de su composición, por último, el régimen de propiedad que los ampara, que permite establecer sus condiciones de uso y disposición, que va desde lo científico a su posible explotación comercial. El régimen normativo de los meteoritos debe abordarse desde una perspectiva del derecho internacional, también a través de la regulación de la nación depositaria de los restos. Su monitoreo constante y permanente merece atención regulatoria integrada y coordinada, ya que la trayectoria de los meteoroides podría coincidir con satélites, aeronaves u otros ingenios espaciales, pudiendo provocar interferencias o accidentes que afecten la vida de las personas. Su regulación y régimen de disposición en Chile, es una tarea importante de abordar y relevante desde la perspectiva de seguridad y bienestar de las personas.

De igual forma, siempre habrá un área no cubierta por la legislación ni las capacidades de un país con áreas pobladas y que los Estados tendrán que prever con la mitigación del daño causado. Lo anterior, es una oportunidad para el diseño y elaboración de políticas públicas en tal sentido, y de la colaboración nacional e internacional. Esta condición permitirá crear nuevas capacidades e incrementar los niveles de seguridad de los ciudadanos.

**Palabras clave:** meteoritos; ordenamientos jurídicos; uso; disposición; regulación legal.

## Legal qualification and ownership of meteorites in Chile

**Abstract:** The purpose of this research was to study the legal classification of meteorites, from the perspective of the comparative analysis of different legal systems, in order to be able to establish, in the case of national legislation, the importance of its regulation for scientific purposes and legal certainty in regarding its use and disposal. The present investigation was of an exploratory nature, for which various already existing antecedents were compiled for analysis through a qualitative methodology. Within this framework, the information and texts on the matter were analyzed, evidencing the gaps between the current regulatory situation and the desirable one in terms of legal regulation of meteorites, which allowed the formulation of proposals for specific measures in the field of study.

Meteorites have been studied from a scientific perspective due to their great relevance in the investigation of the origin of our planet and the universe. Its shape corresponds to a rock formation similar to that found on our planet, but its composition studied so far refers to metals that have no record on earth. Meteoroids, whose best known form lies in the word “meteorite” are, in most cases, elements that enter the atmosphere and then fall to the earth’s surface. However, its legal regime has not been addressed in a systemic manner. Although there is a record of meteoroids entering the atmosphere, there is none regarding the disposal of their remains. The importance of its regulation lies in several aspects. The first, from the security in its handling. Then, the importance of their composition and lastly, the property regime that protects them, which allows establishing their conditions of use and disposal, which ranges from the scientific to their possible commercial exploitation. The normative regime of meteorites must be approached from an international law perspective and also, through the regulation of the nation depositing the remains. Their constant and permanent monitoring also deserves integrated and coordinated regulatory attention, since the trajectory of meteoroids could coincide with satellites, aircraft or other space devices, potentially causing interference or accidents that affect people’s lives. Its regulation and disposal regime in our country is an important task to address and relevant from the perspective of people’s safety and well-being.

## Qualificação jurídica e propriedade dos meteoritos no Chile

In the same way, there will always be an area not covered by the legislation or the capacities of a country that is related to populated areas and that the States will have to anticipate with the mitigation of the damage caused. It is an opportunity for the design and elaboration of public policies in this sense and for national and international collaboration. This condition will allow the creation of new capacities and increase the levels of security for citizens.

**Keywords:** Meteorites; legal systems; use; disposal; legal regulation.

**Resumo:** O objetivo desta investigação foi estudar a qualificação jurídica dos meteoritos na perspectiva da análise comparativa de diferentes ordenamentos jurídicos, de modo a poder estabelecer, no caso da legislação nacional, a importância da sua regulamentação para fins científicos e a segurança jurídica quanto à sua utilização e eliminação. A presente investigação teve um carácter exploratório, para o qual foram compilados vários antecedentes existentes para análise através de uma metodologia qualitativa. Neste âmbito, foram analisadas informações e textos sobre o tema, evidenciando as lacunas existentes entre a situação normativa atual e a desejável no que respeita à regulamentação legal dos meteoritos, o que permitiu formular propostas de medidas específicas para a área de estudo.

Os meteoritos têm sido estudados numa perspectiva científica devido à sua grande relevância na investigação da origem do nosso planeta e do universo. A sua forma corresponde a formações rochosas semelhantes às encontradas no nosso planeta, mas a sua composição tem sido até agora estudada para metais que não têm registo na Terra. Os meteoróides, mais conhecidos por "meteoritos", são, na maioria dos casos, elementos que entram na atmosfera e depois caem à superfície da Terra. No entanto, o seu regime jurídico não tem sido abordado de forma sistemática. Embora haja registo da entrada de meteoróides na atmosfera, não há registo da eliminação dos seus detritos. A importância da sua regulamentação reside em vários aspectos. O primeiro é a segurança do seu manuseamento. Depois, a importância da sua composição e, por fim, o regime de propriedade que os protege, que permite estabelecer as suas condições de utilização e de eliminação, que vão desde o carácter científico até à sua eventual exploração comercial. O regime regulamentar dos meteoritos deve ser abordado numa perspectiva de direito internacional, também através da regulamentação da nação depositária dos restos mortais. A sua monitorização constante e permanente merece uma atenção regulamentar integrada e coordenada, uma vez que a trajetória dos meteoróides pode coincidir com satélites, aeronaves ou outras naves espaciais, podendo causar interferências ou acidentes que afetem a vida humana. A sua regulamentação e regime de eliminação no Chile é uma tarefa importante e relevante do ponto de vista da segurança e bem-estar das pessoas.

Da mesma forma, haverá sempre uma área não coberta pela legislação ou pelas capacidades de um país com áreas povoadas e que os Estados terão de prever com a mitigação dos danos causados. Esta é uma oportunidade para a conceção e elaboração de políticas públicas neste domínio e para a colaboração nacional e internacional. Esta condição permitirá a criação de novas capacidades e o aumento dos níveis de segurança dos cidadãos.

**Palavras-chave:** meteoritos; sistemas jurídicos; utilização; eliminação; regulamentação jurídica.

## Introducción

Cada vez que un meteoroido logra ingresar a la atmósfera terrestre y cae sin desintegrarse, se transforma en un objeto de interés, tanto para la ciencia como para otros actores, inclusive coleccionistas. De esta forma, un meteorito posee valor, haciéndose necesaria la regulación de su uso y disposición. La importancia de su normativa incluye la seguridad en su manipulación, su composición y el régimen de propiedad que los ampara, lo que permite establecer sus condiciones de uso y disposición, desde lo científico hasta su posible explotación comercial. Su monitoreo constante y permanente también merece atención regulatoria integrada y coordinada, ya que la trayectoria de los meteoroides podría coincidir con satélites, aeronaves u otros ingenios espaciales, pudiendo provocar interferencias o accidentes que afecten la vida de las personas o la seguridad de vuelo.

La regulación legal de los meteoritos no es uniforme en los diversos ordenamientos jurídicos, pasando desde un silencio normativo hasta una detallada disposición de los objetos, su uso y dominio.

Para poder definir un meteorito, es necesario entender el concepto de meteoroido. Los meteoroides son el nombre que se le da a todo objeto, generalmente rocoso en composición, que se encuentra en el espacio exterior sin una órbita regular (lo que lo diferencia de los asteroides). Sus tamaños y diámetros varían desde un grano de arena hasta ciudades enteras y, por lo general, circulan sin dirección ni rumbo fijo. También es necesario desatacar que no poseen ningún tipo de “cola” de gases congelados, pues eso los categorizaría como un cometa (que también tienen órbitas regulares).

En segundo lugar, cualquier meteoroido que ingresa a la atmósfera de un planeta (no exclusivamente a la Tierra) se le denomina meteorito (o “estrella fugaz” como se le conoce coloquialmente). Estos se caracterizan por presentar una estela de fuego que se forma producto del intenso roce atmosférico que tiene el objeto con los componentes gaseosos de la atmósfera.

La energía que se libera de este depende tanto de su densidad como del tamaño del planeta. Se libera tanta energía que algunos meteoritos pueden ser más luminosos que algunas estrellas, los que se conocen como “bolas de fuego”. Acorde a los datos de la NASA (agencia espacial norteamericana), unas 48.5 toneladas de material meteorítico cae a la Tierra cada día (NASA, 2019). Por último, un meteorito que sobrevive a su caída atmosférica y choca con el suelo se le conoce como meteorito.

Los meteoroides y asteroides que se encuentran en el sistema solar (principalmente en los cinturones de asteroides y Kuiper) tienen un origen discutido. Muchos científicos e investigadores creen que la hipótesis más probable de su creación son el resultado de la destrucción de planetoides en la vida temprana del sistema solar. Dado esto, su composición es testimonio patente de los elementos que formaron los satélites y planetas, tal como demuestra una investigación de los científicos Jodie Gradie y Edward Tedesco; en ella, afirman que los meteoroides y asteroides tienen esta evidencia puesto que han sufrido muy pocos cambios geoquímicos desde su formación (Tedesco, 1982). Los científicos afirman que mediante el uso de técnicas como la observación de reflexión espectral y la medición del albedo radiactivo, se puede inferir en la composición de estos cuerpos. El criterio de clasificación, explican, consiste en analizar la presencia o ausencia de ciertas bandas de absorción minerales y su tasa de reflexión. Comentan, en el caso específico de los asteroides que, si sus bandas coinciden con las de otros cuerpos en un lugar específico del espacio, ese fue su lugar de origen y es más probable de encontrar elementos metálicos pesados. Si estas no coinciden, significa que el asteroide fue movido de su lugar de origen por fuerzas mecánicas celestiales no conocidas (Tedesco, 1982).

En otro artículo publicado por el sitio divulgador científico *Phys*, se comenta que existen diversos tipos de asteroides y cometas con elementos diferentes. Muchos de ellos contienen minerales raros de la Tierra (como el platino o el iridio), hierro, y hasta cometas con minerales orgánicos y agua (Caín, 2015). Por

ejemplo, el investigador Fraser Caín (2015) señala que el recientemente descubierto asteroide 2012 DA14 vale US \$20 trillones en minerales.

Cuando cae un objeto espacial a la atmósfera de la Tierra supone un riesgo tanto para la infraestructura como para la seguridad de muchos países. Es por esta razón que muchos países han empezado un programa de concientización situacional espacial (o SSA, por sus siglas en inglés) cuyo objetivo es reducir y, en lo posible, eliminar el riesgo que la reentrada de estos objetos pudiese tener en las actividades espaciales. De esto habla un informe realizado por un grupo de científicos de la Universidad Coreana de Ciencias y Tecnología, publicado en la *Revista de Astronomía y Ciencias espaciales* (JASS, por sus siglas en inglés). De acuerdo con los datos que manejan del informe de situación del satélite, 42 939 objetos han sido puestos en órbita terrestre, de los cuales 24 175 han sido destruidos en su reingreso a la atmósfera, es decir, un 56.3 %, aproximadamente (Choi *et al.*, 2017).

La principal organización que monitorea y prepara ante una eventual trayectoria de colisión de asteroides, es el Grupo Asesor de Planificación de Misiones Espaciales (o SMPAG, por sus siglas en inglés). Esta organización, a cargo de las Naciones Unidas (ONU), es responsable de monitorear y evaluar misiones a asteroides cercanos a la Tierra. Su comando está integrado por las principales agencias espaciales, entre las que destacan la NASA estadounidense, la ESA europea y la ROSCOSMOS rusa. Este brazo de defensa planetaria de la ONU también tiene como objetivo estudiar y desarrollar nuevas tecnologías espaciales, con el objetivo de eliminar posibles amenazas de talla mundial. No obstante, acorde a un trabajo de investigación realizado por Cristea Emil, de la Escuela de Mando y Estado Mayor del Aire de EE. UU., el desarrollo de la tecnología espacial se ve notoriamente restringido por la falta de presupuesto y atención de los distintos gobiernos (Emil, 2015, p. 7).

Sin embargo, la misma autora comenta que esta falta de apoyo es suplida parcialmente gracias a la reciente entrada de actores privados al ámbito espacial. Empresas como SpaceX y Blue Origin, que han inyectado una gran cantidad de recursos al desarrollo de

tecnologías espaciales. Emil señala que, al ser compañías privadas, su principal objetivo son las ganancias, por lo que el ritmo al cual se prueban y ponen en práctica nuevas tecnologías es mucho más rápido que el de SMPAG, así como también existen, en principio, muchos menos impedimentos políticos (Emil, 2015, p. 8). Un buen ejemplo de esto es la utilización de cohetes reutilizables diseñados por ambas compañías privadas, lo que salva una considerable suma de dinero en temas de viajes espaciales. Si bien Emil teoriza que en un futuro estas compañías empezarán con objetivos más ambiciosos y lucrativos como la minería de asteroides, se puede aprovechar esta tecnología para desviar y hasta destruir cuerpos con trayectoria de colisión a la Tierra.

Es justamente este tema, la extracción de recursos espaciales, el cual proporcionará incentivos en el futuro para el desarrollo de nuevas tecnologías. En un artículo publicado por un grupo de científicos europeos y norteamericanos constatan que hoy en día ya existen los equipamientos y conocimientos necesarios para empezar una primera misión de minería espacial. Señalan que ya se han realizado misiones de extracción de muestras (como las misiones japonesas Hayabusa 1 y 2) junto a análisis de composición de muchos asteroides cercanos a la Tierra (Calla *et al.*, 2019, pp. 2-3). No obstante, el gran impedimento de la minería espacial actualmente es el costo. Sencillamente no es factible económicamente reemplazar la minería en la Tierra, principalmente debido a que cuesta mucho en términos monetarios llevar equipamiento al espacio. Aun así, los científicos teorizan que con el desarrollo de infraestructura espacial (como una base lunar o un gancho espacial) no solo lo volvería factible, sino preferible a la extracción de recursos en el planeta.

## Calificación jurídica

### Antes del ingreso a la atmósfera

Los meteoroides, mientras están en el espacio ultraterrestre, se encuentran regulados por la legislación

espacial internacional. Así, de acuerdo al artículo II del “Tratado sobre los principios que deben regir las actividades de los Estados en la exploración y utilización del espacio ultraterrestre, incluso la Luna y otros cuerpos celestes”, ratificado por Chile en 1967 y promulgado mediante el Decreto 77 de 1982, del Ministerio de Relaciones Exteriores, “el espacio ultraterrestre, incluso la Luna y otros cuerpos celestes, no podrá ser objeto de apropiación nacional por reivindicación de soberanía, uso u ocupación, ni de ninguna otra manera” (art. 11).

De esta manera, los meteoroides constituyen un “patrimonio común de la humanidad”, esto es:

Espacio que se sustrae a la soberanía de los Estados y se atribuye a la humanidad en su conjunto, regido entre otros por el principio de su uso libre y pacífico y sometido en algún caso a un régimen internacional convencional de explotación de sus recursos. (RAE, 2023, definición)

## Una vez ingresado a la atmósfera

Cuando el meteoroides ingresa a la atmósfera terrestre, en el caso de que no se desintegre totalmente en su contacto con el suelo, junto con cambiar de denominación a meteorito, comienza a ser objeto de regulación jurídica, que debe ser analizada en función del lugar en que cae o es hallado.

Acorde a un informe de la Annual Meteoritical Society Meeting, no existe un consenso mundial acerca de la propiedad de los meteoritos. En algunas legislaciones, como la estadounidense, señalan que los restos son propiedad del dueño del terreno (a no ser que sean subterráneos, en cuyo caso es propiedad del Estado por derechos minerales). En otros Estados, como Dinamarca, cualquier resto es propiedad del estado y se dará una compensación económica al sujeto en cuestión (Schimitt, 2001). No obstante, el autor sostiene que existe una división de la UNESCO denominada “Convención de las formas de prohibir y prevenir la importación, exportación y transferencia ilegal de propiedad cultural”, que regula el transporte conocido de artefactos, incluido meteoritos. Señala que los países

que se encuentran adheridos a esta convención deben devolver a los países de origen cualquier tipo de cosas originarias de otros, lo que da un primer indicio de un común acuerdo internacional sobre la propiedad de rocas espaciales (Schimitt, 2001).

Así como existen meteoritos que pueden ser atribuibles a privados, aquellos cuya procedencia no esté comprobada legalmente y que tengan una importancia científica significativa se expropian y entregan a museos o centros de investigación, lo que aumenta aún más la incertidumbre por la propiedad de estos objetos, interfiriendo incluso con el derecho civil. Existen casos aún más peculiares, como el de la legislatura argentina. Este país indica, como la mayoría de las naciones occidentales, que el hallazgo superficialmente de cualquier objeto es propiedad del dueño del terreno. No obstante, en la provincia del Chaco, el gobierno local es único en el sentido de que tiene una cláusula exclusiva para meteoritos, donde estipula que cualquier roca espacial hallada es propiedad del gobierno provincial. Esta ley se implementó tras el hallazgo de un meteorito específico denominado “Campo del cielo”.

Otros casos, como el de Chequia, no son tan directos. Dado que no existe una ley específica para meteoritos, por regla general lo que se encuentra en la superficie de una propiedad privada es generalmente del propietario. Dado que los museos e instituciones científicas no podían esperar la caridad de aquellos privados para que donaran las rocas encontradas, se inició un sistema de recompensas con el cual un meteorito encontrado sería recompensado monetariamente al propietario. En Dinamarca, por otro lado, existe una ley específica (s.36b), cualquier objeto de “valor arqueológico” debe de ser entregado inmediatamente a un museo. Esta clasificación también incluye los restos de meteoritos. Aun así, la ley también contempla una restitución económica a la persona que lo encuentra.

En la legislatura de la India, existe una resolución (45G-22-13) que data del 28 de abril de 1895, que indica a todos los gobiernos locales que cualquier meteorito encontrado en territorio nacional, sea público o privado, debe ser entregado inmediatamente

al museo geológico del gobierno en Calcuta (o una de sus filiales). Si no se entrega implica una sanción y una multa severa, junto a la confiscación del meteorito, por el cual no se entrega una compensación económica, pues es considerado propiedad federal. Caso muy contrario es el de Japón, donde la primera persona o entidad que encuentra una roca espacial es el absoluto propietario, por lo que puede hacer lo que estime conveniente con esta.

En términos generales, la aplicación de las distintas normas nacionales o internacionales dictadas al efecto se determinará según el lugar en que caiga el meteorito, sea este el territorio de un país, su mar territorial, alta mar o la antártica, aplicándose el principio de *lex rei sitae* (ley del lugar donde está la cosa). Abordaremos algunas legislaciones comparadas sobre la materia en el numeral 2.5.

## Meteoritos, basura espacial y aeronavegación

La regulación de los meteoritos es también importante para la aeronavegación, ya que un aspecto por considerar es el posible impacto de un meteorito o basura espacial sobre una aeronave que se encuentre volando en el espacio aéreo y que, durante su trayectoria de caída a la superficie terrestre, pueda causarle daño o derribarla.

Al respecto, solo en el espacio aéreo chileno, según cifras de la Junta de Aeronáutica Civil, hubo 476 332 operaciones aéreas realizadas durante el año 2018 y 506 859 durante el año 2019 (Junta Aeronáutica Civil, 2023).

Por ello también es muy relevante el sistema de monitoreo que exista para detectar tempranamente los meteoritos o basura espacial, actividad que debería coordinarse con los centros de control aéreo a fin de actuar de manera conjunta ante alguna amenaza cierta de caída de algún meteorito u objeto espacial desconocido a la superficie terrestre y en especial, en el territorio sujeto a nuestra jurisdicción.

Es importante considerar que el convenio sobre la responsabilidad internacional por daños causados por objetos espaciales considera que “un Estado de

lanzamiento tendrá responsabilidad absoluta y responderá de los daños causados por un objeto espacial suyo en la superficie de la Tierra o a las aeronaves en vuelo.” (Decreto 818, art. 11)

Este convenio fue ratificado por Chile en 1972, y promulgado mediante el decreto n.º 818 de 1977, del Ministerio de Relaciones Exteriores.

## Aspectos de responsabilidad ante la caída de un meteorito a la tierra que cause daño a las personas, animales o bienes

Al ser un tema relativamente nuevo en la historia humana, la responsabilidad de facto de los daños de un posible meteorito no ha sido elaborada. Por lo general, la mayoría de los países denominan todo evento relacionado a meteoroides como “desastre natural”. No obstante, nunca en la historia humana moderna se ha documentado un impacto para ponerlo a prueba. Solo han ocurrido 2 eventos masivos que se acercan a ese nivel, ambos ocurridos en Rusia, conocidos como bólidos.

Por un lado, el evento de Tunguska es el primer fenómeno destructivo relacionado a rocas espaciales documentado en la historia. Según un artículo de la National Geographic (2021), en la Siberia Central de 1908, un meteoroides de gran magnitud, aproximadamente 37 m, explotó a 8 km de altura, liberando una onda expansiva que registraron barómetros incluso de Europa. Según el mismo escrito, la explosión fue tal que destruyó 80 millones de árboles en un radio de 2000 km<sup>2</sup> del epicentro, todo esto con una intensidad de poder de aproximadamente 300 bombas atómicas de Hiroshima (National Geographic, 2021). Al haber ocurrido hace más de un siglo, en una zona que incluso hoy sigue siendo inhóspita, los cálculos de daños materiales se dificultan. Sin embargo, el informe estima que, de ocurrir hoy en una zona densamente urbanizada, los costos serían catastróficos.

Por otro lado, acorde a un informe de Infoastro, el evento de Cheliábinsk, ocurrido el 15 de febrero de 2013, fue un meteoro que explotó y liberó cerca de 500 kilotonnes. Según datos de la ROSCOSMOS, el meteoro tenía unos 17 m de largo (a diferencia de los 37 del

de Tunguska). La explosión ocurrió a 30 km de altura y explotó con la fuerza de 30 bombas atómicas de Hiroshima, dejando daños valorados en 25 millones de euros (Salas y Ruiz, 2013). Esto, acorde al artículo, fue subvencionado en su mayoría por el propio gobierno ruso, aun cuando no existía ningún tipo de reglamentación al respecto. Esto puede ser útil como precedente a la hora de escribir futuras legislaciones al respecto

## Normas de legislación comparada

### España

La ley 42/2007, de 13 de diciembre, del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad establece el régimen jurídico básico de la conservación, uso sostenible, mejora y restauración del patrimonio natural y de la biodiversidad, como parte del deber de conservar y del derecho a disfrutar de un medio ambiente adecuado para el desarrollo de la persona. Esta norma considera instrumentos de planificación estratégica, inventario, catalogación y planes de ordenación de los recursos naturales (Agencia Estatal, Gobierno de España, 2007).

En su artículo 3, numeral 38, se define el patrimonio geológico como el conjunto de recursos naturales geológicos de valor científico, cultural y/o educativo, ya sean formaciones y estructuras geológicas, formas del terreno, minerales, rocas, meteoritos, fósiles, suelos y otras manifestaciones geológicas que permiten conocer, estudiar e interpretar: a) el origen y evolución de la Tierra, b) los procesos que la han modelado, c) los climas y paisajes del pasado y presente y d) el origen y evolución de la vida.

Esta normativa regula acciones destinadas a proteger este patrimonio, estableciendo un régimen de sanciones en caso de infracción.

### Argentina

La ley n.º 26 306, promulgada el 17 de diciembre de 2007, dispone que los meteoritos y demás cuerpos celestes que se encuentren o ingresen en el futuro al territorio argentino, su espacio aéreo y aguas jurisdiccionales son bienes culturales en los términos del

primer párrafo del artículo 2, de la ley n.º 25 197 (Gobierno de Argentina, 2007).

Agrega la misma norma legal que los meteoritos y demás cuerpos celestes referidos en el artículo precedente quedan comprendidos dentro de los efectos y alcances de la convención sobre las medidas que deben adoptarse para prohibir e impedir la importación, la exportación y la transferencia ilícitas de bienes culturales, aprobada por la ley n.º 19 943 y por la convención de UNIDROIT sobre objetos culturales robados o exportados ilegalmente, aprobada por la ley n.º 25 257.

Por su parte, la ley n.º 25 197 establece el régimen de registro del patrimonio cultural, y en su artículo 2 dispone que a los efectos de la presente ley se entiende por “bienes culturales”, a todos aquellos objetos, seres o sitios que constituyen la expresión o el testimonio de la creación humana y la evolución de la naturaleza y que tienen un valor arqueológico, histórico, artístico, científico o técnico excepcional. El universo de estos bienes constituirá el patrimonio cultural argentino (SAIJ, 2020).

Corresponde la aplicación de esta norma legal a la Secretaría de Cultura de la Nación, que debe efectuar el relevamiento de los bienes culturales de dominio público nacional, su catalogación, identificación, crear un banco de datos e imágenes, Coordinarse con los gobiernos provinciales y ejercer la superintendencia sobre estos bienes.

En la provincia del Chaco, la ley n.º 3563 declara de utilidad pública, interés social y afectado al uso público, a todo meteorito, aerolito o cualquier cuerpo natural, proveniente del espacio que se encuentren en territorio de esa provincia. Corresponde a la policía provincial organizar el régimen de custodia y conservación de estos bienes consignados y la aplicación de la mencionada ley, compete al poder ejecutivo por intermedio del Ministerio de Gobierno, Justicia y Educación.

Por último, en la provincia de Santiago del Estero se dictó la ley n.º 6828, que declara de dominio público los meteoritos, aerolitos o cualquier cuerpo natural, proveniente del espacio que se encuentren en territorio de la provincia, con carácter exclusivo, inembargable, inalienable e imprescriptible. De la misma manera,

la ley provincial señala que el objetivo de ella es i) la recuperación, preservación y tutela de todo meteorito, aerolito o cualquier cuerpo natural, proveniente del espacio, para su aprovechamiento científico, técnico, histórico, cultural y turístico en la provincia de Santiago del Estero; ii) y la protección del área de dispersión y zonas de cráteres o huellas.

## Reino Unido

Bajo el sistema de derecho anglosajón, basado en análisis de sentencias judiciales e interpretaciones que estas hacen de la ley, un meteorito sería del propietario del terreno o edificio en el que se encuentra. Sobre anillos de oro encontrados por un empleado limpiando una piscina propiedad de su empleador, Schmitt indicó lo siguiente:

El principio general es que donde alguien está en posesión de la casa o terreno que ocupa, y sobre que manifieste la intención de ejercer el control y la prevención de interferencias no autorizadas, y algo es encontrado en esa casa o en esa tierra por un extraño o un sirviente, la presunción es que es la posesión de la cosa hallada está en manos del dueño del locus in quo. (Schmitt, 2002, p. 462)

## Antártica

El Tratado Antártico (firmado el 1 de diciembre de 1959 en Washington) y promulgado en Chile mediante el decreto n.º 361 de 1961 del Ministerio de Relaciones Exteriores, constituye un instrumento jurídico internacional que establece el uso pacífico de la Antártica; la cooperación para la investigación científica; intercambio de informaciones; el régimen de inspecciones de las actividades que se realizan en la Antártica; la condición de statu quo de las reclamaciones territoriales de siete de los países signatarios, entre los cuales se encuentra Chile; la estructura orgánica; las actividades de terceros Estados en la Antártica; y las normas y convenciones para la conservación de los recursos y del ambiente (INACH, 2023). Sobre la materia se han aprobado dos resoluciones en las reuniones consultivas

del Tratado Antártico, y en las cuales Chile ha participado, a saber:

Resolución 3 (2001) recolección de meteoritos en la Antártica adoptada en la XXIV RCTA. San Petersburgo, Rusia, 9 al 20 de julio de 2001, que señala:

Los representantes, Preocupados por la pérdida potencial a la investigación científica debido a la recolección no restringida de meteoritos en la antártica instan a las partes al protocolo medioambiental que den tales pasos jurídicos o administrativos cómo es necesario para conservar los meteoritos de la antártica para que estos sean recogidos y curados conforme a las normas científicas aceptadas y estén disponibles para las finalidades científicas. (Secretaría del Tratado Antártico, 2022, párr. 5)

Medidas del Tratado Antártico adoptadas en la XL reunión consultiva de dicho tratado, celebrada en Pekín del 23 de mayo al 1 de junio de 2017: recolección o retiro de material encontrado en la zona. Se permite la recolección y uso de nieve y hielo para el suministro de agua que es esencial para apoyar las actividades de los programas nacionales o las expediciones de visitantes no pertenecientes a organizaciones gubernamentales (VNG).

Está prohibido ocasionar daños, retirar o destruir cualquier artefacto histórico enumerado en la lista de sitios y monumentos históricos, en virtud del artículo 8.4 del anexo v al protocolo. Todo material que se encuentre en la zona puede recolectarse o eliminarse únicamente con fines científicos, educacionales o de gestión indispensables, y la cantidad de su recolección debe limitarse al mínimo necesario para satisfacer dichas necesidades. Todo meteorito que se retire deberá recolectarse y curarse de conformidad con las normas científicas aceptadas y se deberá poner a disposición de fines científicos. Todo material de origen humano que probablemente comprometa los valores de la Zona deberá ser retirado, salvo que el impacto de dicho retiro sea probablemente mayor que el de dejar dicho material en el lugar. En tal caso, se deberá informar a las autoridades nacionales pertinentes (Boletín Oficial del Estado, 2018).

## Tratados internacionales

Entre los acuerdos internacionales vinculados a la materia, destacan dos:

Convención sobre la Protección del Patrimonio Mundial, Cultural y Natural, Unesco, en cuya virtud, los países signatarios se comprometen a adoptar las medidas jurídicas, científicas, técnicas, administrativas y financieras adecuadas, para identificar, proteger, conservar, revalorizar y rehabilitar ese patrimonio (Decreto 259, 1980). Señala además este pacto que, respetando plenamente la soberanía de los Estados en cuyos territorios se encuentre el patrimonio cultural y natural y sin perjuicio de los derechos reales previstos por la legislación nacional sobre ese patrimonio, los estados parte reconocen que constituye un patrimonio universal en cuya protección la comunidad internacional entera tiene el deber de cooperar.

Convención sobre las medidas que deben adoptarse para prohibir e impedir la importación, la exportación y la transferencia de propiedad ilícitas de bienes culturales de la Unesco (Decreto 141, 2014). Señala el referido instrumento internacional que se consideran Bienes Culturales los objetos que, por razones religiosas o profanas, hayan sido expresamente designados por cada estado como de importancia para la arqueología, la prehistoria, la historia, la literatura, el arte o la ciencia y que pertenezcan a las categorías enumeradas a continuación: a) las colecciones y ejemplares raros de zoología, botánica, mineralogía, anatomía, y los objetos de interés paleontológico, c) el producto de las excavaciones (tanto autorizadas como clandestinas) o de los descubrimientos arqueológicos; De igual forma, en dicho tratado, los estados partes se obligan además, con arreglo a lo dispuesto en la legislación de cada Estado, a impedir por todos los medios adecuados, las transferencias de propiedad de bienes culturales que tiendan a favorecer la importación o la exportación ilícitas de esos bienes.

## Normas jurídicas en Chile

En nuestro país no se ha legislado específicamente sobre esta materia. Sin embargo, existen normas legales

que pueden aplicarse, en aspectos relacionados con su naturaleza y disposición final.

En el ámbito del derecho civil, un meteorito caído en el territorio chileno es un bien mueble que nunca ha pertenecido a nadie (*res nullius*), por lo que podría ser adquirido por ocupación, específicamente invención o hallazgo. Este último es un modo de adquirir el dominio de las cosas que no pertenecen a nadie, como una piedra, mediante la aprehensión material de ellas, acompañada de la intención de adquirirlas, bajo el supuesto que la adquisición de esas cosas no esté prohibida por las leyes nacionales ni por el derecho internacional.

En la esfera cultural, la ley n.º 17.288 de monumentos nacionales, no menciona de manera expresa a los meteoritos dentro del concepto de monumentos nacionales. Sin embargo, en su artículo 1 hace referencia a “objetos de formación natural, que existan bajo o sobre la superficie del territorio nacional o en la plataforma submarina de sus aguas jurisdiccionales y cuya conservación interesa a la ciencia...” (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, s.f., párr. 2; Universidad de Chile, 2009, pp. 3-4).

En mérito de ello y considerando que Chile es signatario de la Convención sobre la Protección del Patrimonio Mundial, Cultural y Natural, de la Unesco (Decreto 259, 1980), mediante la cual adquirió el compromiso internacional de adoptar las medidas jurídicas, científicas, técnicas, administrativas y financieras adecuadas, para identificar, proteger, conservar, revalorizar y rehabilitar este patrimonio, los meteoritos caídos en nuestro territorio podrían ser considerados un monumento nacional de tipo “objeto de formación natural que existe sobre la superficie del territorio nacional y cuya conservación interesa a la ciencia”.

Importante es destacar la regulación que la propia ley n.º 17.288 realiza respecto de los monumentos arqueológicos, antropológicos o paleontológicos. Así, su artículo 26 señala que quien haga excavaciones en cualquier punto del territorio nacional y con cualquier finalidad, encontrare ruinas, yacimientos, piezas u objetos de carácter histórico, antropológico, arqueológico o paleontológico, está obligado a denunciar inmediatamente el descubrimiento al gobernador

provincial, quien ordenará a Carabineros que se haga responsable de su vigilancia hasta que el Consejo de Monumentos Nacionales se haga cargo de él. La infracción a lo dispuesto acarrea multa de cinco a doscientas unidades tributarias mensuales, sin perjuicio de la responsabilidad civil solidaria de los empresarios o contratistas a cargo de las obras, por los daños derivados del incumplimiento de la obligación de denunciar el hallazgo.

De igual forma, la misma ley n.º 17.288, artículo 28, previene que es el Museo Nacional de Historia Natural el centro oficial para las colecciones de la ciencia del hombre en Chile. En consecuencia, el Consejo de Monumentos Nacionales deberá entregar a dicho museo colecciones representativas del material obtenido en las excavaciones realizadas por nacionales o extranjeros, según lo determine el reglamento (Decreto 484, 1991).

Cabe señalar que existe un proyecto de ley ingresado en el Congreso Nacional, con fecha del 16 de diciembre de 2013 (Boletín n.º 9.194-04) en primer trámite constitucional por el senador Alejandro Navarro (archivado el 22 de marzo de 2018), que propone agregar el artículo 28 bis a la ley n.º 17.288 sobre monumentos nacionales, a saber: “Los artículos 21, 22, 23 de este título serán aplicables también a los meteoritos y los cráteres meteóricos, los cuáles tampoco podrán ser intervenidos, alterados o manipulados bajo las mismas condiciones y sanciones que estas normas establecen”.

En el mensaje del mencionado proyecto de ley, la Dra. Millarca Valenzuela indica que:

La ley chilena, no considera a los meteoritos como Patrimonio. Los meteoritos son piezas geológicas de importancia. Asimismo, los cráteres meteóricos tienen la misma relevancia, toda vez que el material que alberga al meteorito es afectado por este y también es una enorme fuente de conocimiento científico. Respecto de los “cráteres meteóricos”, o lugares donde caen los meteoritos, si dejan rastro, deberían ser protegidos también por el sólo ministerio de la ley, pues puede ser muy tarde si se declaran patrimonio por decreto (podrían ser declarados por decreto como “santuarios

de la naturaleza” en virtud del artículo 31 de la ley de monumentos n.º 17.288, pero demoraría demasiado para protegerlo). (Ley n.º 17.288, p. 23)

De hecho, en Chile los meteoritos encontrados han tenido distintos destinos. Algunos se encuentran en museos, otros en poder de particulares o han sido vendidos al extranjero, gran parte de ellos se encuentran en museos del mundo o en colecciones privadas y solo unos pocos están en exhibición en Chile: Museo Nacional de Historia Natural, Museo Sernageomin, Museo Mineralógico de Copiapó, Museo Mineralógico Ignacio Domeyko de La Serena y Museo Geológico Humberto Fuenzalida, de la Universidad Católica del Norte, Antofagasta. Corresponden a 62 meteoritos reconocidos por la Meteoritical Society. Algunos de los más famosos a nivel mundial son el mesosiderito de Vaca Muerta, descubierto en 1861 por Ignacio Domeyko y la palasita de Imilac, descubierta por José María Chaile y descrita por Rodolfo Amando Phillipi en 1853. A esta cantidad se sumarán al menos 15 nuevos recolectados en los últimos 3 años por el equipo de científicos de Millarca Valenzuela (Cámara de Diputados y Diputadas, 2013).

## Conclusiones

La legislación comparada regula de manera diversa el uso, destino y disposición de los meteoritos, destacando en cada caso, la necesaria protección jurídica de estos elementos, que viajan a través del espacio ultraterrestre y que son objetos preciados para la investigación científica. Así, los meteoritos constituyen un fenómeno natural de relevancia para el derecho. Tal como se expuso en este trabajo, existen sistemas jurídicos que abordan las materias relacionadas y que regulan su utilización. En Chile, mientras no se legisle al respecto, solo cabe aplicar leyes de carácter general y tratados internacionales ratificados por nuestro país, sin perjuicio de la competencia de los tribunales de justicia toda vez que, en virtud del principio de inexcusabilidad, la Corte Suprema chilena ha admitido la

analogía como medio para interpretar la ley, cuando se trata de textos legales armónicos y que versen sobre materias análogas o semejantes (Aguilera, 2008). En todo caso, y por aplicación de lo dispuesto en el inciso segundo del artículo 3 del código civil chileno que consagra el principio del efecto relativo de las sentencias, el fallo solo tendría aplicación para el caso en que se pronuncie.

En directa relación con las normas expuestas, existe un ámbito que no se encuentra regulado en Chile, y que se refiere al hallazgo de objetos espaciales desconocidos que caen a la tierra y que puede abarcar desde meteoritos hasta basura espacial, incluyendo restos de la Estación Espacial Internacional, como ha anunciado la NASA, que ingresará a la atmósfera en el año 2031 “sobre el Área Deshabitada Oceánica del Pacífico Sur (SPOUA)” (NASA, 2022).

Sobre la materia, es importante que pueda avanzarse en un protocolo que permita establecer en forma clara qué organismo público debe analizar los restos encontrados, a fin de prevenir daños a las personas que los encuentren, identificarlos y luego proceder a su entrega, según corresponda.

Así, y en virtud del principio de coordinación entre organismos públicos, advertida la autoridad policial de algún hallazgo de un objeto espacial desconocido, debería activarse un protocolo para que el objeto sea mantenido en el lugar, seguro y sin intervención de terceros para que sea analizado por algún organismo público competente (Comisión Chilena de Energía Nuclear y Servicio Nacional de Geología y Minería) y solo luego de determinar su naturaleza, se resuelva su destino. Si se tratara de un meteorito, debería ser entregado al Museo Nacional de Historia Natural, centro oficial de las colecciones de ciencias naturales, para que se incorpore a su colección. De esta forma quedaría amparado en las normas de la ley n.º 17.288 y a disposición de las instituciones científicas que lo requieran.

Si se tratara de restos de satélites, debe considerarse lo dispuesto en el artículo II del “Convenio sobre la responsabilidad internacional por daños causados por objetos espaciales”, un estado de lanzamiento tendrá responsabilidad absoluta y responderá de los

daños causados por un objeto espacial suyo en la superficie de la Tierra o a las aeronaves en vuelo. A estos efectos, será el Ministerio de Relaciones Exteriores y Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación, este último en virtud de lo dispuesto en la ley n.º 21.105 que lo crea, quienes actuando coordinadamente, deberán establecer un procedimiento de notificación al Estado que aparezca como responsable de algún daño provocado en nuestro país.

En mérito de las consideraciones expuestas, puede concluirse que una adecuada legislación dictada en función del destino de los elementos que caen a la superficie terrestre se hace necesaria de manera transversal, habida consideración del impacto que ello puede tener en uno o más territorios, espacios marítimos o aéreos nacionales o internacionales, y su importancia para la investigación científica. Los meteoritos son viajeros del tiempo que traen información sobre el origen del universo y la vida en él. Su debido tratamiento es responsabilidad de cada uno de los sistemas que integran la actividad científica al quehacer nacional y al desarrollo de cada país.

De la misma forma, se hace necesario adoptar las previsiones a nivel del Estado respecto de la posibilidad de que meteoritos u otros objetos provoquen daños mayores que afecten a personas o bienes. La formulación de políticas públicas y la cooperación internacional son claves para este desafío.

## Referencias bibliográficas

- Agencia Estatal, Gobierno de España. (2007). *Boletín Oficial del Estado*. <https://www.boe.es/eli/es/l/2007/12/13/42>
- Aguilera, R. (2008). *Los conceptos de la Corte Suprema sobre interpretación de la ley a través de sus sentencias*. <http://sitios.uvm.cl/derechosfundamentales/revista/01.011-039.Andreucci.pdf>
- ATS. (2022). *Informe final de la cuadragésima cuarta reunión consultiva del Tratado Antártico*. [https://documents.ats.aq/ATCM44/fr/ATCM44\\_fr001\\_s.pdf](https://documents.ats.aq/ATCM44/fr/ATCM44_fr001_s.pdf)
- Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. (s.f.). *Historia de la ley n.º 17.288*. <https://www.bcn.cl/historiadelaley/nc/historia-de-la-ley/42/>

- Boletín Oficial del Estado. (2018). *Disposiciones generales*. <https://www.boe.es/boe/dias/2018/06/01/pdfs/BOE-A-2018-7293.pdf>
- Cain, F. (2015). *Asteroids. Will we mine asteroids?* <https://phys.org/news/2015-01-asteroids.html>
- Calla, P., Fries, D. & Welch, C. (2019). *Asteroid mining with small spacecraft and its economic feasibility*. International Space University; Initiative for Interstellar Studies.
- Choi, E. J., Cho, S., Lee, D. J., Kim, S. & Jo, J. H. (2017). *A study on Re-entry predictions of Uncontrolled Space Objects for Space Situational Awareness*. JASS.
- Cámara de Diputados y Diputadas. (2013). *Proyecto de ley que modifica la ley n.º 17.288, con el objeto de aplicar a los meteoritos y cráteres meteóricos, determinadas disposiciones referentes a los monumentos arqueológicos*. Número de boletín: 9194-04. <https://www.camara.cl/legislacion/ProyectosDeLey/tramitacion.aspx?prmID=9599&prmBOLETIN=9194-04>
- Emil, C. (2016). *Planetary Defense. Maxwell Air Force Base*. Distribution A.
- Gobierno de Argentina. (2007). *Normativa nacional y leyes*. <https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/ley-26306-135907>
- INACH. (2023). *Sistema del Tratado Antártico*. [https://www.inach.cl/inach/?page\\_id=21](https://www.inach.cl/inach/?page_id=21)
- Junta Aeronáutica Civil. (2023). *Informes del número de operaciones realizadas en los aeropuertos y aeródromos de Chile*. <http://www.jac.gob.cl/informes-del-numero-de-operaciones-realizadas-en-los-aeropuertos-y-aerodromos-de-chile/>
- Ministerio de Educación de Chile. (1991, 02 de abril). Decreto 484. *Reglamento de la ley n.º 17.288, sobre excavaciones y/o prospecciones arqueológicas, antropológicas y paleontológicas*. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=13706&idVersion=1991-04-02&idParte=>
- Ministerio de Relaciones Exteriores de Chile. (1972, 29 de marzo). Decreto 818. *Promulga el convenio sobre responsabilidad internacional por daños causados por objetos espaciales de fecha 29 de marzo de 1972*. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?i=121824>
- Ministerio de Relaciones Exteriores de Chile. (1980). Decreto 259. *Promulga la convención sobre la protección del patrimonio mundial, cultural y natural, suscrita en Unesco, París, el 16 de noviembre de 1972* <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=265641&idParte=0>
- Ministerio de Relaciones Exteriores de Chile. (1982, 26 de marzo). Decreto 77. *Promulga el convenio sobre los principios que deben regir las actividades de los estados en la exploración y utilización del espacio ultraterrestre, incluso la luna y otros cuerpos celestes*. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar/imprimir?idNorma=8798&idVersion=1982-03-26>
- Ministerio de Relaciones Exteriores de Chile. (2014, 30 de septiembre). Decreto 141. *Promulga la convención sobre las medidas que deben adoptarse para prohibir e impedir la importación, la exportación y la transferencia de propiedad ilícitas de bienes culturales de la Unesco*. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1067274>
- NASA. (2019). *Asteroids, comets and meteors. Solar System Exploration*. <https://solarsystem.nasa.gov/asteroids-comets-and-meteors/meteors-and-meteorites/in-depth/>
- NASA. (2022). *International Space Station Transition Report pursuant to Section 303(c)(2) of the NASA Transition Authorization Act of 2017 (P.L. 115-10)*. [https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/2022\\_iss\\_transition\\_report-final\\_tagged.pdf](https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/2022_iss_transition_report-final_tagged.pdf)
- National Geographic. (2021). *El misterio de Tunguska: el meteorito que impactó Siberia con la fuerza de 300 bombas atómicas sin dejar rastro*. [https://historia.nationalgeographic.com.es/a/tunguska-misteriosa-devastacion-que-ocurrio-siberia-1908\\_17391](https://historia.nationalgeographic.com.es/a/tunguska-misteriosa-devastacion-que-ocurrio-siberia-1908_17391)
- Real Academia Española. (2023). *Diccionario panhispánico del español jurídico*. <https://dpej.rae.es/lema/patrimonio-com%C3%BAn-de-la-humanidad>
- SAIJ. (2020). *Reglamentación de la ley 25.197 sobre el Régimen del Registro del Patrimonio Cultural*. <http://www.saij.gob.ar/DN20200000843>
- Salas, L. & Ruiz, V. (2013). *El evento de Cheliábinsk*. <http://www.infoastro.com/201302/17evento-cheliabinsk.html>
- Schmitt, D. (2001). *64 Annual Meteoritical Society Meeting, Vancouver*.
- Schmitt, D. (2002). The law of ownership and control of meteorites. *Meteoritics & Planetary Science*, 37(12). <https://repository.arizona.edu/handle/10150/655627>
- Tedesco, J. G. (1982). *Compositional structure of the asteroid belt*. Cornell University, University of Arizona: American Association for the Advancement of Science.
- Universidad de Chile. (2009). *Meteoritos chilenos y su necesidad de protección y preservación como un nuevo tipo de geopatrimonio*. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. XII Congreso Geológico Chileno. [https://catalogo.biblioteca.sernageomin.cl/Archivos/12993\\_v2\\_S5\\_028.pdf](https://catalogo.biblioteca.sernageomin.cl/Archivos/12993_v2_S5_028.pdf)

# Modelo de cultura organizacional, determinante en los procesos de cambio en innovación institucional en la Fuerza Aeroespacial Colombiana

Fecha de recibido: 10 de febrero 2023	Fecha de aprobado: 03 de agosto 2023
Reception date: February 10, 2023	Approval date: August 03, 2023
Data de recebimento: 10 de fevereiro de 2023	Data de aprovação: 03 de agosto de 2023

## Luz Giovanna Munar Casas

<https://orcid.org/0009-0006-6571-4065>  
 luz.munar@fac.mil.co

Magíster en Educación: Desarrollo Humano  
 Investigador – Fuerza Aérea Colombiana, Colombia  
 Grupo de Investigación en Ciencias Biomédicas Espaciales – VOYAGER  
 Rol del investigador: teórico y escritura

Master in Education: Human Development  
 Researcher – Colombian Air Force, Colombia  
 Researcher's role: theorist and writer  
 Research Group in Space Biomedical Sciences – VOYAGER

Mestrado em Educação: Desenvolvimento Humano  
 Investigador – Força Aérea Colombiana, Colombia  
 Função do pesquisador: teórico e redação  
 Grupo de Pesquisa em Ciências Biomédicas Espaciais – VOYAGER

## Lina María Rodríguez Gallego

<https://orcid.org/0000-0002-6631-6679>  
 lina.rodriguezg@fac.mil.co

Magíster en Desarrollo Humano Organizacional  
 Especialista Operacional del Desarrollo del  
 Talento Humano – Fuerza Aérea Colombiana, Colombia  
 Rol del investigador: teórico y escritura  
 Grupo de Investigación en Ciencias Militares Aeronáuticas y Administrativas – GICMA

Master in Organizational Human Development  
 Operational Specialist of Human Talent Development – Colombian Air Force, Colombia  
 Researcher's role: theorist and writer  
 Research Group on Aeronautical and Administrative Military Sciences - GICMA

Mestrado em Desenvolvimento Humano Organizacional  
 Especialista Operacional em Desenvolvimento  
 do Talento Humano – Força Aérea Colombiana, Colombia  
 Papel do investigador: teórico e escritor  
 Grupo de Investigação em Ciências Aeronáuticas e Administrativas Militares - GICMA

## Alicia del Pilar Martínez Lobo

<https://orcid.org/0000-0001-9187-4181>  
 alicia.martinezlobo@gmail.com

Magíster en Docencia e Investigación  
 Asesora e investigadora – Fundación Tecnalia Colombia, Colombia  
 Rol del investigador: teórico y escritura  
 Grupo de Investigación en Electrónica y Tecnologías para la Defensa - Tesda

Master in Teaching and Research  
 Advisor and researcher – Fundación Tecnalia Colombia, Colombia  
 Researcher's role: theorist and writer  
 Research Group in Electronics and Technologies for Defense - Tesda

Mestrado em Ensino e Investigação  
 Assessor e investigador – Fundación Tecnalia Colombia, Colombia  
 Função do pesquisador: teórico e redação  
 Grupo de Investigação em Eletrónica e Tecnologias para a Defesa - Tesda

## Andrés Felipe Rodríguez Daza

<https://orcid.org/0000-0002-0759-3123>  
 andres.rodriguezdz@fac.mil.co

Especialista en Gobierno y Gerencia Pública  
 Especialista Operacional Evaluación Talento Humano –  
 Fuerza Aérea Colombiana, Colombia  
 Rol del investigador: teórico y escritura

Specialist in Government and Public Management  
 Operational Specialist - Human Talent Evaluation –  
 Colombian Air Force, Colombia  
 Researcher's role: theorist and writer

Especialista em Governo e Gestão Pública  
 Especialista Operacional em Avaliação do Talento Humano –  
 Força Aérea Colombiana, Colombia  
 Função do pesquisador: teórico e redação

**Cómo citar este artículo:** Munar Casas, L. G., Rodríguez Gallego, L. M., Martínez Lobo, A. P., y Rodríguez Daza, A. F. (2023). Modelo de cultura organizacional, determinante en los procesos de cambio en innovación institucional en la Fuerza Aeroespacial Colombiana. *Ciencia y Poder Aéreo*, 19(1), 125-136. <https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaereo.771>



## Modelo de cultura organizacional, determinante en los procesos de cambio en innovación institucional en la Fuerza Aeroespacial Colombiana

## Organizational culture model, determinant in the processes of change and institutional innovation in the Colombian Aerospace Force

## Modelo de cultura organizacional, determinante nos processos de mudança em inovação institucional na Força Aeroespacial Colombiana

**Resumen:** El siguiente es un artículo resultado de una investigación científica, desarrollado en el marco del proyecto “Modelo de gestión estratégica del talento humano de la Fuerza Aeroespacial Colombiana - una visión sistémica (fase 2) “Ingenium 2030”, código 79761 Minciencias, el cual apoya el plan estratégico 2022-2042 de la Fuerza Aeroespacial Colombiana. Para el presente artículo se ahondará en el componente de actualización de la cultura institucional (ci), el cual se denominó así para identificar las percepciones y sentimientos de apropiación de los miembros de la institución. El proceso de actualización de la transformación de cultura institucional de la FAC tiene como propósito construir, desarrollar e implementar un modelo que permita gestionar la cultura de la institución, por medio de la identificación de brechas y la puesta en marcha de planes de acción e intervención transversal en los niveles estratégicos, operacional y táctico, para lo cual se utilizó una metodología descriptiva de tipo exploratorio, evidenciando las percepciones compartidas de los integrantes de la institución, identificando las dimensiones y determinantes que son la base para el diseño de un modelo de cultura institucional que permite apoyar la estrategia para el desarrollo aeroespacial de la Fuerza Aeroespacial Colombiana 2042.

**Palabras clave:** cultura organización; modelo de gestión sistémico; enfoque sistémico; transformación.

**Abstract:** It is an article resulting from scientific research, developed within the framework of the project “Strategic management model of human talent of the Colombian Aerospace Force - a systemic vision (Phase 2) “Ingenium 2030”, code 79761 Minciencias, which supports the Plan Strategic 2022 – 2042 of the Colombian Aerospace Force. For this article, the updating component of the Institutional Culture (ic) will be deepened, which was named like this to identify the perceptions and feelings of appropriation of the members of the institution. The process of updating the transformation of the institutional culture of the FAC, has the purpose of building, developing and implementing a model that allows managing the culture of the institution through the identification of gaps and the implementation of action plans and transversal intervention. at the strategic, operational and tactical levels, for which an exploratory descriptive methodology was used, evidencing the shared perceptions of the members of the institution, identifying the dimensions and determinants that are the basis for the design of an institutional culture model. that allows supporting the strategy for the aerospace development of the Colombian Aerospace Force 2042.

**Keywords:** Organizational culture; systemic management model; systemic approach; Colombian Air Force transformation.

**Abstrato:** É um artigo resultante de pesquisa científica, desenvolvido no âmbito do projeto “Modelo de gestão estratégica do talento humano da Força Aeroespacial Colombiana - uma visão sistêmica (Fase 2) “Ingenium 2030”, código 79761 Minciencias, que apóia o Plano Estratégico 2022 – 2042 da Força Aeroespacial Colombiana. Para este artigo, será aprofundado o componente de atualização da Cultura Institucional (ci), assim denominada para identificar as percepções e sentimentos de apropriação dos membros da instituição. O processo de atualização da transformação da cultura institucional da FAC, tem como objetivo a construção, desenvolvimento e implementação de um modelo que permita gerir a cultura da instituição através da identificação de lacunas e implementação de planos de ação e intervenção transversal. níveis estratégico, operacional e tático, para o qual foi utilizada uma metodologia exploratória descritiva, evidenciando as percepções compartilhadas dos membros da instituição, identificando as dimensões e determinantes que estão na base para o desenho de um modelo de cultura institucional que permite apoiar a estratégia para o desenvolvimento aeroespacial da Força Aeroespacial Colombiana 2042.

**Palavras chave:** cultura organizacional; modelo de gestão sistémica; enfoque sistémico; transformação da Força Aérea Colombiana.

## Introducción

Las fuerzas Militares contemporáneas del siglo XXI, desde una mirada holística, han asumido el cambio organizacional desde un proceso de transformación, redireccionando su estrategia militar y su visión, en respuesta a los cambios y desafíos nacionales e internacionales que los países mundialmente han venido enfrentando (González y Betancourt, 2018, pp. 70-74).

Tal es el caso presentado en Latinoamérica, países como Brasil, Chile, Argentina, Perú y Colombia desde una perspectiva de gestión del cambio asumieron el reto organizacional de generar una transformación, siendo entendido como un concepto que implica cambios desde la estructura organizacional, doctrinales y tecnológicos (Clavería *et al*, 2014a; González y Betancourt, 2018). Por su parte, las Fuerzas Armadas de Colombia, con el apoyo del Ministerio de Defensa y bajo la dirección de sus comandantes de fuerza, iniciaron su proceso de transformación, respondiendo así al modelo de planeación desarrollado por capacidades, planteado e implementado en Colombia y denominado “Transformación y futuro de la fuerza pública 2030” (Mindefensa, 2010, p. 12). El ejército nacional en el 2011 desarrolla su propuesta, la cual se materializó con la implementación de la Doctrina Damasco (Rojas, 2017).

De la misma manera, la fuerza aérea<sup>1</sup> en el año 2018 realizó una transformación organizacional (plan estratégico institucional 2019-2022) y proyectó la estrategia para el desarrollo aeroespacial al 2042. Dando relevancia a la política organizacional de “continuar fortaleciendo una cultura institucional basada en principios, valores y cumplimiento de la norma” (p. 24). Para ello conceptualiza y orienta la cultura institucional resaltando que “la actuación de los miembros de la Fuerza Aérea Colombiana se enmarcará en el ordenamiento jurídico colombiano e institucional, integrando los principios, valores y virtudes que forjan una cultura para la legitimidad y la seguridad jurídica de la institución” (Fuerza Aérea Colombiana, s. f., p. 21).

Para dar cumplimiento a los objetivos estratégicos propuestos para el largo plazo, la Fuerza Aeroespacial Colombiana requiere renovar la mirada sobre los determinantes claves de la cultura, por cuanto el modelo actual que está inmerso en la institución desde hace 11 años demanda involucrar nuevos factores que permitan impulsar el proceso de cambio e innovación.

Relacionar la cultura organizacional con los procesos de cambio, crecimiento e innovación es un ejercicio necesario. Comprender los valores que impulsan y apoyan la cultura de cada institución es fundamental para operar con éxito en el contexto nacional e internacional. Para abordar el reto del proceso de transformación de la cultura existente hacia una innovadora que fortalezca las capacidades organizacionales y el marco de acción a través de las políticas institucionales, este proceso de investigación propone un modelo conceptual que permite definir una cultura meta sobre la cual se apalanque el cumplimiento del plan estratégico proyectado por el alto mando de la institución a 2042.

Para lo cual, este estudio de investigación permite identificar las dimensiones y determinantes de la cultura institucional de la Fuerza Aeroespacial Colombiana, con miras a construir escenarios en los que se equilibre la continuidad y el cambio, se gestione el comportamiento de las personas y se impulsen los procesos de innovación y desarrollo tecnológico de la institución, basado en la legalidad y legitimidad en defensa de la soberanía, la independencia, la integridad territorial, el orden constitucional, para contribuir así a los fines del Estado.

Para llevar a cabo este proceso, se realizó la actualización, construcción y validación de un nuevo modelo de cultura institucional, para que posteriormente se diseñe el instrumento psicométrico que permitirá medir las percepciones de los miembros sobre la forma en que las dimensiones y los determinantes de la cultura se expresan en el día a día, y la forma como se propicia que los principios, los valores, impulsos y necesidades individuales se alineen con el propósito institucional, garantizando la sostenibilidad en el futuro de la FAC.

1 A partir del 2023 se empieza a llamar Fuerza Aeroespacial Colombiana.

## Marco teórico

Para el presente artículo se aborda el concepto de cultura organizacional (CO) desde diferentes autores, con el propósito de establecer desde este constructo, el de cultura institucional, concepto más usado en un ámbito militar. De forma general: Jordan (2015), citado por Deshpandé y Webster (1989); Goffee y Jones (2001); Chang y Lin (2007); Trice y Beyer (1993), citado por Serna (2008); Robbins y Judge (2009); Higuera (2014); Slater y Never (1995), Madero y Barbosa (2015); Salas *et al.* (2017); Groysberg *et al.* (2018), quienes establecen que la CO es el conjunto de cogniciones, de valores, creencias, y normas compartidas que orientan el comportamiento de las personas y que se puede observar a través de las prácticas y los resultados, las cuales son adquiridas y aprendidas en un contexto netamente social, dado que a través de la socialización la persona se expone a diversos aspectos culturales, como acciones e interacciones representativas de la comunidad dotando así a sus miembros de valores compartidos, sistemas de creencias y de expectativas.

Peterson y Spencer (1990) establecen que la CO se refiere a asunciones subyacentes y valores compartidos y señalan algunas características que ayudan a delimitar la aproximación hacia el concepto: la primera es que la CO es un elemento único y distintivo de cada organización, lo que implica que cada grupo social construye a través de su historia su propia cultura. La segunda, es que la CO es persistente por estar arraigada en las creencias y las asunciones, lo que significa que los valores de la institución juegan un papel fundamental en el modelamiento de las creencias y comportamiento de sus miembros. La tercera, es que la CO no se puede cambiar fácilmente, lo que implica que para lograrlo se requieren esfuerzos intensos y de larga duración.

La CO se convierte en el eje fundamental de cohesión interna, al articular e integrar la razón de ser institucional, misión y objetivos, con las expectativas y proceder de sus miembros, ayuda a identificar y resolver conflictos, a establecer diferenciadores significativos de su actuar organizacional y permite formar o

moldear comportamientos y actitudes de su comunidad laboral (Arto y Monroy, 2010).

Las organizaciones de orden burocrático, como es el caso de las instituciones militares, basan su columna vertebral en la autoridad, el poder y la norma, conservando su permanencia a través de la subordinación, ceremonias, símbolos y rituales que (Goffman, 1979, citado por Montenegro, 2003) la define “como el acto formal, convencionalizado, mediante el cual un individuo refleja su respeto y su consideración por algún objeto de valor último o a su representación” (p. 4).

Ahora, desde el caso de las fuerzas militares que por su esencia son de carácter jerárquico y burocrático, la CO es analizada teóricamente desde la doctrina conclusión a la que llegaron en su investigación Gurmán *et al.* (2014) al considerar que:

Es en la doctrina donde están reflejados los valores, los principios y la forma de proceder en el empleo de las capacidades militares con las cuales cuenta toda fuerza armada y que, por tanto, debe ser parte en el diseño de los objetivos de todo proceso de transformación. (p. 105)

Según Podestá (2012) y Jordán (2015), aunque es básicamente intangible poseen elementos visibles como los símbolos, las normas y los rituales, que se convierten en doctrina, traduciéndose así en aspectos concretos, es decir un marco de referencia del actuar y quehacer de sus miembros.

La cultura influye en cómo los miembros de la institución definen cuál es el mejor modo de operar, y esto se traduce en elecciones concretas, en la elaboración de la doctrina y en el impulso o no, para la transformación de sus procesos. Como lo analiza Covarrubias (2007), citado por Gurmán *et al.* (2014):

Los valores son tres fundamentales o cardinales; la valentía, el patriotismo y el honor y para Clausewitz son; el talento del comandante, las características militares de las fuerzas y el espíritu nacional, entendido a su vez como el entusiasmo, el fervor, la fe y la convicción. (p. 109)

Es así como la CO para el contexto militar exige una mirada desde un enfoque doctrinal, para entender el ordenamiento y funcionamiento de estas. Clavería *et al.* (2014b) en sus estudios afirman que el “análisis teórico de la transformación y de sus elementos componentes, se pudo deducir que la cultura organizacional en ambientes militares se nutre fundamentalmente de la doctrina” (p. 105). Otros autores, Toca y Rodríguez (2009) consideran también el concepto de doctrina como la forma en que las organizaciones militares (aunque presentan las mismas características generales de otras organizaciones) se diferencian principalmente por las relaciones basadas en la jerarquía y autoridad, en el apego a las reglas y normas, en el establecimiento de procedimientos, estrategias, directrices y responsabilidades constitucionales, y a partir de esto, construyen un conocimiento colectivo soportado en los valores, los principios y la historia como bien cultural de la organización.

En este orden de ideas y en coherencia con lo planteado en el marco teórico, se asocia este constructo de *cultura organizacional*, con la doctrina militar, y es ahí donde se consolida y fundamenta la *cultura institucional* (CI), la doctrina citada por la FAC (2020) definida por la OTAN está constituida por los “principios fundamentales con los que las FF.MM. guían sus acciones hacia la consecución de objetivos. Es autoritativa, pero requiere juicio en su Aplicación” (AJP-01, 2017, p. 38).

La Fuerza Aérea Colombiana<sup>2</sup>, de acuerdo con el informe de resultados de cultura institucional (2019), la conceptualiza como el “conjunto de normas, valores, creencias y pautas de comportamiento que formalizan las conductas de los individuos y que caracterizan a la organización” (p. 2). Coherente con este concepto se define la doctrina en el Manual- FAC -0-8 – Público (2020) como “el conjunto de principios, normas, reglas o criterios y la enunciación autorizada de los valores y creencias adoptados oficialmente, con el objeto de ajustar las conductas o comportamientos individuales o colectivos hacia un fin determinado” (p. 41).

Para el ejército nacional colombiano, de acuerdo con Guevara (2017), la transformación de la cultura institucional es entendida igualmente desde la doctrina como un cambio de mentalidad, donde la mayor dificultad no es adoptar las nuevas ideas, sino abandonar las antiguas, representa un cambio de paradigma gestionado desde la doctrina, aplicado desde cinco líneas que describen como fundamentales: atraer el mejor talento humano, la doctrina como eje de claridad de los principios fundamentales, interiorización de los principios y valores, modelo de liderazgo y arte y diseño operacional.

La Policía Nacional colombiana (2018), la concibe como “el conjunto de normas, hábitos y valores practicados por los servidores públicos policiales, porque hacen de esta su forma de comportamiento” (p. 16). Asume igualmente que es un concepto propio organizacional, porque “gerencia su cultura, se encarga de crear, implementar, fortalecer y gestionar los procesos institucionales” (p. 16). Lo anterior, con el propósito de consolidar una cultura de calidad, humanizante y transformadora.

El ejército de Chile, en concordancia con una tendencia a nivel de transformación de Suramérica en los últimos años, y de acuerdo con Clavería *et al.* (2014), a partir de un análisis teórico, aducen que todo proceso de cambio a nivel de la cultura institucional debe estar basado en la doctrina, especialmente cuando se involucran a las fuerzas armadas, teniendo en cuenta que sus elementos básicos trascienden desde lo humano, desde la vocación, desde la entrega, desde la convicción del sacrificio, siendo introyectado desde la formación, tradición y costumbres de arraigo profundo e histórico. Es la cultura lo que le permite a la institucionalidad la estabilidad y existencia a través del tiempo.

Desde una perspectiva de la cultura militar del ejército de Argentina, de acuerdo con Podestá (2012), los cambios de transformación cultural en las instituciones de gestión estatal, entre ellas las fuerzas armadas, tienden a generar una percepción de resistencia ante la amenaza de pérdida, pero los procesos de cambio requieren tiempo para lograr una visión compartida hasta constituir un proceso que sea exitoso, lo

---

2 A partir del 2023 se empieza a llamar Fuerza Aeroespacial Colombiana.

cual requiere un tiempo prolongado. En otras palabras, desde el contexto de jerarquía militar se hace referencia a la doctrina. Posteriormente, Podestá (2013) afirma que la “organización militar ha descansado tradicionalmente en sus elementos de doctrina para producir conocimiento explícito” (p. 26).

Ahora bien, para establecer los determinantes y dimensiones a determinar para la institución, se analizó los enfoques y modelos a partir de Porras (2009), Tarapuez (2016) y Morente *et al.* (2017), que permiten abordar el concepto de CO, cada uno de los autores proponen factores, dimensiones y variables asociadas a la organización y, por ende, se pueden relacionar con las variables más relevantes del comportamiento organizacional.

Tabla 1.  
Significantes para la CO

Variables	Variables
- Congruencia de la CO	- Sistemas socioculturales
- Patrones colectivos	- Dimensiones culturales
- Culturas nacionales	- Sistemas socioculturales
- Dimensiones culturales	- Sociocognitivo
- CO diferenciada	- Relaciones de poder
- Identidad propia	- Identidad de las organizaciones
- Estabilidad frente al cambio	- Cambio organizacional
- Relaciones cotidianas	- Sistema de significados compartidos

Fuente: elaboración propia, a partir de Morente *et al.* (2017).

## Método

Se realizó una investigación descriptiva de tipo exploratorio, con la que se buscó identificar los determinantes de la cultura en la institución militar, construyendo así las bases conceptuales de los constructos en diferentes contextos para la medición y evaluación, generando un banco de preguntas que permitan diseñar, planear y validar el instrumento de medición de la cultura institucional (Arto *et al.*, 2013).

Es así como se estableció para el desarrollo del estudio primero abordar el término cultura CO desde

diferentes constructos teóricos, partiendo desde una revisión documental, apoyada en bases de datos especializadas, Science Direct, Scopus, Ebsco, Google Scholar, entre otras. El establecer las dimensiones y determinantes de la CI de la Fuerza Aeroespacial Colombiana, permitirá la construcción de escenarios en los que se equilibre la continuidad y el cambio, se gestione el comportamiento de las personas y se impulsen los procesos de innovación y desarrollo tecnológico de la institución.

Una vez establecido conceptualmente el concepto de cultura institucional a partir del constructo teórico de cultura organizacional, se generó un banco de preguntas que permitieron diseñar, planear y validar el instrumento de medición de la cultura institucional. Posteriormente, se establecieron cuatro grupos focales con personal militar de la institución, técnica de investigación que es utilizada para recopilar datos a través de la interacción grupal (QuestionPro, 2023). Según Escobar y Bonilla, s.f.), “el propósito principal del grupo focal es hacer que surjan actitudes, sentimientos, creencias, experiencias y reacciones en los participantes” (p. 52). Es así como se tomó una muestra poblacional de 50 funcionarios de la institución y se realizaron cuatro mesas de trabajo, en las cuales se obtuvo información que permitió hacer un análisis organizacional mediante preguntas orientadoras, obteniendo respuestas que fueron el insumo para que el personal investigador lograra identificar y plasmar las dimensiones y determinantes propios del modelo de cultura institucional, para luego, a partir de una revisión de dos jueces internos (miembros de la institución, oficiales superiores, con estudios de maestría y amplio conocimiento de la institución, de la estrategia y doctrina de la fuerza), y dos jueces externos (doctorado, docente de la Universidad de Valencia «España» y magíster, docente de la Universidad de la Sabana «Colombia»), se determinará la validación del modelo en términos de pertinencia y aplicabilidad, como estructura base para el diseño, construcción y aplicación del instrumento de medición.

A continuación, en la tabla 2 se relacionan las preguntas orientadoras desde en análisis de dos escenarios: presente y futuro.

Tabla 1.  
Preguntas orientadoras desde dos escenarios

Escenario presente	Escenario futuro
¿Cómo se está apalancando actualmente a la estrategia y la propuesta de valor?	¿Cómo queremos que nos vean nuestros grupos de interés?
¿Cuáles factores son barreras en el presente?	¿Qué tan cerca o lejos estamos de esa meta?
¿Qué elementos de cultura deben existir institucionalmente, para asegurar que entregamos valor y logremos resultados?	¿Qué queremos que aporten nuestros miembros a la institución?
¿Cuáles factores impulsan el cambio y la transformación?	¿Qué comportamientos debemos estimular, desarrollar y reconocer, y cuáles no?

Fuente: elaboración propia.

## Resultados y discusión

### Análisis y resultado de la cultura institucional

Como un elemento clave para comprender las dinámicas de la CO y su papel en la actualización del proceso de transformación de la cultura institucional de la

Fuerza Aeroespacial Colombiana, se realizaron cuatro mesas de trabajo con una muestra aleatoria de 50 miembros de la institución (oficiales y suboficiales), correspondiente a pilotos, navegantes, logísticos, administrativas, entre otros, compartiendo su experiencia y conocimiento en las diferentes áreas de desempeño, criterio que se tomó por parte del personal científico para no direccionar o sesgar las percepciones.

En cada mesa se abordaron a través de preguntas orientadoras, las percepciones y sentimientos de los participantes sobre factores y determinantes actuales de la CI, y su relación con los procesos de cambio e innovación que impulsan el plan estratégico 2022-2042. Aspectos categorizados en:

- Determinantes del cambio.
- Fortalezas CO para el cambio.
- Oportunidades CO para el cambio.

A continuación, se presentan los principales elementos referidos por los participantes en las cuatro mesas desarrolladas:

Tabla 2.  
Consolidación de percepciones de los participantes en las mesas de trabajo.

Mesas	Determinantes del cambio	Fortalezas CO para el cambio	Oportunidades CO para el cambio
Mesa 1	Globalización Desarrollo tecnológico Ciencia y tecnología Especialización Profesionalización Cambios poblacionales	Transparencia en el actuar Reputación institucional Capacidad de afrontar Riesgos. Integridad Liderazgo	Eficiencia administrativa Agilidad y rapidez actuar Comunicación con bases Temor a la sanción Equidad y reconocimiento Favoritismo Desarrollar iniciativa
Mesa 2	Tecnología Investigación Capacitación Innovación Nuevas generaciones	Principios y valores Trabajo en equipo Deseo de hacer las cosas bien Honestidad Continuidad de los proyectos Pasión	Mayor autonomía en toma de decisiones Microgerencia Reprocesamientos Mayor comunicación Visión de LP
Mesa 3	Ciencia y tecnología Sistema de gestión y mejora Cambios globales Cambios en la doctrina	Disciplina Orgullo militar Principios y valores Investigación	Reactividad Ser más proactivos. Crear redes de experiencia Mayor empoderamiento
Mesa 4	Posconflicto Nuevas generaciones Ciencia y tecnología Investigación Profesionalización	Equidad Liderazgo Confianza Sentido ético Vocación	Evitar las subculturas Resistencia cambio Rigidez en la planeación Mayor sinergia Pensamiento crítico

Fuente: documento modelo final, modelo sistémico de gestión estratégica del talento humano para las FAC.

Como resultados de las mesas de trabajo realizadas con los grupos focales y con el propósito de analizar los determinantes, fortalezas y oportunidades de la CI que orientaron la estructura del modelo y la construcción del instrumento de medición, se resaltan las siguientes percepciones:

Tabla 3.  
Determinantes fortalezas y oportunidades

Fortalezas	Oportunidades
Se destaca ampliamente el papel de la ciencia y la tecnología como un impulsor clave del proceso.	Los cambios generacionales son un factor a tener en cuenta no sólo dentro del proceso de nuevas formas de ver el mundo, sino también la necesidad de fortalecer los valores, creencias y moral militar.
Existe consenso sobre la reputación e imagen de la Fuerza como una institución cuyos miembros se caracterizan por su ética, integridad y honestidad.	El liderazgo se debe orientar desde la capacidad de inspirar y transformar personas, pero sin perder el ejercicio de la disciplina, autoridad y jerarquía.
Se reconoce la necesidad de fortalecer los sistemas de gestión para ganar en flexibilidad, sinergia y agilidad en los procesos de toma de decisiones y evitar la microgerencia y los reprocesos.	La motivación por el aprendizaje y la formación continua son una oportunidad/reto permanente para seguir profesionalizando y especializando la Fuerza.
Se señala la importancia de mantener la justicia y equidad en el otorgamiento de los reconocimientos y estímulos.	
Igualmente, se resalta el rol fundamental del talento humano en el proceso de transformación y se hace énfasis en la oportunidad de fortalecer la gestión de la atracción, desarrollo y retención de los miembros de la institución.	

Fuente: documento modelo final, modelo sistémico de gestión estratégica del talento humano para las FAC.

## Modelo de transformación del proceso de cultura institucional de la Fuerza Aeroespacial Colombiana

Con base en el análisis y resultados de la información obtenida en las 4 mesas de trabajo realizadas, y sumado a los soportes teóricos, el equipo de investigación

con el personal científico construyó un modelo que se alinea al plan estratégico de la Fuerza Aeroespacial Colombiana, entendiendo que la cultura institucional es definida como un conjunto de principios, valores, creencias y normas que orientan el comportamiento de las personas y que son visibles a través de las prácticas organizacionales, generando así un orden conductual y de comunicación que son compartidos por toda la institución.

Existen dos principios fundamentales sobre los cuales se ha buscado soportar la propuesta conceptual:

- El primero es el contar con un modelo holístico que integre las características fundamentales de la institución militar, con la realidad del mundo globalizado e impulsado por los cambios que vive la organización, de acuerdo con Serna (2008), la CO por sí misma no puede producir los efectos requeridos en el compromiso, la identidad organizacional o el logro de objetivos. Para hacer esto realidad, las características de la CO deben coincidir con las definiciones estratégicas y los sistemas de gestión. Por ello, el modelo propuesto busca que la legitimidad institucional de la Fuerza Aeroespacial Colombiana dialogue con la visión futura de esta, y que los determinantes de la CO puedan alinear las dos perspectivas simultáneamente.
- El segundo es el diseñar un modelo que facilite la identificación, medición y gestión de los determinantes, rasgos y comportamientos sobre los cuales la CI meta se pueda desarrollar en el tiempo. Desde la perspectiva de las ciencias sociales se refiere al uso de la menor cantidad de variables para explicar la mayor varianza de las variables de resultado (Jonker y Pennick, 2010). El modelo actual de la CI contiene seis macrovariables con treinta microvariables, lo que hace que la gestión de los atributos sea más compleja y su impacto sobre los resultados más difícil de determinar.

De esta manera, el modelo a proponer se basa en cinco dimensiones que son propias de la organización, en la cual se realiza la presente investigación

(por tanto, su aplicación no sería objetiva para otro tipo de población).

Las dimensiones establecidas para el nuevo modelo son: institución, talento humano, gestión estratégica, gestión de procesos y capacidades organizacionales, que al abstraerlo de una forma integrada se logran contar con un modelo holístico y parsimonioso en su explicación:

A continuación, se describe el modelo conceptual de cultura institucional de la Fuerza Aeroespacial Colombiana con los determinantes que conforman cada una de las cinco dimensiones y 21 determinantes.

**Institución:** sistema organizacional castrense y jerárquico (personas, medios, estructura, principios y valores) que establece los parámetros formales (misión, visión, procesos procedimientos) y las formas de comportamiento esperadas por la organización para dar cumplimiento a la misión constitucional.

**Talento humano:** personal innovador, competente, comprometido, con principios y valores interiorizados, con vocación de servicio y actitud de liderazgo para dominar el aire, el espacio y el ciberespacio.

**Gestión estratégica:** proceso que orienta la construcción, implementación y monitoreo de acciones

dirigidas al acatamiento de la norma, mejora continua y búsqueda permanente de calidad y eficacia para garantizar la supervivencia y sostenibilidad de la Fuerza Aeroespacial Colombiana a largo plazo.

**Gestión de procesos:** prácticas organizacionales que permiten impulsar la mejora continua y el desarrollo sostenible de la institución y que se evidencia en la manera de realizar las diferentes actividades con el fin de cumplir con la estrategia institucional.

**Capacidades organizacionales:** es la capacidad que tiene la institución para mantener, consolidar e impulsar ventajas competitivas que permiten desarrollar una propuesta de valor diferencial en el desarrollo institucional y ser preferente nacional e internacional.

En resumen, el modelo conceptual propuesto busca relacionar cinco elementos centrales: la Fuerza que se proyecta como una institución militar innovadora, polivalente e interoperable, que a través del talento humano se convertirá en un líder y preferente nacional e internacional y que mediante la consolidación de modelos y sistemas de gestión modernos alcanzará capacidades organizacionales que garanticen su sostenibilidad.

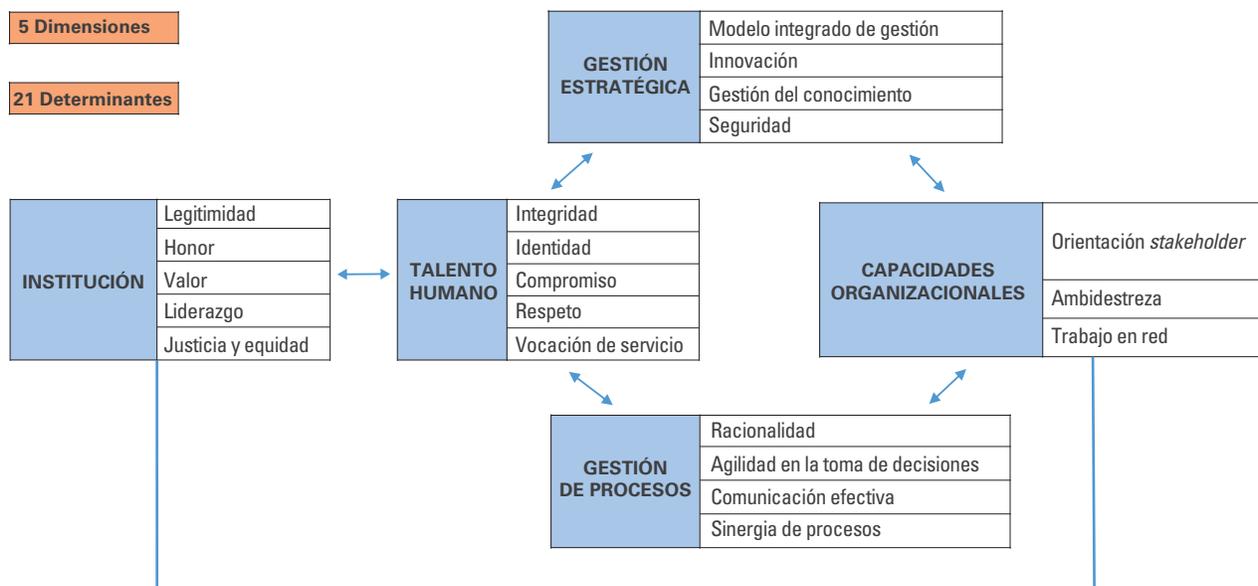


Figura 1. Modelo cultura institucional FAC  
Fuente: elaboración propia.

## Validación por jueces

Una vez identificado y diseñado el modelo a proponer, se realizó la validación por parte de los jueces a nivel conceptual y psicométricos, quienes revisaron la validez del contenido de cada uno de los determinantes y dimensiones, comparándolos con la conceptualización realizada en la fase anterior y apoyándose en los criterios de suficiencia de los factores, la coherencia, relevancia y claridad del modelo.

Para este caso se contó con la participación dos jueces internos (miembros de la institución, oficiales superiores, con estudios de maestría y amplio conocimiento de la institución, de la estrategia y doctrina de la fuerza), y dos jueces externos (doctorado, docente de la Universidad de Valencia «España», y magíster, docente de la Universidad de la Sabana «Colombia»), quienes desde su capacidad profesional y experiencia analizaron el modelo a través de las razones de validez de contenido y los índices de validez de contenido de Lawshe, con los ajustes de Tristán (2008).

Los hallazgos del proceso de validación por jueces expertos permiten mostrar que el modelo presenta adecuados indicadores de validez de contenido (cubre todas las dimensiones, y lo hace de manera suficiente) y de validez de constructo (los jurados indican que los aspectos analizados si permiten medir el objetivo planteado de la CI).

## Conclusiones

La literatura sobre CO es muy amplia, existen múltiples definiciones del concepto y se han desarrollado diversos modelos y métodos para estudiarla. Sin embargo, existe un acuerdo sobre cuatro atributos básicos de la cultura: a) es compartida; b) es omnipresente; c) es perdurable; y d) está implícita. Para lo cual, la CO también evoluciona como consecuencia de enfrentar demandas y oportunidades en el entorno. Por ello, mientras la estrategia está determinada primariamente por la alta dirección, en la cultura se mezclan las

intenciones de los líderes con los saberes y experiencias de sus colaboradores.

Las instituciones de carácter burocrático y jerárquico traen consigo un arraigo a las creencias, a los símbolos, a las costumbres que permiten desarrollar una identificación y compromiso genuino, permitiendo crear una visión compartida y un conocimiento que al pasar los años se denomina doctrina, y que, entendido desde este contexto se encuentra similitud con las bases de la cultura institucional.

Para lograr una transformación a nivel institucional, se requiere analizar su CO, evaluándola desde el significativo individual y colectivo y así poder establecer los verdaderos determinantes que promueven e impulsan el cambio.

La información obtenida en las mesas de trabajo, a partir de las percepciones y sentimientos de la población participante, permitió la construcción esquemática de la realidad de la institución, generando una validación teórica y práctica por parte de los jueces seleccionados.

Los hallazgos del proceso de validación por jueces expertos mostraron que el modelo presenta adecuados indicadores de validez de contenido, cubriendo todas las dimensiones y determinantes establecidas para la medición de la CI de la FAC.

Un modelo de cultura institucional creado en un escenario de una organización militar que por naturaleza tiene su esencia en una estructura jerárquica permite generar innovación y conocimiento en los procesos de gestión humana, teniendo en cuenta que se conserva una perspectiva que se sustenta como lo plasma la misión “legalidad y legitimidad en defensa de la soberanía, la independencia, la integridad territorial, el orden constitucional, para contribuir así a los fines del Estado” (Fuerza Aérea Colombiana 2019. p.14).

## Referencias

Arto, M., López, J. J. y Benavente, A. (2013). Un sistema de clasificación de los diseños de investigación en psicología.

- Anales de Psicología*, 29(3), 1038-1059. <https://doi.org/10.6018/analesps.29.3.178511>
- Arto, J. V. y Monroy, C. R. (2010). Marco conceptual de una cultura sistémica en las redes virtuales de fabricación global. *Investigaciones Europeas de Dirección y Economía de la Empresa*, 16(2), 137-163.
- Chang, S. E. & Lin, C. S. (2007). *Exploring organizational culture for information security management*. Industrial Management & Data Systems.
- Clavería, J. J., Moretto, L. & Gomes, V. (2014). Una discusión de transformación: perspectivas para la transformación militar desde la cultura organizacional. *Colección Meira Mattos*, 32(8), 105-115. <https://cris.ulima.edu.pe/es/publications/una-discusi%C3%B3n-de-transformaci%C3%B3n-perspectivas-para-la-transformaci>
- Deshpandé, R. & Webster, F. E. (1989). Organizational culture and Marketing, defining the research agenda. *Journal of Marketing*, 53(1), 3-15.
- Escobar, J. y Bonilla, F. I. (s.f.). Grupos focales: una guía conceptual y metodológica. *Cuadernillos Hispanoamericanos de Psicología*, 9(1), 51-67. [http://sacopsi.com/articulos/Grupo%20focal%20\(2\).pdf](http://sacopsi.com/articulos/Grupo%20focal%20(2).pdf)
- Fuerza Aérea Colombiana. (2019). *Informe de resultados cultura institucional*. <https://acortar.link/USMUFS>
- Fuerza Aérea Colombiana. (2020). *Doctrina básica aérea, aeroespacial y ciberespacial* (5.ª ed.). <https://acortar.link/kASCgy>
- Fuerza Aérea Colombiana. (s.f.). *Estrategia para el desarrollo aéreo y espacial de la Fuerza Aérea Colombiana 2042*. <https://www.fac.mil.co/sites/default/files/2021-04/edaes.pdf>
- Goffee, R. & Jones, G. (2001). *Organizational culture: A sociological perspective*. CL Cooper, S. Carwright and PC Earley, *The International Handbook of Organizational Culture and Climate*. John Wiley & Sons Ltd, Chichester. <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1476718X15579742>
- González, M. A. y Betancourt, M. A. (2018). La transformación del Ejército Nacional de Colombia: una interpretación teórica. *Latinoamericana de Estudios de Seguridad*, (22). <http://dx.doi.org/10.17141/urvio.22.2018.3093>
- Groysberg, B., Lee, J., Price, J. & Cheng, J. (2018). The leader's guide to corporate culture. *Harvard Business Review*, 96(1), 44-52.
- Guevara, P. J. (2017). Doctrina Damasco: eje articulador de la segunda gran reforma del Ejército Nacional de Colombia. *Revista Científica General José María Córdova*, 15(19), 95-119.
- Gusmán, J. J., Neto, L. M. y Schmitt, V. G. (2014). Una discusión de transformación: perspectivas para la transformación militar. Desde la cultura organizacional. *Colec. Meira Mattos*, 8(32), 105-115.
- Higuíta, D. (2014). Mecanismos de gestión cultural en la formación de hábitos. *Suma de Negocios*, 5, 29-38. <https://acortar.link/EgAnVt>
- Jonker, J. & Pennink, B. (2010). *The essence of research methodology: A concise guide for master and Ph. D. students in management science*. Springer Science & Business Media.
- Jordán, J. (2015). Cultura organizativa e innovación militar: el caso de las Fuerzas de Defensa de Israel. *Revista de Estudios en Seguridad Internacional*, 1(1), 17-40.
- Madero, S. M. y Barbosa, G. A. (2015). Interrelación de la cultura, flexibilidad laboral, alineación estratégica, innovación y rendimiento empresarial. *Contaduría y Administración*, 60, 735-756. <https://acortar.link/XoSSkl>
- Mindefensa. (2010). Transformación y futuro de la fuerza pública. Imprenta Nacional de Colombia. [https://www.mindefensa.gov.co/irj/go/km/docs/Mindefensa/Documentos/descargas/estrategia\\_planeacion/proyeccion/documentos/trasformacion\\_futuro\\_FP.pdf](https://www.mindefensa.gov.co/irj/go/km/docs/Mindefensa/Documentos/descargas/estrategia_planeacion/proyeccion/documentos/trasformacion_futuro_FP.pdf)
- Montenegro, C. (2003). *La modernización de las Fuerzas Armadas Argentinas: una reflexión desde la cultura organizacional y el aprendizaje*.
- Morente, F., Ferràs, X. & Žizlavský, O. (2017). Innovation cultural models: review and proposal for next steps. *Revista Universidad y Empresa*, 20(34), 53-82. <https://doi.org/10.12804/revistas.urosario.edu.co/empresa/a.5433>
- Peterson, M. W. & Spencer, M. G. (1990). Understanding academic culture and climate. *New Directions for Institutional Research*, (68), 3-18.
- Podestá, M. A. (2012). La cultura organizacional militar. *Revista Visión Conjunta*, 26-33. <http://190.12.101.91:80/jspui/handle/1847939/61>
- Podestá, M. A. (2013). El conocimiento profesional militar. *Cefadigital*, 9, 23-28. <https://acortar.link/W9C4vB>
- Policia Nacional de Colombia. (2022). *Taxonomía*. [www.policia.gov.co/taxonomy/term/1754](http://www.policia.gov.co/taxonomy/term/1754)
- Porras, N. R. (2009). Elementos básicos para el análisis de la cultura de las organizaciones desde la Psicología. *Tesis Psicológica*, (4), 36-51. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=139013586004>
- QuestionPro. (2023). ¿Qué son los grupos focales? <https://www.questionpro.com/blog/es/que-son-los-grupos-focales/>
- Robbins, S. P. y Judge, T. A. (2009). *Comportamiento organizacional* (13.ª ed.). Pearson Educación. <https://acortar.link/czfbP>

- Rojas, P. J. (2017). Doctrina Damasco: eje articulador de la segunda gran reforma del Ejército Nacional de Colombia. *Revista Científica General José María Córdova*, 15(19), 95-119. <http://dx.doi.org/10.21830/19006586.78>
- Salas, L., García, M. y Murillo, G. (2017). Efecto de la cultura organizacional en el rendimiento de las pymes de Cali. *Suma de Negocios*, 8(18), 88-95. <https://doi.org/10.1016/j.sumneg.2017.11.006>
- Serna, H. (2008). *Gerencia estratégica* (10.ª ed.). The cultures of work organizations. Englewood Cliffs. <https://acortar.link/0FUNfC>
- Tarapuez, E. (2016) Las dimensiones culturales de Geert Hofstede y la intención emprendedora en estudiantes universitarios del departamento del Quindío (Colombia). *Pensamiento & Gestión*, 41, 60-90. <https://acortar.link/zpwExD>
- Toca, C. E. y Rodríguez, C. (julio-diciembre de 2009). Asuntos teóricos y metodológicos de la cultura organizacional. *Civilizar. Ciencias Sociales y Humanas*, 9(17), 117-135. <https://acortar.link/Q8HTGX>
- Tristán, A. (2008). Modificación al modelo de Lawshe para el dictamen cuantitativo de la validez de contenido de un instrumento objetivo. *Avances en Medición*, 6(1), 37-48.

# Análisis de la ciberseguridad en espacios educativos pertenecientes a la Fuerza Aeroespacial Colombiana\*

Fecha de recibido: 28 de junio 2023	Fecha de aprobado: 16 de septiembre 2023
Reception date: June 28, 2023	Approval date: September 16, 2023
Data de recebimento: 28 de junho de 2023	Data de aprovação: 16 de setembro de 2023

## Jaquelin Castillo García

<https://orcid.org/0000-0002-4821-3991>  
[jaquelin.castillo@epfac.edu.co](mailto:jaquelin.castillo@epfac.edu.co)

Magíster en Dirección y Gestión de la Seguridad Integral  
 Docente - Escuela de Posgrados de la Fuerza  
 Aeroespacial Colombiana, Colombia  
 Rol del investigador: teórico y escritura  
 Grupo de investigación en Seguridad Integral,  
 Inteligencia y Ciberdefensa -GISIC

Master in Integral Safety Management and Direction  
 Professor - Graduate School of the Colombian  
 Aerospace Force, Colombia  
 Researcher's role: theorist and writer  
 Integrated Security, Intelligence and Cyber  
 Defense Research Group -GISIC

Mestre em Gestão e Direção Integral de Segurança  
 Docente - Escola de Graduação da Força  
 Aeroespacial Colombiana, Colômbia  
 Função do pesquisador: teórico e redação  
 Grupo de Investigaçao em Segurança Integrada,  
 Inteligência e Ciberdefesa -GISIC

\* Este es un artículo de reflexión derivado del proyecto titulado: "Propuesta de lineamientos en ciberseguridad para la institución educativa Gimnasio Militar de la Fuerza Aeroespacial Colombiana", el cual está enfocado desde la perspectiva institucional de la ciberseguridad al interior de dicha institución. El presente proyecto fue realizado por la autora para optar al título de magíster en Dirección y Gestión de la Seguridad Integral, con el fin de apoyar el proceso formativo de la comunidad educativa del Gimnasio Militar de la Fuerza Aeroespacial Colombiana, en Bogotá, Colombia.

**Cómo citar este artículo:** Castillo García, J. (2023). Análisis de la ciberseguridad en espacios educativos pertenecientes a la Fuerza Aeroespacial Colombiana. *Ciencia y Poder Aéreo*, 19(1), 137-151. <https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaereo.803>



## Análisis de la ciberseguridad en espacios educativos pertenecientes a la Fuerza Aeroespacial Colombiana

**Resumen:** El presente artículo de reflexión está basado en la investigación que se centró en el desarrollo de una propuesta que permitió fortalecer la responsabilidad en ciberseguridad desde una perspectiva institucional, específicamente en el Gimnasio Militar de la Fuerza Aeroespacial Colombiana (GIMFA), teniendo en cuenta los lineamientos estratégicos como herramientas de apoyo y complemento al modelo educativo, cumpliendo con el objetivo de identificar y analizar las categorías que están asociadas a los riesgos y las amenazas en la comunidad educativa, que resultaron ser factores determinantes en la formación y sensibilización de la ciberseguridad en espacios como el educativo.

**Palabras clave:** ciberseguridad; educación; criminalidad cibernética; riesgos de ciberseguridad; amenazas de ciberseguridad; tecnologías de la información.

## Cybersecurity guidelines in high education institutions of the Colombian Aerospace Force\*\*

**Summary:** This reflection article is based on research that focused on the development of a proposal that could strengthen responsibility in cybersecurity from an institutional perspective, specifically in the Military Gymnasium of the Colombian Aerospace Force (GIMFA), taking into account the guidelines strategies as support tools and complements to the educational model, fulfilling the objective of identifying and analyzing the categories that are associated with risks and threats in the educational community, which turned out to be determining factors in the training and awareness of cybersecurity in spaces like educational.

**Keywords:** Cybersecurity; education; cybercrime; cybersecurity risks; cybersecurity threats; information technology.

## Diretrizes de cibersegurança em instituições de ensino alto da Força Aeroespacial Colombiana\*\*\*

**Resumo:** Este artigo de reflexão é baseado em pesquisas que se concentraram no desenvolvimento de uma proposta que pudesse fortalecer a responsabilidade em segurança cibernética desde uma perspectiva institucional, especificamente no Ginásio Militar da Força Aeroespacial Colombiana (GIMFA), levando em conta as estratégias de diretrizes como ferramentas de apoio e complementa o modelo educativo, cumprindo o objetivo de identificar e analisar as categorias que estão associadas a riscos e ameaças na comunidade educativa, que se revelaram determinantes na formação e sensibilização para a cibersegurança em espaços como o educativo.

**Palavras-chave:** cibersegurança; educação; cibercrime; riscos de cibersegurança; ameaças de cibersegurança; tecnologia da informação.

---

\*\* This is an article of reflection derived from the project entitled "Cybersecurity Guidelines Proposal for the Colombian Aerospace Force Military Gymnasium Educational Institution", which is focused from the institutional perspective of cybersecurity within the Military Gymnasium of the Colombian Aerospace Force educational institution. Colombian Aerospace Force. Said project was carried out by Defense Counselor 18, to obtain the title of Master in Direction and Management of Integral Security, in order to support the training process of the educational community of the Military Gymnasium of the Colombian Aerospace Force. Bogotá, Colombia

\*\*\* Este é um artigo de reflexão derivado do projeto intitulado: "Proposta de diretrizes de segurança cibernética para a instituição educacional Gimnasio Militar de la Fuerza Aérea Colombiana", que é focado a partir da perspectiva institucional da segurança cibernética dentro da instituição. Este projeto foi realizado pelo autor para a obtenção do grau de mestre em Gestão Integral da Segurança, com o objetivo de apoiar o processo de formação da comunidade educativa do Ginásio Militar da Força Aeroespacial Colombiana, em Bogotá, Colombia.

## Introducción

Los seres humanos por naturaleza son sociables, requieren de interacciones con otras personas, lo cual les permite establecer las formas en que se comunican como sociedad. Con el paso del tiempo, los procesos sociales han variado acorde a las épocas que permitieron desarrollar, evolucionar y crear nuevas tecnologías que se implementan hoy en día para relacionarse; no obstante, la globalización ha sido fundamental para acelerar las dinámicas sociales en la que están inmersos desde el nuevo milenio.

Si bien el avance tecnológico ha constituido nuevas formas de comunicación, de aprendizaje, de diversión y, al mismo tiempo, influye en el cambio de la cotidianidad y la funcionalidad de la sociedad, ocupando un lugar en el ciberespacio a partir de la creación de un usuario y su contraseña; sin embargo, la criminalidad también habita allí, dando cabida a la vulnerabilidad de los derechos humanos desde la amenaza explícita o implícita, en la que estrategias como la ciberseguridad tienen relevancia al momento de combatir los ataques cibernéticos y digitales.

Actualmente, los dispositivos tecnológicos, las herramientas digitales, los sitios web, las aplicaciones y las redes sociales, rompieron las barreras del conocimiento, la interactividad, el aprendizaje y la comunicación sin importar quién sea o qué quiera hacer en el ciberespacio, ya que la existencia en este espectro tecnológico y digital ha permitido indagar el propósito con el que se utiliza, pero también, permite reflexionar sobre el uso correcto de todo este mundo.

La vulnerabilidad que se tiene en el espectro tecnológico y digital da paso a los delitos que surgen con la ingeniería social, según Monsalve (2018), se refiere a:

La técnica de fraude con el propósito de obtener información confidencial, accesos o privilegios en sistemas de información a través de la manipulación de usuarios legítimos. La ingeniería social se basa en el principio 'los usuarios son el eslabón más débil' y aprovechan la tendencia natural de la gente a confiar y a reaccionar de manera predecible ante ciertas situaciones. (p. 3)

Así mismo, Monsalve (2018) explica que, al emplearse esta técnica, la ciberdelincuencia utiliza el *phishing* que, como resultado de la manipulación a los usuarios, a partir del engaño, obtienen información confidencial de forma fraudulenta; o el *baiting*, el cual emplean al suplantar sitios web legítimos o programas que simulan ser seguros mediante un *malware* para robar la información. "Los *malwares* son *softwares* con intenciones maliciosas, contienen virus o programas que se instalan sin el consentimiento de los usuarios para robar información" (Monsalve, 2018, p. 3).

Es allí donde surgen conceptos como la ciberseguridad y la seguridad de la información, como el resultado de los vacíos de esta nueva era tecnológica que está al servicio de la sociedad como respuesta a diferentes necesidades, pero que también ha logrado tener un impacto en las transformaciones en los ámbitos que vivimos en el día a día. Según Ospina y Sanabria (2020), la tecnología es considerada señal de progreso, sin embargo, ha generado problemas de dependencia tecnológica, lo que conlleva a la vulnerabilidad de la información.

Este artículo surge de la profunda reflexión del trabajo de grado, titulado: *Propuesta de lineamientos en ciberseguridad para la institución educativa Gimnasio Militar de la Fuerza Aeroespacial Colombiana*, que tuvo como respuesta la identificación de los riesgos y las amenazas que están expuestas las instituciones educativas e integrantes de esta comunidad en el ciberespacio, a partir de la formación imperante, responsable y su sensibilización en ciberseguridad de manera integral.

## El problema de la ciberseguridad

Si bien el tema de las nuevas tecnologías de la información representa un avance y también una potencial fuente de vulneración gracias a los vacíos que se presentan en el espectro tecnológico y digital, la criminalidad encuentra técnicas delictivas empleando ciberataques, teniendo un nicho detectado en la sociedad, con el fin de obtener información personal o económica que les resulta beneficioso.

Nuevamente Monsalve (2018), en su artículo *Ciberseguridad: principales amenazas en Colombia (ingeniería social, phishing y DOS)*, ejemplifica la necesidad de la implementación de la seguridad de la información:

En la actualidad existe una guerra determinada guerra cibernética, la cual se enfoca y está dirigida a los sistemas informáticos, donde la información juega un rol importante, una vez esta sea robada o se vulnere, se puede decir que los pilares de la seguridad informática como la confidencialidad, la integridad y disponibilidad de ésta fue alterada. El mundo de hoy en día se enfrenta a constantes ciberataques los cuales no son visibles en su acción, pero sus consecuencias son catastróficas. (Monsalve, 2018, p. 1)

Conforme a lo anterior, se deduce la urgencia de educar a los usuarios que están expuestos al momento de ser parte del mundo tecnológico. Un punto focal que resulta ser una potencial amenaza es el entorno escolar, pues desde sus prácticas cotidianas los integrantes de esta comunidad resultan ser el grupo propicio para fomentar esta sensibilización en ciberseguridad.

La ley 1273 de 2009, o mejor conocida como la ley de protección de la información y de los datos, es el soporte jurídico que se tiene en cuenta al momento de interpretar los delitos que pueden incidir en la cibercriminalidad, tales como el acceso ilegítimo, la suplantación, la interceptación, los daños y/u obstaculización a sistemas informáticos, violación de datos personales, hurto o transferencias no consentidas de activos. Por esto, se debe tener en cuenta el contexto que se vive gracias a la globalización, ciertas dinámicas sociales se vieron forzadas a transformarse a partir de este nuevo siglo, implementando las nuevas tecnologías para la transición de las prácticas cotidianas, puesto que, aspectos como la hiperconexión global y la masificación de la información, fomentaron la necesidad de la implementación de la ciberseguridad como reflexión ante la frágil protección de estos que detonan en las amenazas cibernéticas.

Caamaño y Gil (2020), plantean que, en este mundo globalizado, las organizaciones, los estados y la

sociedad en general, han sido amenazadas por ciberataques, lo cual, desde el contexto económico, político y social, representa vulnerabilidades que inciden sustancialmente no solo en la toma de decisiones, sino también, en la estabilidad administrativa y económica para generar confianza ante los grupos de interés. De ahí que los problemas de ciberseguridad no deben analizarse de manera aislada, sino mediante un enfoque sistémico e integral.

Por ello, en el entorno escolar, según el D. Q. Institute (2019), los hechos delictivos que tienen mayor incidencia es la obtención de información personal con intenciones de estafar, extorsionar, secuestrar, *ciberbullying* o derivados de la explotación sexual infantil, por ello, la importancia de brindar herramientas para que cada integrante de la comunidad educativa, en especial los niños y niñas, tuviesen la responsabilidad de conocer cuáles son los riesgos cibernéticos de los que se puede ser víctima explícita o implícitamente, atendiendo a la necesidad de la ciberseguridad desde el uso de los recursos tecnológicos, la información y la comunicación.

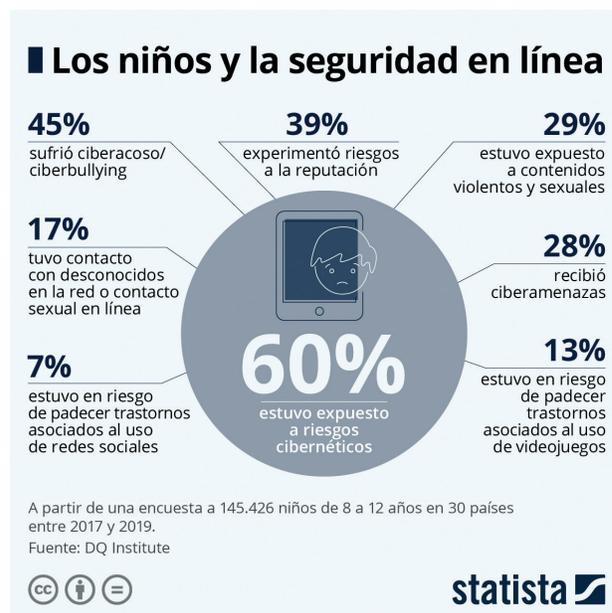


Figura 1. Los niños y la seguridad en línea

Nota: en la figura se evidencian las estadísticas de seguridad infantil en línea, según un estudio aplicado en 30 países.

Fuente: D. Q. Institute (2019).

Los cambios que tuvo la sociedad dependiendo de las tecnologías como consecuencia a la crisis que provocó la pandemia sanitaria ocasionada por el covid-19, trasladando el escenario laboral, educativo y social a la digitalización inmediata, ya que fue un contexto coyuntural para que la seguridad de la información fuese más susceptible a la amenaza cibernética, problema que persiste en la actualidad. Por lo anterior, el Gimnasio Militar de la Fuerza Aeroespacial Colombiana fue elegido campo de investigación, basado en la seguridad que caracteriza a esta institución, ya que, al estar vinculado con la Fuerza Aeroespacial, representa una mayor vulnerabilidad frente a la criminalidad cibernética, bajo el empleo de ciberataques tanto a la institución como a las personas que hacen parte de su comunidad.

Ante esto, y desde la seguridad integral, teniendo en cuenta el entorno tecnológico y digital, para dar respuesta al interrogante sobre cómo mitigar los riesgos en ciberseguridad desde una perspectiva institucional, para ello, esta investigación tuvo el objetivo de diseñar una propuesta con lineamientos institucionales en ciberseguridad a partir de la identificación y el análisis de factores, escenarios y riesgos de protección en ciberseguridad, culminando con la elaboración de una cartilla con medidas preventivas que permitieron brindar una orientación a la comunidad para aminorar dicha vulnerabilidad institucional.

## La importancia de la ciberseguridad en el escenario escolar

Ahora bien, se debe tener como precedente la ciberseguridad como principal respuesta a lo que representa amenazas que afectan la seguridad de la información en el espectro tecnológico y digital, pues su función radica en gestionar los riesgos que vienen del ciberespacio, relacionados con la información digital y sus sistemas interconectados, donde el ciberespacio se relaciona con internet (MinTIC, 2014 citado por Cayón, 2014).

El ciberdelito representa un reto, ataca en diferentes sectores, tanto públicos como privados que utilizan el ciberespacio y las nuevas tecnologías como

herramientas para el desarrollo de las actividades cotidianas, teniendo presente el ambiente escolar como uno de los escenarios más propensos a este tipo de amenazas, sobre todo la población constituyente, pues cada actor de la comunidad educativa representa un factor de riesgo.

Cayón (2014), en su artículo: *La importancia en el componente educativo en toda estrategia de ciberseguridad*, asevera que, “la dependencia tecnológica ha supuesto un creciente número de retos jurídicos y sociales, muchos de los cuales aún se encuentran en vías de solución” (p. 6).

A estos efectos, la protección de los sistemas informáticos considerados críticos se ha convertido en un tema de interés nacional, ya que el daño a estos puede causar graves trastornos al funcionamiento de cualquier sociedad. Esta es una de las principales razones por las cuales la ciberseguridad es considerada un eje estratégico a nivel nacional que afecta todos los niveles de la sociedad.

Ante esto, la digitalización de la sociedad que explican Galán y Galán (2016), comprende en la exigencia de garantizar las herramientas tecnológicas que tienen la capacidad de asumir un ciberataque, que puede ser determinado por su nivel de confianza, accidentes u operaciones ilícitas o malintencionadas, que comprometan la integridad y confidencialidad de los datos almacenados o transmitidos y de los servicios que dichas redes y sistemas permiten acceder a los mismos.

Lo que permite analizar que, en el entorno escolar, se necesita implementar una propuesta de ciberseguridad que pueda responder a los retos que se enfrenta la institución educativa a partir de la concientización de las buenas prácticas digitales y tecnológicas, garantizando la menor vulnerabilidad en ciberseguridad.

## La ciberseguridad como respuesta a la protección de la información

El significado y relevancia que se le dan a temas de trascendencia en seguridad frente a la criminalidad tecnológica y digital, en el que la vulnerabilidad e indefensión

son un punto crucial en los ciberataques en las organizaciones, instituciones y sociedad en general, por ejemplo: las instituciones educativas, a lo que Mónica Valle, en su texto titulado *Ciberseguridad: consejos para tener vidas digitales más seguras*, enfatiza en que, tanto la escuela como el sistema educativo, debe tener dentro de sus obligaciones más inmediatas el entender y darle cabida a una educación enfocada en la ciberseguridad, para que a través de dicha educación se generen puentes que permitan que estudiantes, docentes, padres de familia y comunidad académica en general, tengan certeza de los peligros existentes en las redes sociales, todo esto, gracias a una educación pertinente sobre el tema. (Valle, 2018).

Por esto, abordando la problemática de la seguridad de la información dentro del contexto académico, Morales (2019), desde un punto de vista de educación superior, afirma que “se tiene una preocupación común sobre la protección de datos en el ciberespacio, dado que varios de sus sistemas de información no cuentan con las normas de ciberseguridad necesarias” (p. 1). Esto fue el fundamento del análisis que permitió desarrollar medidas de control y estrategias de acción que aportaron a esta investigación.

En el contexto colombiano, según los resultados arrojados en el *Estudio de la evolución de la seguridad de la información en Colombia: 2000-2018*, de Cano y Rocha (2019), a partir de una encuesta aplicada durante 19 años, se logró estudiar y analizar el comportamiento de la seguridad en nuestro contexto, en la que se dedujo que este tema ha tenido tanto una evolución como nuevos retos que deben ser objeto de investigación.

De este modo, Marín *et al.* (2019) presentan un modelo ontológico de los ciberdelitos tomando como eje principal a Colombia, abordando varios aspectos como la clasificación, jurisprudencia y nivel de impacto de los ciberdelitos, con el fin de que la aplicabilidad de este modelo soporte la toma de decisiones en el ámbito de la ciberseguridad.

Para ello se requiere una formación consciente de la necesidad de la implementación de la ciberseguridad en el contexto académico, Valencia *et al.* (2020), en su texto titulado *Tendencias investigativas en educación en ciberseguridad: un estudio bibliométrico*, ejemplifican

desde los resultados de su investigación de medir el impacto y difusión de publicaciones referentes al tema de la educación en ciberseguridad y la importancia que tiene la misma desde una perspectiva educativa para el entendimiento de los avances tecnológicos actuales y la protección de los nuevos procesos de innovación.

Ahora bien, abordando el tema de la ciberseguridad como una necesidad por implementarse en el ámbito escolar, el Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia (UNICEF), presentó en el año 2019 una guía en donde los niños, niñas y adolescentes adquieren conocimientos teniendo presente las ventajas que proporciona el acceso a la información en la actualidad, pero enfatiza en que esto trae consigo riesgos, que deberán ser enfrentados con la implementación de ciertas herramientas que sean de protección.

Por consiguiente, la exposición en el mundo tecnológico y digital significan un progreso que resulta ser beneficioso, también representa la vulnerabilidad de los usuarios a la ciberdelincuencia, en especial los niños, niñas y adolescentes que son consumidores nativos de la tecnología, pues así lo ejemplifica el texto titulado *Socialización preventiva ante el ciberacoso*, desde el análisis de los resultados de la aplicación en dicho estudio, se tuvo como referencia los datos a nivel mundial, evidenciando el aumento constante y sistemático del ciberacoso en la población juvenil, el cual se desarrolla desde las plataformas digitales, lo que permite ver el origen y desenlace, así como las formas adecuadas para tratar este fenómeno y superarlo (Oliver y Santos, 2014).

Por esta razón, la identificación de las prácticas delictivas que se emplean en el mundo digital y tecnológico, así como las dinámicas sociales que son trasladadas a este escenario, son la suficiente razón para la urgente implementación de un modelo preventivo que sea soporte de la ciberseguridad.

## Epistemología

La investigación se fundamenta en la teoría de acción razonada, que surge en 1980 por Fishbein y Ajzen

citados en Reyes (2007, p. 2), es un modelo que pretende “buscar el origen de la conducta en las creencias que el individuo mantiene ante la intención de realizar determinada conducta”, pues este factor en el espectro tecnológico y digital es determinante al analizar el uso que se tiene de la información de sí mismo y de la que reposa allí.

Dicho esto, el modelo de Davis (1989) funciona a partir de la motivación, ya que esta consta de dos variables, las cuales son la utilidad percibida y la facilidad de uso partiendo del aprendizaje de la tecnología y el propósito que determina a las personas en su conducta al momento de estar inmersos en el mundo tecnológico y digital.

Entonces, se tiene presente que las transformaciones se han dado con el paso del tiempo en técnicas que son necesarias para comunicarnos o transmitir información desde la tecnología, y que, desde el uso de estas, impactan culturalmente en lo que se considera indispensable. Puesto que en los seres humanos hay un cambio evidente desde el aprendizaje, ya que las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) tuvieron una gran acogida en la sociedad, pues Echeverría (2018), compara este hito en la historia con la revolución industrial, ya que se ha insertado en todos los ámbitos de nuestras vidas, y por esta razón surge la necesidad de conocer cómo está impactando la tecnología en la sociedad.

**Tabla 1.**  
**Modelos de la teoría de acción razonada**

Modelo de aceptación tecnológica - Davis (1989)	Utiliza la metodología de los valores esperados de la teoría de acción razonada y reemplaza las creencias actitudinales que estaban definidas en esta por dos nuevos constructos: facilidad de uso y utilidad percibida, y adicionalmente, la actitud hacia el uso de la tecnología y la intención de uso.
Modelo motivacional - Davis (1989)	Relacionadas con los procesos de cambio, tanto sociales como individuales, por esta razón se han adaptado las perspectivas motivacionales extrínsecas e intrínsecas, que han sido utilizadas como predictores de la intención de la conducta de los usuarios.
Teoría del comportamiento planificado - Fishbein y Ajzen (1975)	Cuando los individuos forman una actitud positiva hacia el aprendizaje en aspectos relacionados con la tecnología, tendrán una intención más fuerte hacia la adopción y mayores inclinaciones para usarla.  La acción humana la relaciona con las creencias que un individuo pueda tener acerca de las consecuencias de una conducta; las creencias que posea sobre las expectativas normativas de otra persona (presión social); y, las creencias sobre los factores que puedan influir en el desarrollo de una conducta positiva o negativa. Estos tres constructos se combinan para generar la intención conductual.
Modelo de combinación del modelo de aceptación y la teoría del comportamiento planificado	Se refiere a la evaluación que hace el usuario sobre el uso de las tecnologías; las normas subjetivas tienen que ver con las opiniones de personas o grupos de personas que pueden resultar importantes para un individuo; el control de percepción del comportamiento, está vinculado a las percepciones sobre la presencia o no de recursos u oportunidades que se consideran necesarias para llevar a cabo una conducta determinada y, finalmente, la utilidad percibida, es un concepto que se desarrolla en torno a la probabilidad subjetiva que poseen los usuarios.
Modelo de utilización del pc	Donde se plantea que la conducta de los individuos, en relación al uso de la tecnología, puede ser predicha por una combinación de la intención de uso, basándose en la actitud y motivaciones, en la norma, y en las conductas y hábitos.
Teoría de la difusión de las innovaciones	Ventaja relativa, mejora que tienen los individuos de una nueva tecnología sobre otra ya existente; compatibilidad, la innovación es percibida como consistente con las necesidades, los valores y las experiencias pasadas de los adoptantes; complejidad, grado en que una innovación es fácil o difícil de usar; observabilidad, grado en que los resultados de una innovación son observables y, la experimentación, grado en que una innovación puede ser probada por quienes desean adoptarla.
Teoría social cognitiva	No se utiliza específicamente para predecir comportamientos de aceptación, sino para proporcionar ideas adicionales en la determinación de los comportamientos relacionados con la adopción de las innovaciones como, por ejemplo, el efecto de las características de cada individuo sobre su autoeficacia y la relación que existe con sus resultados de aceptación de la tecnología.

Fuente: elaboración propia, basada en Fernández *et al.* (2015).

Ahora bien, teniendo en cuenta que el tema central de esta investigación se desarrolla en el contexto escolar, y que es importante indagar el impacto que puede tener el contacto con el ciberespacio en la niñez y la adolescencia, Jean Piaget, en su teoría del desarrollo cognitivo, aborda las etapas de crecimiento del individuo, en donde los niños aprenden mediante la estimulación, la observación y la exploración que inciden en su formación como sujetos.

Por ello, Castilla (2013) rescata que el aprendizaje se divide en periodos como el sensoriomotor, preoperacional, operacional concreto y operacional formal, que van marcando las etapas de la vida y su desarrollo. Entonces, pasan de la adaptación, el aprendizaje, la investigación y, finalmente, a partir de los 12 años, se completa la racionalidad, lo que le permite reflexionar desde la crítica lógica y no solo desde las emociones.

Así mismo, la teoría de Maslow permite abordar desde los cinco niveles de las necesidades de los seres humanos, partiendo de las fisiológicas, la seguridad, la afiliación, el reconocimiento y culminando con la autorrealización, que en últimas se experimenta como algo satisfactorio.

Con ello se llega a la conclusión de que los niños, niñas y adolescentes les surge la necesidad de ser reconocidos socialmente, argumentando la aceptación y validación social; McClelland (1964) ejemplifica que, las personas aprenden inconscientemente y actúan conforme a tres necesidades de influencia social: como el logro, la afiliación y el poder, que resultan ser la consecuencia de estar inmersos en estos contextos.

Adicionalmente, los cambios que se generaron con la llegada de la tecnología, incidió profundamente en la cotidianidad de la sociedad, al punto en que no se tuviese en cuenta la edad desde la que tenemos acceso a este mundo, siendo así que lo que se consideraba menester de la sociedad en el centenario pasado, se vio sumido y transformado desde las TIC en este nuevo siglo, pues desde la mirada que brinda la pirámide de Maslow, aplicada por el BBVA (2017), se evidencia que estas necesidades se modificaron y ahora se tiene como referente principal la tecnología.

Por ello, se refuerza el desafío de crear un modelo para sensibilizar desde la cultura de la ciberseguridad a todos los usuarios, para que no estén expuestos a la ciberdelincuencia, o por el contrario, si se recibe una amenaza se tengan las herramientas para enfrentarla.



Figura 2. Pirámide de Maslow

Fuente: BBVA Research Center y Maslow (1943).

## Ejecución de la metodología

La investigación se desarrolla bajo la aplicación de una metodología descriptiva, la cual tiene como funcionalidad especificar las características halladas desde el método cualitativo, lo que permite identificar desde un contexto educativo desarrollado en el GIMFA, los riesgos y amenazas de vulnerabilidad a los que se está expuesto, que conforme a las categorías enfatizan en los lineamientos académicos que rigen a las instituciones y miembros de la comunidad educativa.

Tabla 2.  
Desarrollo metodológico

Objetivos	Metodología
Realizar un diagnóstico para diseñar un recurso digital con los lineamientos institucionales en ciberseguridad. en el Gimnasio Militar de la Fuerza Aeroespacial Colombiana.	Se realizó una valoración de riesgos para cumplir con el objetivo general de la investigación.
Identificar las categorías de análisis asociadas a factores de riesgo y protección de ciberseguridad en Instituciones educativas.	Revisión documental para categorizar los factores de riesgo, así: riesgos de conducta, de contenido y de contacto.
Reconocer factores de riesgo y protección frente a la ciberseguridad en los niños de los grados cuarto y quinto del GIMFA.	Por medio de entrevistas y encuestas para reconocer los riesgos de valoración más alta.
Análisis de la información mediante técnicas de análisis de riesgo de la ISO 31010.	Elaborar un informe de estos riesgos donde se pudo analizar la causa, consecuencia, plan de acción y control de los riesgos.
Elaborar una cartilla digital, con medidas preventivas para mitigar los riesgos en ciberseguridad.	Se entrega una cartilla, con recomendaciones, juego interactivo para los niños, padres, docentes del Gimnasio Militar de la Fuerza Aeroespacial Colombiana.

Fuente: elaboración propia (2022).

Para efectos de la empleabilidad de la metodología escogida, se inicia por la revisión documental, teniendo presente que la ciberseguridad en Colombia comenzó a tener importancia desde el 2001, bajo una aplicabilidad tanto en el entorno privado, como en el público, en esencia en la sociedad en general, pues la necesidad imperante de salvaguardar la información personal, fue lo que influyó en el sistema judicial al promulgar leyes y normatividades de lineamientos de delitos y derechos del usuario, entablando discusiones abordadas desde el escenario educativo, ya que en el contexto académico, la comunidad accede a este tipo de sensibilización y lo replican en otros contextos que se sientan o tengan conocimiento de un riesgo de vulnerabilidad.

Continúa con el desarrollo de entrevistas con expertos en la seguridad de la información, que tengan relevancia en la institución educativa, así como con la aplicación de encuestas a los miembros de la comunidad educativa, en la que se obtuvo la ejecución de la triangulación de estos, como la explica Albert (2007), “esta es una técnica estructurada, que permite la recolección rápida y abundante de información mediante una serie de preguntas orales o escritas que debe responder un entrevistado con respecto a una o más variables a medir” (p.115).

Es entonces que se planea el diseño de una herramienta disponible en digital que desde el análisis de

la identificación de los riesgos y amenazas, estable la necesidad de implementar y/o fortalecer la protección tecnológica y digital, aplicando la técnica de investigación proyectiva, la cual Passos (2015), explica que permite crear una propuesta que dé solución al problema de manera práctica, abordando un área particular del conocimiento, desde el diagnóstico de las necesidades apuntando a las tendencias futuras.

Al ser una metodología cualitativa, la subjetividad juega un papel importante, Sneiderman (2006), le da valor a la toma de decisiones desde la comprensión y el análisis de un fenómeno en específico, el cual puede tener carácter real o simbólico y evidenciarse en un aspecto manifiesto y/o latente.

Para efectos de esa investigación, se tuvo presente la revisión documental, desde la selección de muestra, la cual tuvo de base el muestreo no probabilístico, que Otzen y Manterola (2017), dicen que trata de “una técnica en que la selección de los sujetos de estudio dependerá de ciertas características y criterios que el investigador considere para el estudio” (p.2). Por lo tanto, para desarrollar el estudio, seleccionaron parte de la población de la comunidad educativa como muestreo compuesto por estudiantes de cuarto y quinto de primaria, docentes, padres de familia y personal directivo de la institución.

Teniendo presente que allí se encuentran los estudiantes que tienen mayor incidencia en ser vulnerables

en el ciberespacio, ya que inician su inmersión en las redes sociales, el uso de la tecnología y las plataformas digitales, empezando a ser un tema más arraigado para el cómo desarrollan su cotidianidad desde lo personal, pero también desde lo educativo, pues el GIMFA, aparte de enriquecer a sus estudiantes en conocimientos y competencias cumpliendo los estándares de alta calidad, también emplea herramientas tecnológicas para el desarrollo académico.

Entonces, para la recolección de datos como requisito solicitaron el consentimiento informado para emplear el estudio en los menores de edad, también se utilizaron dos instrumentos: la entrevista estructurada y la encuesta descriptiva, ambos se diseñaron con la intención de acopiar información de cada grupo focal, desde la observación y el análisis de los objetivos de la investigación; pues para la identificación de riesgos, se basa en la norma IEC-ISO 31010, la cual se aplica para evaluar en diferentes contextos los riesgos que se presentan en los cambios tecnológicos y digitales, así como el análisis de corbatín que según la norma mencionada anteriormente, permite evidenciar la trayectoria de un evento desde sus causas hasta sus consecuencias (ICONTEC, 2019).

Por esto, el objetivo de la investigación radicó en diseñar una propuesta que aborde normatividades, orientaciones y conocimientos que permitan a la comunidad educativa hacer un correcto uso de las herramientas tecnológicas y digitales desde la forma segura que proporciona la ciberseguridad.

## Análisis de resultados

Como resultado de la ejecución de la metodología en la que se emplearon instrumentos de recolección de información pertinente en este estudio investigativo, que posteriormente se realizó la triangulación de los datos obtenidos, gracias a las respuestas del objeto de estudio, el cual estuvo compuesto por 10 estudiantes entre los 9 y 12 años de cuarto y quinto del GIMFA, 10 padres de familia entre los 36 y 47 años de edad, y

10 docentes orientadores de estos cursos, cuyo rango de edad está entre los 40 a 55 años, en que a partir del muestreo se construye un mapa de riesgos a los que se encontraba expuesta la institución educativa, es importante tener presente las amenazas, los riesgos, la comunicación y las políticas-ciber, pues estas categorías son determinantes en el análisis de la ciberseguridad en los colegios.

Con base en los resultados obtenidos de las 30 encuestas y entrevistas de los actores seleccionados de la institución educativa, se ejecutaron los análisis de riesgos aplicando la técnica de corbatín, la cual por medio de diagramas expone los riesgos, consecuencias y medidas de recuperación que sean adecuadas a cada riesgo, también se aplicó la técnica de escenarios, que permitió identificar las posibles circunstancias en el futuro que sean incidencia en el riesgo, con el objetivo de definir estos escenarios, haciendo alusión a la necesidad de implementar herramientas que permitan mitigar estos posibles resultados.

A partir de la categorización y el análisis relacionados a la investigación de ciberseguridad en instituciones educativas, se halló que las amenazas más elevadas fueron el *ciberbullying*, el *phishing* y actividades de ingeniería social, y que los riesgos más comunes se situaban en el robo de la información y la suplantación. El mapeo de incidentes dejó en evidencia las amenazas y los riesgos a los que está expuesta la comunidad educativa, teniendo el precedente de los hechos y los posibles incidentes que se presenten con el objeto de evitar su materialización.

Desde las prácticas cotidianas, se muestra que ejercicios simples como usar internet no genera una diferencia marcada correspondiendo a la edad. Esto evidenció que en el espectro tecnológico y digital la comunidad educativa se encuentra expuesta a múltiples amenazas, desde la incomodidad que invade al sujeto cuando se enfrenta a situaciones como la interacción con desconocidos, el *ciberbullying*, la ingeniería social o el *phishing*, que incurren en delitos como el robo de datos, la suplantación de identidad, la estafa, encuentros con pedófilos, la pornografía, las amenazas o el acoso.

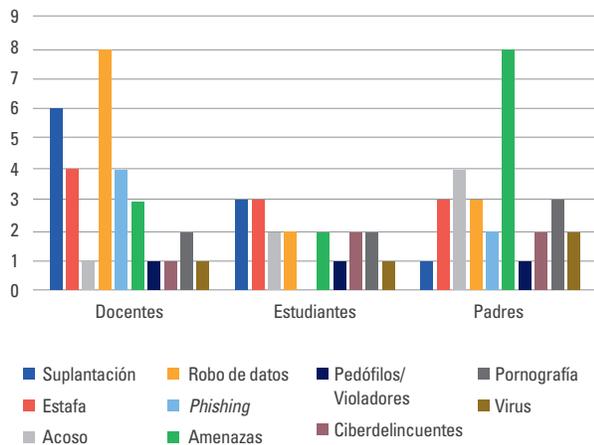


Figura 3. Resultados para la categoría amenazas y riesgos asociado a las amenazas y riesgos identificados que se encuentran en Internet  
Fuente: elaboración propia (2022).

Así mismo, en esta misma categoría se obtuvo como resultado, en primer lugar, los riesgos de contacto, seguidos de los riesgos de conducta, finalizando con los riesgos de contenido. No obstante, tanto los docentes como los padres de familia tienen conocimientos que les permitió reconocer estos riesgos, mientras que los niños no reconocen ninguno de estos, presentando la primera necesidad de fortalecer esta sensibilización frente a la ciberseguridad.

En cuanto a la categoría de la comunicación, que aborda el uso de las plataformas, redes sociales, correos electrónicos, entre otras herramientas digitales que median a los integrantes de la comunidad educativa en su comunicación habitual.

Así se analizó que el tipo de información que se transmite está anclado al ejercicio del día a día de cada persona de ese estudio, pues mientras los docentes envían documentación laboral, información útil, se abren a espacios de opinión e incluso suben fotos, lo cual no varía en cuanto a los padres de familia, pero sí se revisa el caso de los estudiantes, porque ellos prefieren subir fotografías o compartir videos, aunque no contemplan que en el mundo de las redes sociales WhatsApp y TikTok son parte de ellas.

En cuanto a la esfera políticas-ciber, se suscribe a los conocimientos previos y las precauciones que debe implementar la comunidad educativa con el objetivo de mitigar los riesgos y las amenazas en

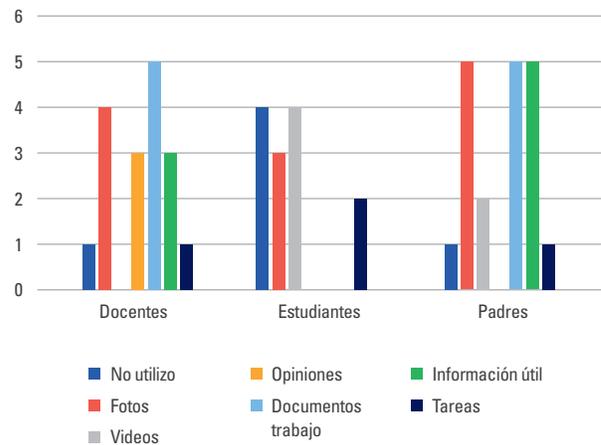


Figura 4. Resultados para la categoría comunicación sobre tipo de información que suben a plataformas o redes sociales  
Fuente: elaboración propia (2022).

ciberseguridad, es por esto que, al evaluar los resultados obtenidos se encuentra que los adultos comprenden el concepto de la ciberseguridad, que aplican normas en cuanto el uso del internet tanto en el hogar como en la institución educativa, no obstante, los estudiantes representaron mayoritariamente el desconocimiento frente a la ciberseguridad.

Pese a que la vulnerabilidad cibernética es enseñada en el colegio y en la casa, con el objeto de que los estudiantes reconozcan estos peligros, no se abordan en igualdad, puesto que los riesgos como el *phishing*, el *bullying*, la divulgación de fotografías y videos son temas poco discutidos en cada espacio, sin embargo, no sucede lo mismo con las amenazas, ya que se reconocen la suplantación de identidad, la explotación sexual, las estafas, los virus o *hackers*, lo que conlleva a que los niños recuerden más las tres últimas.

Aunque existan reglas que son implementadas por los padres de familia, como no compartir claves o información personal, también existe un control de tiempo y uso del internet, y la delimitación de los espacios en que se está permitido el uso de equipos tecnológicos, como el celular, así como normas de bloquear descargas y el acceso a páginas no seguras, no obstante, y aunque la institución educativa implemente varias de estas reglas y normas, no existe una retroalimentación de conocimientos en ciberseguridad en estos dos actores, más allá de las sanciones que se establecen en

el manual de convivencia, no hay evidencia de normatividad o reglamento preventivo referente a la gestión de la ciberseguridad, por ello se obtiene el desconocimiento de este tema en los estudiantes, quienes se limitaron al uso del celular en clase.

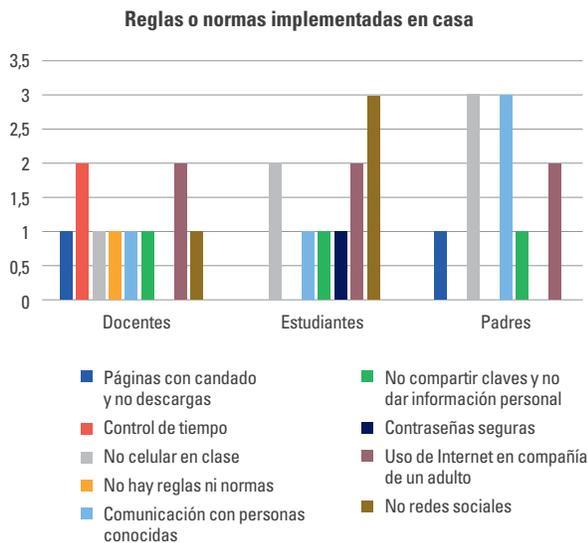


Figura 5. Resultados de políticas ciberamenazas en cuanto a reglas y normas implementadas en la casa

Fuente: elaboración propia (2022).

Como resultado, este desconocimiento en los niños y niñas, los docentes y padres de familia, quienes manifiestan que, aunque existan políticas de ciberseguridad en la Fuerza Aeroespacial Colombiana, no las conocen o no se implementan de la misma manera en el GIMFA.

Ahora bien, se tiene presente que tanto la tecnología como la digitalización han contribuido y transformado la cotidianidad de la sociedad, y que estas tienen un impacto diferente en los niños, niñas y adolescentes, puesto que su forma de aprendizaje cambia constantemente, también impacta en cómo la influencia de presiones sociales, culturales, políticas y económicas detona en el qué y el cómo funcionan las instituciones educativas, pues estos espacios ahora son mediados por dichas herramientas, las cuales han contribuido a mejorar los resultados educacionales, lo que demanda al sector educativo emplear procesos de innovación desde el sentido de la escolaridad, el currículo, la

pedagogía, la evaluación, la administración, la organización e incluso el desarrollo profesional de docentes y directivos de las instituciones educativas.

Por ende, el análisis que se obtuvo de la matriz de riesgos aplicada al GIMFA, evidenció que el uso de la tecnología y digitalización favorece la educación, aunque también existe un interrogante al que se le debe dar respuesta con respecto a la seguridad cibernética y su imperante necesidad de implementarse, pues a partir de los resultados que se clasificaron en la matriz de riesgo, se identifica que el *cyberbullying*, el *phishing*, la ingeniería social y la intrusión a clases son índices de vulnerabilidad en el espectro tecnológico y digital, demostrando una vez más que la ciberseguridad permite abordar los procesos mediados por la tecnología de manera efectiva en la comunidad educativa.

Tabla 3. Matriz de riesgos en los procesos de formación

Código	Categoría	Evento del riesgo	Responsables	Categoría
R1	Conducta/Riesgo	<i>Cyberbullying</i>	Estudiantes, padres de familia, docentes, psicólogos y coordinación de convivencia.	ALTO
R2	Contacto/Amenaza	<i>Phishing</i>	Estudiantes, padres de familia, institución académica.	ALTO
R3	Contacto/Amenaza	Ingeniería social	Estudiantes, padres de familia.	MODERADO
R4	Contenido/Amenaza	Intrusión a clases virtuales	Estudiantes, padres de familia, director de la institución educativa, policía nacional.	MODERADO

Fuente: elaboración propia (2022).

## Identificación del riesgo/plan de acción

Acorde a los resultados evidenciados en la matriz de riesgo se identificaron cuatro riesgos potencialmente peligrosos, como el *cyberbullying*, y aunque en estos

casos existan medidas de protección en el uso de las TIC, como solicitar intervención e informar quiénes tienen el control sobre estas situaciones desde los mismos estudiantes, los padres de familia, docentes, psicólogos hasta la coordinación de convivencia, pues el nivel de riesgo es alto, lo que requiere implementar acciones como la instalación de antivirus licenciados y *software* en los dispositivos tecnológicos, también concientizar a los estudiantes sobre el acoso y el ciberacoso, instruirlos en la cultura tecnológica y tener conocimiento de los lugares que habitan y sus compañías, sus prácticas en el ciberespacio a partir de una comunicación asertiva y constante con los estudiantes.

Lo mismo ocurre con el *phishing*, por ello es necesario tener presente que si se presenta sospecha de enlaces o *software* de dudosa procedencia, se debe educar a los estudiantes en instancias de responsabilidad civil, penal y administrativas que se imputan cuando se vulneran derechos propios o de terceros, pues todos los actores de la comunidad educativa son responsables de ejercer este control, ya que el nivel de riesgo es alto, por lo tanto, se requiere implementar contraseñas seguras, verificando las políticas de privacidad y avisos legales, confirmando el requerimiento de enviar información personal y comprobando la legalidad de las páginas web.

En cuanto a la ingeniería social, su funcionamiento está ligado a la información personal que se comparte en espacios como las redes sociales, allí la ciberdelincuencia actúa con el solo hecho de dar acceso al perfil propio, permitiendo evaluar la vulnerabilidad que se tiene a partir de determinadas circunstancias que resultan ser beneficiosas para su actuar delictivo, pese a que está en un nivel de riesgo moderado, requiere implementar medidas de seguridad como la creación de un avatar en vez de una fotografía para el perfil, utilizar contraseñas seguras y cambiarlas constantemente, obtener las aplicaciones, información y demás necesidades en sitios oficiales.

Finalmente, respecto a la intrusión en las clases virtuales, se da principalmente por conectarse a clases desde espacios no seguros o públicos, compartir el enlace con personas ajenas a la institución o aceptar

su participación, aunque a veces puede darse el ingreso sin autorización, lo que violenta los accesos de seguridad, aprovechando estos espacios para sabotear, compartir pornografía o insultar a quienes hacen parte de la clase, siendo importante fomentar la conciencia de la responsabilidad que cada actor de la comunidad académica tiene en la protección de sí mismo y de los demás.

Aunque su nivel de riesgo sea moderado, no es sinónimo de bajar los niveles de seguridad existentes, como el control de la pantalla compartida, las credenciales de seguridad y los antivirus, también se puede fomentar la cultura de la tecnología, el bloqueo del aula virtual para que solo se tenga acceso los autorizados o la creación de enlaces diferentes para cada sesión de clase.

## Conclusiones

El estudio de investigación que se abordó permitió determinar que la sociedad está inmersa en la evolución de la tecnología y la digitalización de la cotidianidad, pues con el paso del tiempo y las eras que fueron significativas en los cambios que hoy en día se emplean para aprender, comunicarnos, divertirnos, por esto, en el sector educativo, se presenta el acceso a esta como un avance en los procesos de aprendizaje, con el objeto de transformarlos y mejorarlos, lo que influye en la necesidad de las instituciones académicas por implementar métodos innovadores para converger la pedagogía con la tecnología, haciendo partícipes a toda la comunidad educativa.

También, se debe tener presente que al ser tan etérea la tecnología y los cambios abruptos que se presentan con la invención de una nueva versión, no se puede predecir de qué manera tendrá un impacto en los procesos educativos más que las actuales y funcionales a la fecha, la cual cumple un rol en la posesión del conocimiento, de enriquecerlo, de permitir tener nuevas formas de enseñanza, de aprender y de gestionar la escolaridad.

La ciberseguridad no solo cumple con el rol de proteger desde el ciberespacio al usuario, también influye en el impacto que podría tener un ataque en sus intermediaciones, pero que resulta desastroso en el plano físico, por esto es necesaria la acción oportuna y desde la cultura de la prevención, para minimizar los riesgos que podrían desembocar en daños a miembros de la comunidad académica, a la reputación, o incluso inconvenientes legales.

A partir de ejercicios como el análisis del riesgo, se tuvo otra perspectiva de cómo la tecnología podría beneficiar al sector educativo, sin desconocer las amenazas persistentes en estos escenarios, esto permite desarrollar un trabajo colaborativo, que influya en la manera en que se abordan, controlan y se da tratamiento a los riesgos de manera efectiva, con el objetivo de garantizar la calidad, seguridad y potenciar los procesos educativos desde las nuevas tecnologías.

Cada miembro de la sociedad, de las organizaciones, instituciones o donde se pertenezca tiene una importante responsabilidad en hacer buen uso de la tecnología y los espacios de la virtualidad y la digitalización. Está en nuestro poder detener las cadenas de la criminalidad cibernética, fomentando la sensibilización de la importancia de implementar la ciberseguridad en cada espacio que se habite, para tener el conocimiento de las indicaciones a seguir en caso de ser vulnerado o aprender a identificar este tipo de incidentes.

Esta investigación permitió realizar el diagnóstico que se basó en la identificación de las categorías de análisis de factores de riesgo como la conducta, el contenido y el contacto, que determinaron los niveles con mayor incidencia como el *ciberbullying*, el *phishing*, la ingeniería social y la intrusión en las clases virtuales, como resultado de la aplicación de técnicas de análisis de riesgo abordando la causa, la consecuencia, el plan de acción y la contención de los riesgos, todo esto fue fundamental para diseñar el recurso digital con los lineamientos institucionales aplicando la ciberseguridad en el Gimnasio Militar de la Fuerza Aeroespacial Colombiana, el cual se materializó y permitió evidenciar la importancia de implementar un manual en ciberseguridad, que esté al alcance de toda la comunidad educativa.

## Referencias bibliográficas

- Albert, M. J. (2007). *La investigación educativa: claves teóricas*. McGraw Hill. Pp. 1 – 266. [https://www.academia.edu/27287685/La\\_Investigaci%C3%B3n\\_Educativa\\_Claves\\_Te%C3%B3ricas\\_Albert\\_G](https://www.academia.edu/27287685/La_Investigaci%C3%B3n_Educativa_Claves_Te%C3%B3ricas_Albert_G)
- Banco Bilbao Vizcaya Argentaria - BBVA. (2017). *La importancia de las TIC en las necesidades de la sociedad: una aproximación a través de la óptica de Maslow*. [https://www.bbvaesearch.com/wp-content/uploads/2017/09/maslow\\_piramide.pdf](https://www.bbvaesearch.com/wp-content/uploads/2017/09/maslow_piramide.pdf)
- Caamaño, E. & Gil, R. (2020). Cybersecurity risk prevention from forensic auditing: combining organizational human talent. *Novum, Revista de Ciencias Sociales Aplicadas*, 1(10), 61-80. <https://www.redalyc.org/journal/5713/571361695004/html/>
- Cano, J. J. y Rocha, A. (2019). Ciberseguridad y ciberdefensa: retos y perspectivas en un mundo digital. *Risti*, (32). <https://doi.org/10.17013/risti.32.0>.
- Castilla, M. F. (2013). *La teoría del desarrollo cognitivo de Piaget aplicada en la clase de primaria*. <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/5844/TFGB.531.pdf;jsessionid=3DE54FF07F73E8720E2F8E86068BE10D?sequence=1>
- Cayón, J. G. (2014). La importancia del componente educativo en toda estrategia de ciberseguridad. Centro de Estudios Estratégicos sobre Seguridad y Defensa Nacionales. *Esdegue Revista científica*, 9(18). <https://esdeguerevista.cientifica.edu.co/index.php/estudios/article/view/9/4>
- Davis, F. (1989). Perceived usefulness, perceived ease of use and user acceptance of information technology. *MIS Quarterly*, 13(3), pp. 319-340.
- D. Q. Institute. (2019). *DQ Global Standards Report 2019*. [https://www.dqinstitute.org/wp-content/uploads/2019/11/DQ\\_GlobalStandardsReport2019.pdf](https://www.dqinstitute.org/wp-content/uploads/2019/11/DQ_GlobalStandardsReport2019.pdf)
- Echeverría, J. (2018). *La revolución tecnocientífica*. <http://naturalezacienciaysociedad.org/wp-content/uploads/sites/3/2018/01/Echeverria-Revoluci%C3%B3nTecnocient%C3%ADfica.pdf>
- Fernández, K., Casarín, A. y McAnally, L. (2015). Apropiación tecnológica: una visión desde los modelos y las teorías que la explican. *Perspectiva Educativa, Formación de Profesores*, 54(2), 109-125. <https://www.redalyc.org/pdf/3333/333339872008.pdf>
- Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia – UNICEF. (2019). *Niños, niñas y adolescentes en línea. Riesgos de las redes y herramientas para protegerse*. <http://www.codajic.org/node/4215>

- Galán, C. M. y Galán-Cordero, C. (2016). La ciberseguridad pública como garantía del ejercicio de derechos. *Derecho & Sociedad*, (47), 293-306. <https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/derechosociedad/article/view/18892>
- ICONTEC. (2019). *Norma IEC-ISO 31010: el uso de técnicas para la evaluación del riesgo*. <https://campus.icontecvirtual.edu.co/uploads/posts/Z95h9fsvPvDsUZNjwKxr.pdf>
- Ley 1273. (2009). *Ley de protección de datos*. Secretaría del Senado. [http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley\\_1273\\_2009.html](http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley_1273_2009.html)
- Marín, J., Nieto, Y., Huertas, F. y Montenegro, C. (2019). Modelo ontológico de los ciberdelitos: caso de estudio Colombia. *Risti*, (17), 244-257. <https://www.proquest.com/openview/ef48269d2b309b4657581d7bc7b8172a/1?pq-origsite=gscholar&cbl=1006393#:~:text=Al%20realizar%20el%20modelo%20ontol%C3%B3gico,realiza%20la%20conducta%20y%20su>
- McClelland, D. (1964). The Achieving Society. *JSTOR*. 3(3), 371-381. <https://doi.org/10.2307/2504238>
- Monsalve, J. (2018). *Ciberseguridad: principales amenazas en Colombia (ingeniería social, phishing y dos)*. Universidad Piloto de Colombia. <http://repository.unipiloto.edu.co/handle/20.500.12277/4663>
- Morales, J. A. (2019). *Ciberseguridad y su aplicación en las instituciones de educación superior*. Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López.
- Oliver, E. y Santos, T. (2014). Socialización preventiva ante el ciberacoso. *C&SC – Communication & Social Change*, 2(1), 87-106. <https://doi.org/10.4471/csc.2014.09>
- Ospina, M. y Sanabria, P. (2020). Desafíos nacionales frente a la ciberseguridad en el escenario global: un análisis para Colombia. *Revista Criminalidad*, 62(2). [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1794-31082020000200199](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-31082020000200199)
- Otzen, T. y Manterola, C. (2017). Técnicas de muestreo en una población sobre una población de estudio. *Int. J. Morphol.*, 35(1), 227-232. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-95022017000100037>
- Passos, E. (2015). *Metodología de la presentación de trabajos de investigación. Una manera práctica de aprender a investigar, investigando*. Editorial Institución Tecnológica Colegio Mayor de Bolívar.
- Reyes, L. (2007). La teoría de la acción razonada: implicaciones para el estudio de las actitudes. *Investigación Educativa Duranguense*, (7), 66-77. [https://www.researchgate.net/publication/28175060\\_La\\_Teor%C3%ADa\\_de\\_la\\_Accion\\_Razonada\\_Implicaciones\\_para\\_el\\_estudio\\_de\\_las\\_actitudes](https://www.researchgate.net/publication/28175060_La_Teor%C3%ADa_de_la_Accion_Razonada_Implicaciones_para_el_estudio_de_las_actitudes)
- Sneiderman, S. (2006). Las técnicas proyectivas como método de investigación y diagnóstico. Actualización en técnicas verbales: el cuestionario desiderativo. *Subjetividad y Procesos Cognitivos*, (8), 296-331. <https://www.redalyc.org/pdf/3396/339630247014.pdf>
- Valencia, A. Bermeo, M., Acevedo, Y., Garcés, L., Quiroz, J., Benjumea, M. y Vanegas, J. (2020). Tendencias investigativas en educación en ciberseguridad: un estudio bibliométrico. *Risti*, (29), 225-239.
- Valle, M. (2018). Ciberseguridad. Consejos para tener vidas digitales más seguras. *Educatio Siglo XXI*, 36(3), 519-522.

## Ciencia y Poder Aéreo

Revista Científica de la Escuela de Postgrados  
de la Fuerza Aeroespacial Colombiana  
ISSN 1909-7050 - E-ISSN 2389-9468

— **Presentación.** La revista científica *Ciencia y Poder Aéreo* es una publicación semestral, editada por la Escuela de Postgrados de la Fuerza Aeroespacial Colombiana. Su objetivo es comunicar los resultados de investigación en los temas de Desarrollo Espacial, AD Astra; Seguridad Operacional y Logística Aeronáutica; Gestión y Estrategia; Tecnología e Innovación; y Educación y TIC. La publicación busca, además, contribuir al desarrollo tecnológico y científico del país, generando nuevo conocimiento y propiciando espacios de discusión y reflexión.

— **Misión.** La misión de la revista *Ciencia y Poder Aéreo* es fomentar la divulgación del conocimiento en torno al sector aeroespacial mediante la publicación de artículos originales e inéditos en las áreas de Desarrollo Espacial AD ASTRA, Seguridad Operacional y Logística Aeronáutica, Gestión y Estrategia, Tecnología e Innovación, y Educación y TIC; producto de actividades científicas de investigación con alta calidad y pertinencia social. Se contribuye, de esta manera, al desarrollo económico, industrial y humano del país.

— **Visión.** La revista *Ciencia y Poder Aéreo*, alienada con la estrategia de la Fuerza Aeroespacial Colombiana, será, para el 2042, un referente regional y global para la divulgación del conocimiento científico en la integración de capacidades militares y civiles del sector aeroespacial, en las áreas de Desarrollo Espacial AD ASTRA, Seguridad Operacional y Logística Aeronáutica, Gestión y Estrategia: modelos de planeación estratégica, Tecnología e Innovación, y Educación y TIC, tanto en el

campo de la ingeniería como en las ciencias sociales. Por lo tanto, la revista hará parte de las mejores bases de datos especializadas y estará indexada en Scopus y Web of Science.

— **Público.** La revista *Ciencia y Poder Aéreo* está dirigida a la comunidad científica nacional e internacional, estudiantes, profesores, docentes, investigadores; miembros de las Fuerzas Militares y del sector aeroespacial.

— **Política Editorial.** Dentro de la Política editorial de la revista *Ciencia y Poder Aéreo* se incluye un aparte dirigido a la ética frente a las responsabilidades del autor, del árbitro y el proceso de evaluación, así como del proceso editorial.

— **Ética de la Revista.** La revista se acoge a las *Ethical guidelines for journal publication* de Elsevier. Según estas, los artículos presentados a la revista deben ser originales e inéditos y estos no deben estar simultáneamente en proceso de evaluación ni tener compromisos editoriales con ninguna otra publicación. Si el manuscrito es aceptado, el editor espera que su aparición anteceda a cualquier otra publicación total o parcial del artículo. Cuando la revista tiene interés de publicar un artículo que ya ha sido previamente publicado, el autor deberá solicitar la autorización correspondiente a la editorial que realizó la primera publicación y dirigirla al editor.

— **Reserva de Derechos.** Excepto cuando se indique lo contrario, el contenido en este sitio es licenciado bajo una licencia Creative Commons Atribución 4.0 internacional. La licencia permite a cualquier usuario descargar, imprimir, extraer, archivar, distribuir y comunicar públicamente este artículo, siempre y cuando el crédito se dé a los autores de la obra: al autor (es) del texto y a la revista científica *Ciencia y Poder Aéreo* de la Escuela de Postgrados de la Fuerza Aeroespacial Colombiana.

# Ciencia y Poder Aéreo

Scientific Journal of the Escuela de Postgrados de la Fuerza Aeroespacial Colombiana  
ISSN 1909-7050 - E-ISSN 2389-9468

— **Aim and Scope.** *Ciencia y Poder Aéreo* is a biannual scientific journal, of open access, which receives articles indistinctly in Spanish, English and Portuguese, and is edited by the Escuela de Postgrados Fuerza Aérea. It is aimed to contribute to the dissemination of research results on the fields Space Development, AD Astra; Operational Safety and Aviation Logistics; Management and Strategy; Technology and Innovation; and Education and TIC. The journal also seeks to contribute to Colombian technological and scientific development, generating new knowledge and creating opportunities for discussion and reflection.

— **Mission.** The mission of the *Ciencia y Poder Aéreo* journal is to promote the dissemination of knowledge about the aerospace sector through the publication of original and unpublished articles in the areas of AD Astra Space Development, Operational Safety and Aeronautical Logistics, Management and Strategy, Technology and Innovation and Education and TIC; product of scientific research activities with high quality and social relevance. In this way, it contributes to the economic, industrial and human development of the country.

— **Vision.** The journal *Ciencia y Poder Aéreo*, aligned with the strategy of the Fuerza Aeroespacial Colombiana, will be, by 2042, a regional and global benchmark for the dissemination of scientific knowledge in the integration of military and civil capabilities of the aerospace sector, in the areas of

AD Astra Space Development, Operational Safety and Aeronautical Logistics, Management and Strategy, Technology and Innovation, and Education and TIC, both in the field of engineering and social sciences. Therefore, the journal will be part of the best specialized databases and will be indexed in Scopus and Web of Science.

— **Audience.** *Ciencia y Poder Aéreo* is addressed to the national and international scientific community, students, professors, trainers, researchers, members of the Colombian Military Forces, and members of the aerospace industry.

— **Editorial Policy.** In its editorial policy, *Ciencia y Poder Aéreo* includes a code of ethics on the responsibilities of authors and reviewers, and on the evaluation and the editorial process.

— **Journal Ethics.** The journal complies with Elsevier Ethical Guidelines for Journal Publication. According to these, submissions must be original and unpublished works and must not be simultaneously in evaluation nor have editorial commitments with any other publication. If the manuscript is accepted, the editor expects its appearance to precede any other full or partial publication. When the journal is interested in publishing a paper that has already been published, the author must request authorization from the publisher that made the first publication and refer this information to the editor.

— **Copyright and Licensing.** Except when otherwise indicated, this site and its contents are licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License. Under the terms of this license, users are free to download, print, extract, archive, distribute and publicly communicate the content of articles, provided that proper credit is granted to authors and *Ciencia y Poder Aéreo*, scientific journal of the Escuela de Postgrados Fuerza Aérea.

## Ciencia y Poder Aéreo

Revista científica da Escuela de Postgrados de la Fuerza Aeroespacial Colombiana  
ISSN 1909-7050 - E-ISSN 2389-9468

— **Enfoque e alcance.** A revista científica *Ciencia y Poder Aéreo* é uma publicação semestral, acesso aberto, que recebe artigos indistintamente em espanhol, inglês e português e é editada pela Escuela de Postgrados Fuerza Aérea. Seu objetivo é comunicar os resultados de pesquisa nos temas de Desenvolvimento Espacial, AD Astra; Segurança Operacional e Logística na Indústria Aeronáutica; Gestão e Estratégia; Tecnologia e Inovação; e educação e TIC. Além disso, a publicação busca contribuir ao desenvolvimento tecnológico e científico do país, gerando novo conhecimento e propiciando espaços de discussão e reflexão.

— **Missão.** A revista *Ciencia y Poder Aéreo* tem como missão promover a difusão do conhecimento sobre o setor aeroespacial por meio da publicação de artigos originais e inéditos nas áreas de Desenvolvimento Espacial AD Astra, Segurança Operacional e Logística Aeronáutica, Gestão e Estratégia, Tecnologia e Inovação, e Educação e TIC, produto de atividades de pesquisa científica de alta qualidade e relevância social. Desta forma, contribui para o desenvolvimento econômico, industrial e humano do país.

— **Visão.** A revista *Ciencia y Poder Aéreo*, alinhada com a estratégia da Fuerza Aeroespacial Colombiana, será, até 2042, uma referência regional e global para a difusão do conhecimento científico na integração das capacidades militares e civis do setor aeroespacial, nas áreas de Desenvolvimento Espacial AD Astra, Segurança Operacional e Logística

Aeronáutica, Gestão e Estratégia, Tecnologia e Inovação, e Educação e TIC, ambos no campo da engenharia e ciências sociais. Assim, a revista fará parte das melhores bases de dados especializadas e será indexada na Scopus e Web of Science.

— **Público.** A revista *Ciencia y Poder Aéreo* está dirigida à comunidade científica nacional e internacional, estudantes, professores, docentes, pesquisadores; membros das Forças Militares, e da indústria aeroespacial.

— **Política Editorial.** Na Política editorial da revista *Ciencia y Poder Aéreo* é incluída uma seção destinada à ética em relação as responsabilidades do autor, do árbitro e do processo de avaliação assim como do processo editorial.

— **Ética da Revista.** A revista está sujeita às *Ethical guidelines for journal publication* de Elsevier. De acordo com estas, os artigos submetidos à revista devem ser originais e inéditos e não devem estar simultaneamente em processo de avaliação em outras publicações ou órgãos editoriais. Caso o manuscrito for aceito, o editor esperará que sua publicação seja antes de qualquer outra publicação total ou parcial do artigo. Quando a revista tiver interesse em publicar um artigo que já tenha sido previamente publicado, o autor deverá solicitar a autorização correspondente à editorial que fez a primeira publicação e enviá-la ao editor.

— **Direitos de autor e licença de uso.** Exceto quando for indicado o contrário, o conteúdo deste site será licenciado sob uma licença Creative Commons Attribution 4.0 Internacional. A licença permite que qualquer usuário baixe, imprima, extraia, archive, distribua e comunique publicamente este artigo, desde que seja dado o devido crédito aos autores: ao(s) autor(es) do texto e a *Ciencia e Poder Aéreo*, revista da Escuela de Postgrados Fuerza Aérea.

# Instrucciones para autores

## — Clasificación de los artículos científicos

La revista *Ciencia y Poder Aéreo* evalúa artículos que generen nuevo conocimiento. Dentro de estos se encuentran:

**a. Artículo de investigación.** Es un documento que presenta de manera detallada los resultados originales derivados de proyectos de investigación o desarrollo tecnológico. Debe estar estructurado en introducción, revisión de literatura, metodología, discusión y conclusiones. El resumen debe ser de 150-250 palabras, el cual debe tener la misma estructura del artículo de investigación. Se recomienda que referencie mínimo 20 documentos, en su mayoría artículos de revistas indexadas, capítulos de libros y libros con DOI. Las palabras clave deben ser máximo 6. Recomendamos que estas sean tomadas del Nasa Thesaurus o del Unesco Thesaurus (ciencias sociales).

**b. Artículo de reflexión.** Es un documento original que ofrece una perspectiva analítica, reflexiva o crítica sobre un tema específico. Estos artículos deben contener una propuesta teórica o conceptual original, que pueda contribuir científicamente en las áreas de interés de la revista. El artículo tendrá que ser claro, coherente y seguir una estructura lógica. El resumen debe ser de 150-250 palabras, el cual debe tener claro el contexto del estudio, cuál es el problema, cuál es la posición y cómo se argumentará en favor de esta. Se recomienda que referencie mínimo 20 documentos en su mayoría a artículos de revistas indexadas, capítulos de libros y libros. Recomendamos que estas sean tomadas del Nasa Thesaurus o del Unesco Thesaurus (ciencias sociales).

**c. Artículo de revisión.** Es un documento que organiza, sistematiza y analiza resultados de investigación relevantes para los temas generales de la revista. Este tipo de artículos son escritos por autores que tienen un dominio en un área de investigación representada en los artículos que ha publicado. Se aceptarán revisiones de literatura, sistemáticas o metaanálisis. Los resúmenes expondrán el objetivo, los métodos (para revisiones sistemáticas o metaanálisis), los resultados y las conclusiones. El mínimo de artículos de revistas indexadas, capítulos de libros y libros que deben referenciar estos documentos son 50.

Los artículos se publicarán en español, inglés y portugués. La revista *Ciencia y Poder Aéreo* admite la presentación de artículos cuyas áreas temáticas coincidan con los que se describen a continuación:

- Desarrollo Espacial, AD Astra
- Seguridad Operacional y Logística Aeronáutica.
- Gestión y Estrategia.
- Tecnología e Innovación.
- Educación y TIC.

Busca que los temas referidos estén en lo posible relacionados con el sector aeroespacial y afines, con énfasis en la ingeniería aeronáutica.

## — Directrices para autores

- Se recuerda que los artículos deben ser enviados por medio de la plataforma Open Journal System (<https://publicacionesfac.com/index.php/cienciaypoderareero>) o al correo [cienciaypoderareero@epfac.edu.co](mailto:cienciaypoderareero@epfac.edu.co)
- Es necesario cumplir con los requisitos para el documento depositados en la sección “Requisitos del texto”, dentro de los cuales se detalla el tipo de archivo preferido, el formato del documento, la fuente preferida, el puntaje de la letra, el interlineado, así como el manual de estilo seguido por *Ciencia y Poder Aéreo*.
- También se hace preciso seguir las recomendaciones éticas y del proceso consignadas en “Responsabilidades del autor”, como, el envío de una ficha de presentación; las consideraciones sobre la autoría y problemas con esta; la necesidad de proporcionar información veraz sobre la financiación y afiliación institucional; el permiso para enviar su documento a una evaluación por pares; el permiso a usar sus datos para plataformas como Publindex o Crossref; el compromiso de que el artículo es original, no se ha postulado simultáneamente a otras revistas, no es redundante, y la cesión de derechos de propiedad intelectual o patrimonial a la Escuela de Postgrados de la Fuerza Aeroespacial Colombiana.

## Normas generales

Todo artículo debe:

- Ser un documento o artículo original, no publicado previamente y no considerado en otra revista.
- Estar científicamente documentado, presentar coherencia y cohesión.

- Explicar el tipo de artículo: si corresponde a un artículo de investigación, de reflexión o de revisión.
- Detallar el proyecto de investigación, el registro (en caso de contar con este) o datos relacionados con el trabajo a presentar.
- Exponer de manera veraz la filial institucional de los autores, su perfil profesional y datos de contacto, la función desempeñada (intelectual, experimental o de escritura). También contar con un ORCID y un CVLAC, en caso de estar vinculado a una institución colombiana. Se recomienda incluir su nombre normalizado preferido teniendo en cuenta las consideraciones de la International Registry of Authors-Links to Identify Scientists (<https://www.iralis.org/>).
- Detallar si se encuentra inmerso en conflictos de interés.
- Cada propuesta de artículo se somete a la evaluación de pares, cuyo concepto es importante para la decisión de su publicación.
- Exponer posibles conflictos de interés.
- Los datos aquí depositados serán usados para la plataforma Publindex y Crossref.

## — Requisitos y estructura de los artículos

### Requisitos del texto

- Los artículos deben tener una letra Times New Roman, 12 puntos, interlineado sencillo.
- Las figuras, tablas y ecuaciones siguen las normas APA, la séptima edición. Por ejemplo, numerarlas y citarlas dentro del documento, tener en cuenta cómo se titulan cada una de ellas, basarse en el tipo de notas que debe tener cada una de ellas, describir cuál es la fuente de cada una.
- Siglas: se citará la primera vez el nombre completo y entre paréntesis la sigla. Posteriormente, solo se usará la sigla. Las siglas que se introduzcan deberán usarse a lo largo del texto.
- Citación y referencias: la citación y referencias se deben editar con base en las normas APA, séptima edición.
- Las notas al pie de página se utilizarán solo para aportes sustantivos al texto.

### Estructura para los tipos de artículos

El título debe estar en español, inglés y portugués. Como nota al pie, indicar el tipo de artículo, la información sobre la financiación de la investigación y datos asociados a esta —su grupo de investigación, el registro de proyecto, la entidad

financiadora u otra información que se considere—. El título debe tener máximo 15 palabras. Tiene que aclarar el tema del artículo y ser específico.

**Resumen:** deben estar escritos en español, portugués e inglés entre 150 y 250 palabras.

Los resúmenes de artículos de investigación (resúmenes analíticos) tienen la estructura de introducción, objetivos, método, resultados, conclusiones.

Los resúmenes de artículos de reflexión (resúmenes analíticos sintéticos) presenta los aspectos significativos del texto de una manera lógica. Este también resalta los resultados que obtuvo el autor.

Los resúmenes de artículos de revisión presentan los principales puntos de análisis (resúmenes descriptivos) ofreciendo los principales hallazgos a partir de esta comparación. En el caso de artículos de revisión sistemática o metaanálisis se sigue una estructura como la de los artículos de investigación.

**Palabras clave:** debe tener 3 a 6 en orden alfabético (tener en cuenta las palabras temáticas que proporcionan los tesauros recomendados en “Clasificación de los artículos”). Estas separadas por punto y coma (;).

Los artículos de investigación deben tener una introducción (hacer mención al problema de investigación); un método; unos resultados; la discusión; las conclusiones, recomendaciones o agradecimientos (opcional).

Las referencias deben estar en orden alfabético, siguiendo las normas APA, séptima edición. Se recomienda que sean mayoritariamente artículos en revistas indexadas o libros de editoriales académicas, haber sido publicadas en los últimos cinco años, y tener doi.

En un fichero aparte se debe incluir datos del autor: nombres, apellidos, breve currículo, filial institucional, dirección electrónica y postal (dirección lugar de trabajo o de correspondencia), números telefónicos de contacto y adscripción académica o profesional, función dentro de la realización del artículo (intelectual, experimental o escritura).

## — Preparación de envíos

Como parte del proceso de envíos, los autores están comprometidos a comprobar que su envío cumpla todos los requisitos que se muestran a continuación. Se devolverán a los autores aquellos envíos que no cumplan estas directrices.

1. El trabajo enviado no ha sido publicado previamente ni se ha enviado simultáneamente a otra revista.
2. El manuscrito está en formato Microsoft Word (forma de fichero electrónico .doc).
3. Los artículos deben tener una letra Times New Roman, 12 puntos, interlineado sencillo.
4. Se han presentado las referencias bibliográficas en orden alfabético siguiendo los lineamientos de las normas APA, séptima edición.
5. Todas las figuras y tablas se han situado en la posición correspondiente y no al final del texto. Estas deben ser citadas a lo largo del documento. Todas las figuras (gráficos, imágenes, fotografías) y tablas deben ser enviadas por separado en la máxima calidad o en formato editable para efectos de diseño.
6. El trabajo enviado ha sido preparado para la revisión ciega por pares, es decir, se han eliminado las referencias y los nombres de los autores de todas las partes del artículo y se han sustituido por la palabra «autor» (propiedades del documento incluidas).
7. Se han adjuntado los datos del autor en un fichero aparte con nombre, apellidos, breve currículo, filial institucional, dirección electrónica y postal (dirección lugar de trabajo o de correspondencia), números telefónicos de contacto y adscripción académica o profesional, rol (intelectual, experimental o escritura).
8. Las referencias son en su mayoría a artículos de revistas indexadas o libros académicos de máximo cinco años. Estas poseen doi o en su defecto tienen un enlace que no está caído.
9. Cesión de los derechos de propiedad intelectual. La propiedad intelectual hace referencia a las creaciones artísticas, industriales o científicas. La revista rige sus políticas de cesión de derechos de acuerdo con los siguientes principios:

- Se han diligenciado y firmado el formato: Carta de Presentación, Licencia de Uso y Cesión de Derechos Patrimoniales. Allí los autores dejan de manifiesto que son los autores originales de las obras (también se incluyen aspectos referidos a la licencia de uso y derechos patrimoniales).
- El equipo editorial queda, por lo tanto, exonerado de cualquier obligación o responsabilidad por cualquier acción legal que pueda suscitarse derivada de la obra depositada por la vulneración de derechos de terceros, sean de propiedad intelectual o industrial, de secreto comercial o cualquier otro.

- Es responsabilidad de los autores obtener los permisos necesarios de las imágenes que estén sujetas a copyright.
- Si por último se decide no publicar el artículo en la revista, la cesión de derechos mencionada quedará sin efecto, de modo que el autor recuperará todos los derechos de explotación de la obra.
- El envío de los artículos no implica la obligatoriedad de publicarlos, pues serán sometidos a evaluación de pares ciegos; aquellos textos que a juicio del editor, el Comité Editorial o el Comité Científico llenen los requisitos exigidos y sean trabajos relacionados con el Desarrollo Espacial, AD Astra; la Seguridad Operacional y Logística Aeronáutica; la Gestión y Estrategia; la Tecnología e Innovación; y la Educación y TIC.
- Si no se indica lo contrario, se entienden aceptados la política de confidencialidad y el aviso legal de la revista en el momento de completar la entrega de su artículo y en el momento de ejecutar el formulario de registro en sitio web: [www.publicacionesfac.com](http://www.publicacionesfac.com).

Los autores son responsables del contenido de sus artículos y materiales asociados, garantizando su originalidad y carácter inédito. La revista *Ciencia y Poder Aéreo* realiza la verificación de todos los manuscritos presentados para publicación mediante el uso del software antiplagio *iThenticate*, de tal manera que se garantice la originalidad de los manuscritos. En caso de detectar plagio, el manuscrito será descartado para su publicación.

#### Nota:

Para información adicional sobre los siguientes aspectos consulte la página web de la revista

<https://publicacionesfac.com/index.php/cienciaypoderaereo/about/submissions>

**Política de prevención de plagio**  
**Política de dictaminación**  
**Política de revisión y publicación**  
**Política de acceso abierto**  
**Derechos de autor y licencia de uso**

---

#### Postule sus documentos a través de la plataforma:

<https://publicacionesfac.com/index.php/cienciaypoderaereo>

Dirija sus inquietudes al correo electrónico:

✉ [cienciaypoderaereo@epfac.edu.co](mailto:cienciaypoderaereo@epfac.edu.co)

---

# Guidelines for Authors

## — Classification of Articles

*Ciencia y Poder Aéreo* accepts submissions that involve the generation of new knowledge. Among these, the following are included:

**a. Research article.** Document that presents the original results of research or technological development projects in detail. It must include introduction, literature review, methodology, discussion, and conclusions. The abstract must be 150-250 words and follow the same structure as the content of the paper. The list of references should include a minimum of 20 peer-reviewed works (especially journal articles, book chapters and books with a DOI number). A maximum of 6 keywords is recommended. These should be taken from Nasa Thesaurus or Unesco Thesaurus (Social Sciences).

**b. Research-based reflection article.** Original work that offers analytical, reflexive or critical perspectives on a specific topic. These articles must present an original theoretical or conceptual proposal that scientifically contributes to the areas of interest of the journal. The article must be clear, coherent, and follow a logical structure. The abstract should contain 150-250 words and be clear about the context of the study, the research problem, the position of the author(s), and how this will be supported through arguments. The list of references should include a minimum of 20 peer-reviewed works, particularly journal articles, book chapters and books. A maximum of 6 keywords is recommended. These should be taken from Nasa Thesaurus or Unesco Thesaurus (Social Sciences).

**c. Review Article.** Document that organizes, systematizes and provides an analysis of research results relevant to the subject areas covered by the journal. This type of article is prepared by authors with a strong domain of certain research areas, represented by the number of contributions they have published. Literature, systematic or meta-analysis reviews will be accepted. The abstract will state the objective, method (for systematic reviews or meta-analyses), results, and conclusions of the study. A minimum of 50 peer-reviewed journal articles, book chapters and/or books must be included in the list of references.

Manuscripts in Spanish, English and Portuguese will be published. *Ciencia y Poder Aéreo* accepts submissions whose subject areas match those described below:

- Space Development, AD Astra
- Operational Safety and Aviation Logistics.
- Management and Strategy.
- Technology and Innovation.
- Education and ICT.

The journal seeks that the topics addressed by authors are associated to the aerospace industry and other related sectors, with a particular focus on aeronautical engineering.

## — Guidelines for Authors

- Authors should submit their articles using the Open Journal System platform (<https://publicacionesfac.com/index.php/cienciaypoderaereo>) or send them to the e-mail address [cienciaypoderaereo@epfac.edu.co](mailto:cienciaypoderaereo@epfac.edu.co)
- It is necessary to comply with the requirements established in the “Text requirements” section, within which the preferred file type, document format, font, font size, and line spacing are described. The style manual prepared by *Ciencia y Poder Aéreo* must also be considered before submissions.
- It is also necessary to follow the ethical and process recommendations set forth in the “Duties of authors” section, such as sending a presentation form; considerations about authorship and related issues; the need to provide accurate information on funding and institutional affiliation; permission to submit documents for peer-reviewing; grant permission to use their data in platforms such as Publindex or Crossref; stating that the article is original, has not been submitted simultaneously to other journals, and is not redundant; and accepting the transfer of intellectual or patrimonial property rights to the Escuela de Postgrados de la Fuerza Aeroespacial Colombiana.

## General Guidelines

All submissions must:

- Be an original document, not previously published nor submitted to another journal.
- Be scientifically documented and display coherence and internal unity.

- Indicate the type of article: research paper, research-based reflection paper or review paper.
- Indicate the research project, registration (if available) and/or any related data.
- State the institutional affiliation of all authors, their professional profile and contact details, as well as their role (intellectual, experimental or writing of the paper). Authors should also include their ORCID and CVLAC information, in case of working for an institution in Colombia. It is recommended to follow the guidelines of the International Registry of Authors-Links to Identify Scientists (<https://www.iralis.org/>) for including authors names.
- Declare any conflicts of interest.
- Be subject to a peer-review process, whose concept is relevant for deciding upon their publication.
- Allow the use of information in Publindex and Crossref platforms.

## — Manuscript Requirements and Structure

### Text Requirements

- Articles must use Times New Roman font type, 12 points, single line spacing.
- Figures, tables and equations must follow APA standard, 7th edition. For example, these elements must be consecutively numbered and cited within the text, taking into account the correct style for titles, notes and source.
- Acronyms will be fully named the first time they are mentioned, with its abbreviation presented in brackets. Subsequently, only the acronym will be used. Acronyms previously introduced should be used throughout the text.
- Cites and references should follow the American Psychological Association (APA) standard, 7th edition.
- Footnotes will be only be used for adding relevant information to support the text.

### Structure for Each Type of Article

The title of all articles should be included in Spanish, English, and Portuguese. As a footnote, state the type of article, information regarding the research and other related data (research group, project registration, funding entity, and other information). The title must have a maximum of 15 words. Authors must state the subject area of their paper.

**Abstract:** should be included in Spanish, English, and Portuguese and have 150-250 words in length.

The abstract of research papers should follow this structure: introduction, methodology, results, and conclusions.

The abstract of reflection articles (synthetic abstracts) present the significant aspects of the study in a logical way, highlighting the results obtained by authors.

The abstract of review articles present the main points of analysis (descriptive summary), offering the main findings from their comparison. In the case of systematic review or meta-analysis studies, a structure similar to that of research articles should be followed.

**Keywords:** 3 to 6 in alphabetical order (consider the thematic words provided by thesauri in the “Classification of Articles” section) and separated by a semicolon (;).

Research papers must include the following sections: introduction (mention the research problem), methodology, results, discussion, conclusions, recommendations, and acknowledgments (optional).

References must be in alphabetical order, following APA standard, 7th edition. These should correspond to peer-reviewed journal articles, books published by academic editorials, have a doi number, and have been published during the last five years.

In a separate file include author(s) information, name and surname, brief curriculum vitae, institutional affiliation, e-mail and postal address (workplace address and/or mail address), contact phone numbers and academic or professional relation, and role within the production of the article (intellectual, experimental or writing of the paper).

## — Preparing your Submission

As part of the submission process, authors are committed to verifying that the submitted documents meet all of the requirements described below. Submissions that do not meet these guidelines will be returned to authors.

1. The submitted work has not been previously published nor sent simultaneously to another journal.
2. The manuscript is in Microsoft Word, Open Office or RTF format (electronic file .doc, .rtf or .odt).
3. Articles must use Times New Roman font type, 12 points, single line spacing.
4. References are presented in alphabetical order, following the guidelines of the APA standards, 7th edition.

5. All figures and tables are properly placed within the document and not at the end of the text. These should be cited in the document. All figures (graphs, images, photographs) and tables should be separately sent in high quality or an editable format for design purposes.
6. The submitted paper should be prepared for the blind peer-reviewing process, that is, references to authors' identity and names have been removed from all the document and replaced by the word «author(s)» (document properties included).
7. Authors' data should be attached in a separate file, including name and surname, brief curriculum vitae, institutional affiliation, e-mail and postal address (workplace address and/or mail address), contact phone numbers and academic or professional relation, and role within the production of the article (intellectual, experimental or writing of the paper).
8. References mostly correspond to articles in peer-reviewed journals or academic books published during the last five years. These have a doi number or an operating link.
9. Transfer of intellectual property rights. Intellectual property refers to artistic, industrial or scientific creations. The journal adopts the following principles for the transfer of intellectual property rights:
  - All authors must complete and sign the form “Presentation letter and License Use – Economic rights,” in which they manifest that they are the original authors (aspects related to the license of use and economic rights are also included).
  - The editorial team is, therefore, exonerated from any obligation or responsibility for any legal action that may arise from the submitted work regarding the violation of the rights of third parties, whether they are intellectual or industrial property, trade secret or any other.
  - It is the responsibility of authors to obtain the necessary permissions for the use of images subject to copyright.
  - In case authors decide not to publish their paper in the journal, the aforementioned rights assignment will have no effect and authors will recover all the rights for exploiting their work.
  - Submitting an article does not imply that the journal must publish such contribution, since all submissions that, in the opinion of the Editor, the Editorial Committee or the Scientific Committee, meet the requirements and address the fields of Space Development, AD Astra; Operational Safety and Aeronautical Logistics;

Management and Strategy; Technology and Innovation; and Education and TIC will be subject to a peer-review process.

- Unless otherwise stated, the confidentiality policy and the legal notice of the journal are understood as accepted at the time of completing the submission of your paper and the registration form on the website: [www.publicacionesfac.com](http://www.publicacionesfac.com)

Authors are responsible for the content of their papers and associated materials and declare their originality and unpublished character. *Ciencia y Poder Aéreo* examines all the manuscripts submitted for publication using the anti-plagiarism software iThenticate, which exposes the percentage of similarity of a given work with others already published or available in databases, thus establishing its degree of originality. *Ciencia y Poder Aéreo* follows the process recommended by the Committee on Publication Ethics regarding a possible suspicion of plagiarism. Thus, if a text reports a similarity rate of 20%, the editorial team will request adjustments to the document. When this similarity represents a greater rate or corresponds to complete and significant blocks of text, the document will be considered plagiarized and the editorial team will proceed to ask the authors for explanations. If these are not satisfactory, the manuscript will be automatically rejected.

#### Note:

For additional information on the following aspects, please visit the journal website:

<https://publicacionesfac.com/index.php/cienciaypoderaereo/about/submissions>

**Plagiarism Prevention Policy**  
**Initial Assessment Policy**  
**Peer-reviewing Process**  
**Open Access Policy**  
**Copyright and Licensing**

---

#### Submit your documents through the platform:

<https://publicacionesfac.com/index.php/cienciaypoderaereo>

Direct your questions to the e-mail:

✉ [cienciaypoderaereo@epfac.edu.co](mailto:cienciaypoderaereo@epfac.edu.co)

---

# Diretrizes para autores

## — Classificação dos artigos científicos

A revista *Ciencia y Poder Aéreo* avalia artigos de pesquisa que promovam novos conhecimentos. Dentro destes pode-se encontrar:

**a. Artigo de pesquisa.** Documento que apresenta de forma detalhada os resultados originais derivados de projetos de pesquisa ou desenvolvimento tecnológico. Deve estar estruturado em introdução, revisão da literatura, metodologia, discussão e conclusões. O resumo deve ter no mínimo 150 e, no máximo 250 palavras, e deve ter a mesma estrutura do artigo de pesquisa. É recomendado que, no mínimo, 20 documentos sejam referenciados, em sua maioria artigos de revistas indexadas, capítulos de livros e livros com DOI. As palavras-chave devem ser no máximo 6. Do mesmo modo, é recomendado que estas sejam tomadas do Nasa Thesaurus ou de Unesco Thesaurus (ciências sociais).

**b. Artigo de reflexão.** Documento original que apresenta uma perspectiva analítica, reflexiva ou crítica sobre uma temática específica. Contudo, este artigo deve conter uma proposta teórica ou conceitual original que possa contribuir cientificamente nas áreas de interesse da revista. O artigo tem que ser claro, coerente e seguir uma estrutura lógica. O resumo deve ter de 150 a 250 palavras, e deve ter claro o contexto do estudo, qual é o problema, qual é o ponto de vista e como se argumentará a favor desta. É recomendado que, no mínimo, 20 documentos sejam referenciados, em sua maioria artigos de revistas indexadas, capítulos de livros e livros com DOI. Do mesmo modo, é recomendado que estas sejam tomadas do Nasa Thesaurus ou de Unesco Thesaurus (ciências sociais).

**c. Artigo de revisão.** Documento onde se organizam, sistematizam e analisam os resultados de pesquisa relevantes para as temáticas gerais da revista. Este tipo de artigos são escritos por autores que dominam uma área de pesquisa e esse conhecimento é representado nos artigos que tem publicado. Serão aceitas revisões de literatura, sistemáticas e meta-análises. Os resumos devem ter o objetivo, os métodos (para revisões sistemáticas ou meta-análise), os resultados e as conclusões. É recomendado que, no mínimo, 50 documentos sejam referenciados de revistas indexadas, capítulos de livros e livros.

Os artigos serão publicados em espanhol, inglês e português. A revista *Ciencia y Poder Aéreo* aceita a apresentação de artigos cujas áreas temáticas coincidam com as descritas abaixo:

- Desenvolvimento Espacial, AD Astra
- Segurança Operacional e Logística na Indústria Aeronáutica
- Gestão e Estratégia
- Tecnologia e Inovação
- Educação e TIC

Os temas referidos devem estar, na medida do possível, relacionados com a indústria aeroespacial e áreas afins, com ênfase nas engenharias de referência aeronáutica.

## — Diretrizes para autores

- Os autores devem submeter seus artigos, através do nosso portal Open Journal System (<https://publicacionesfac.com/index.php/cienciaypoderaereo>), ou ao e-mail: [cienciaypoderaereo@epfac.edu.co](mailto:cienciaypoderaereo@epfac.edu.co)
- É necessário satisfazer os requisitos para o documento estabelecido na seção “Requisitos do texto”, onde é especificado o tipo de arquivo preferido, o formato do documento, a fonte preferida, a pontuação da letra, o espaçamento entre linhas, assim como o manual de estilo seguido por *Ciencia y Poder Aéreo*.
- Também, é preciso seguir as recomendações éticas do processo consignadas em “Responsabilidades do autor”, como, o envio de uma ficha de apresentação, as considerações sobre a autoria e problemas com esta; a necessidade de disponibilizar informação veraz sobre o financiamento e a filiação institucional; a permissão para enviar seu documento para ser avaliado por pares; a permissão para usar seus dados para plataformas como Publindex o Crossref; o compromisso de que o artigo é original, não tem sido submetido simultaneamente para outras revistas, não é redundante, e a cessão de direitos de propriedade intelectual ou patrimonial à Escuela de Postgrados de la Fuerza Aeroespacial Colombiana.

## Normas gerais

Todo artigo deve:

- Ser um documento ou artigo original, não ter sido publicado ou considerado em outra revista.

- Estar cientificamente documentado, ser coerente, e ter unidade.
- Indicar o tipo de artigo: um artigo de pesquisa, de reflexão ou de revisão.
- Indicar o projeto de pesquisa, registro (em caso de contar com este) e/ou dados relacionados ao trabalho que será apresentado.
- Apresentar a filiação acadêmica do autor(es), perfil profissional e dados de contato, função desempenhada (intelectual, experimental ou de escritura). Também contar com um ORCID e uma CVLAC, caso estiver vinculado a uma instituição colombiana. É recomendado incluir seu nome normalizado preferido, levando em conta as considerações da International Registry of Authors-Links to Identify Scientists (<https://www.iralis.org/>).
- Declarar se o autor está vinculado a conflitos de interesse.
- Cada proposta de artigo é submetida a avaliação por pares, cujo conceito é importante para a decisão de sua publicação.
- Declarar potenciais conflitos de interesses.
- Os dados proporcionados serão usados para a plataforma Publindex e Crossref.

## — Requisitos e estrutura dos artigos

### Requisitos do texto

- Os artigos devem ter uma fonte Times New Roman; tamanho da letra 12, espaçamento simples.
- Equações, tabelas e figuras devem ser citadas no texto de acordo com as normas da APA, 7ª edição. Por exemplo, numerar e citar estas dentro do documento, levando em conta o título de cada uma delas e descrevendo qual é a fonte de cada uma.
- Siglas: o nome completo será citado pela primeira vez e a abreviação entre parêntesis. Posteriormente, apenas a sigla será usada. As siglas introduzidas devem ser usadas em todo o texto.
- Citação e referências: as citações e as referências devem ser editadas com base às normas da APA, 7ª edição.
- As notas de rodapé serão usadas apenas para contribuições substantivas ao texto.

### Estrutura para os tipos de artigos

**Título:** em espanhol, inglês e português. Como nota de rodapé, indicar o tipo de artigo, informações sobre a pesquisa e outros dados relacionados – grupo de pesquisa, registro do projeto, entidade que o financia ou outras informações

relevantes. O título deve ter no máximo 15 palavras. O autor deve esclarecer o assunto do artigo e ser específico.

**Resumo:** em espanhol, português e inglês, deve ter no mínimo, 150 palavras, e no máximo 250 palavras.

Os resumos dos artigos de pesquisa (resumos analíticos) têm a seguinte estrutura: introdução, objetivos, métodos, resultados, conclusões.

No caso de artigos de reflexão (resumos analíticos sintéticos) devem-se apresentar os aspectos significativos do texto de uma maneira lógica, destacando os resultados obtidos pelo autor.

Os resumos de artigos de revisão apresentam os principais pontos da análise (resumos descritivos) oferecendo as principais descobertas partindo desta comparação. No caso dos artigos de revisão sistemática ou meta-análise segue-se uma estrutura similar à dos artigos de pesquisa.

**Palavras-chave:** de 3 a 6 em ordem alfabética (levar em conta as palavras temáticas fornecidas por tesouros sugeridas em “Classificação de artigos”). Separar por ponto e vírgula (;).

Os artigos de pesquisa devem ter uma introdução (abordar o problema de pesquisa); metodologia; resultados; discussão; conclusões, recomendações ou agradecimentos (opcional).

As referências devem estar em ordem alfabética de acordo com as normas da APA, 7ª edição. É recomendado que a maioria das fontes sejam artigos em revistas indexadas ou livros de editoras acadêmicas que tenham sido publicados nos últimos cinco anos, e tenham DOI.

Em um arquivo separado, devem-se incluir detalhes do(s) autor (res), nome, sobrenome, currículo breve, filiação acadêmica, e-mail e endereço postal (endereço do trabalho e/ou correspondência), número de telefone e vinculação acadêmica e profissional, função/papel dentro da realização do artigo (intelectual, experimental ou escritura).

## — Processo de submissão

Como parte do processo, os autores comprometem-se a verificar se a submissão atende a todos os itens apresentados abaixo. As submissões que não atenderem as diretrizes serão devolvidas aos autores.

1. O trabalho submetido não foi publicado anteriormente nem foi enviado simultaneamente para outras revistas.
2. O manuscrito está no formato Microsoft Word (Forma de arquivo eletrônico .doc.).
3. Os artigos devem ter uma fonte Times New Roman; tamanho da letra 12, espaçamento simples.

4. As referências bibliográficas tem sido apresentadas em ordem alfabética, de acordo com as diretrizes das normas APA, 7ª edição.
5. Todas as figuras e tabelas foram colocadas na posição correspondente e não no final do texto, e devem ser citadas ao longo do documento. Todas as figuras (gráficos, imagens, fotografias) e tabelas devem ser enviadas separadamente em máxima qualidade ou em formatos editáveis, caso precisarem ser editadas para efeitos de design.
6. O artigo submetido foi preparado para revisão cega por pares, ou seja, as referências e nomes dos autores foram removidos de todas as partes do artigo e substituídos pela palavra “autor” (incluindo as propriedades do documento).
7. Os dados do autor foram anexados em um arquivo separado, com nome, sobrenome, resumo breve, afiliação acadêmica, e-mail e endereço postal (endereço do trabalho ou correspondência), números de telefone de contato e filiação acadêmica ou profissional, papel (intelectual, experimental ou escritura).
8. Na maioria das referências são de artigos em revistas indexadas ou livros acadêmicos publicados, no máximo, há cinco anos.
9. Cessão de direitos de propriedade intelectual. Propriedade intelectual refere-se a criações artísticas, industriais ou científicas. A revista rege-se por políticas de direitos de acordo com seguintes princípios:
  - Foi concluída e assinada a “Carta de apresentação e a licença de uso e Cessão de direitos econômicos e declaração de conflito de interesse”. O Documento que declara que são os autores originais do manuscrito. (Este documento inclui aspectos relacionados à licença de uso e direitos patrimoniais).
  - A equipe editorial é, portanto, exonerada de qualquer obrigação ou responsabilidade por ações legais que surjam do trabalho apresentado relacionados à violação de direitos de terceiros, sejam eles propriedade intelectual ou industrial, sigilo comercial ou qualquer outro.
  - É responsabilidade dos autores obter as autorizações necessárias das imagens sujeitas a copyright.
  - Caso for decidido não publicar o artigo na revista, a cessão de direitos acima mencionada não terá efeito, deste modo o autor recuperará todos os direitos de exploração da obra.
  - O envio dos artigos não implica que a revista esteja na obrigação de publicá-los, pois eles serão submetidos à avaliação de pares-cegos; os textos que, na opinião do editor do Comitê Editorial ou do Comitê Científico,

atendam aos requisitos exigidos e sejam trabalhos relacionados à Desenvolvimento Espacial, AD Astra; Segurança Operacional e Logística na Indústria Aeronáutica; Tecnologia e Inovação; Gestão e Estratégia; Educação e TIC, ou relacionados à indústria aeroespacial ou a setores relacionados.

- Caso contrário, a política de confidencialidade e o aviso legal da revista são entendidos como aceitos no momento de concluir a submissão do artigo e no momento de preencher o formulário registro no site [www.publicacionesfac.com](http://www.publicacionesfac.com).

Os autores são responsáveis pelo conteúdo dos seus artigos e materiais associados, garantindo sua originalidade e caráter inédito. A revista *Ciencia y Poder Aéreo* verifica todos os manuscritos submetidos para publicação usando o software anti-plágio iThenticate, que expõe a percentagem de semelhança que uma obra tem com os outros escritos já publicados ou encontrados em bancos de dados, com o propósito de garantir a originalidade dos manuscritos. *Ciencia y Poder Aéreo* se acolhe ao processo de fluxo recomendado pelo Committee on Publication Ethics acerca de uma possível suspeita de plágio. Deste modo, se o texto superar um 20% de semelhança, a equipe editorial procederá a pedir ajustes no documento. Quando essa semelhança representar uma percentagem maior ou corresponder a fragmentos completos e significativos do texto, a equipe concluirá que o texto foi plágio e pedirá explicações aos autores. Caso as explicações não forem satisfatórias, o manuscrito será rejeitado.

#### Nota:

Para informações adicionais sobre os seguintes aspectos, consulte o site da revista:

<https://publicacionesfac.com/index.php/cienciaypoderaereo/about/submissions>

#### Política de Prevenção de Plágio

**Avaliação por pares**

**Revisão e publicação**

**Política de acesso aberto**

**Direitos de autor e licença de uso**

#### Envie seus documentos pela plataforma:

<https://publicacionesfac.com/index.php/cienciaypoderaereo>

Em caso de dúvidas ou perguntas entre em contacto:

✉ [cienciaypoderaereo@epfac.edu.co](mailto:cienciaypoderaereo@epfac.edu.co)

# ADASTRA



01

Vol. 19

Institución Universitaria, Resolución MEN No. 1906/Agosto 2002 / No. 21057 Noviembre/2016

Enero-junio del 2024 | pp. 1-163

## CIENCIA Y PODER AÉREO

Revista Científica de la Escuela de Postgrados de la FAC

Vol. 19 n.º 1 | enero-junio del 2024 | pp. 1-163 | ISSN 1909-7050 E-ISSN 2389-9468

Doi: <https://doi.org/10.18667/issn.1909-7050> | Bogotá, Colombia | Periodicidad semestral

