

CIENCIA Y PODER AÉREO

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

ISSN 1909-7050 E-ISSN 2389-9468

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



01

Vol. 16

Institución Universitaria, Resolución 1906 MEN, agosto del 2002

Enero-junio del 2021 | pp. 1-170



www.publicacionesfac.com

CIENCIA Y PODER AÉREO

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

ISSN 1909-7050 E-ISSN 2389-9468



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

Escuela de Postgrados Fuerza Aérea Colombiana

Director | Director | Diretor
TC. Ciro Alberto Duarte Jaimes

Comandante Grupo Académico
TC. Rodrigo Mezú Mina

Comandante Escuadrón de Investigación
MY. German Wedge Rodríguez Pirateque



Revista Ciencia y Poder Aéreo

Ciencia y Poder Aéreo Journal
Revista Ciência e Poder Aéreo

Director | Director | Diretor

MY. German Wedge Rodríguez Pirateque

Editora | Editor | Editor

Mg. Erika Juliana Estrada Villa

Editora Adjunta | Assistant Editor | Associative editor

TE. Lady Johanna Carvajal Parra

Equipo editorial | Editorial team | Equipe editorial

Coordinación editorial | Editorial coordination | Coordenação editorial

Juan David Ardila Suárez

Asistencia editorial | Editorial assistance | Assistência editorial

Deisy Carolina Gutiérrez Rozo

Corrección de texto | Copyediting | Revisor de textos

Español: Angie Sánchez Wilchez, Lina María Orjuela, Jerson Vásquez Rivera

Inglés: Leonardo Andrés Paipilla Pardo

Portugués: Andrea Ripoll Ahumada

Traducción de contenidos | Content translation | Tradução de conteúdo

Inglés: Leonardo Andrés Paipilla Pardo

Portugués: Andrea Ripoll Ahumada

Diseño y maquetación | Desing and layout | Design e layout

Angélica Ramos Vargas

Corrección de sintaxis | Proofreading | Revisor de textos

Angie Sánchez Wilchez, Lina María Orjuela, Jerson Vásquez Rivera

Información técnica | Technical Information | Informações técnicas

Volumen 16, n.º 1 | Enero-junio del 2021

Periodicidad semestral

ISSN 1909-7050

E-ISSN 2389-9468

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

Bogotá, Colombia 2021

Comité editorial | Editorial Board | Comitê editorial

Cesar Nieto Londoño

Ph. D. en Ingeniería

Universidad Pontificia Bolivariana

Juan Pablo Casas Rodríguez

Ph. D. in Mechanical and Manufacturing Engineering

Director de Ingeniería Mecánica

Universidad de los Andes, Colombia

José M. García-Bravo

Ph. D. in Engineering, Fluid Power Specialization

M. Sc in Engineering, MA in Teaching of Spanish

Purdue University, EE. UU.

Julián Sierra Pérez

Ph. D. en Ingeniería Aeroespacial

Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia

Jesús Alfredo Guemes Gordo

Doctorado en Ingeniería Aeronáutica

Universidad Politécnica de Madrid, España

Comité científico | Scientific Board | Comitê científico

Cristina Cuerno Rejado

Doctorado en Ingeniería Aeronáutica

Universidad Politécnica de Madrid, España

Javier Alberto Pérez-Castán

Ph. D. in Aeronautical Engineering

Universidad Politécnica de Madrid, España

Hernán Paz Penagos

Ph. D. en Educación

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Colombia

Héctor Enrique Jaramillo Suárez

Ph. D. en Ingeniería, Mecánica de Sólidos

Universidad Autónoma de Occidente, Colombia

Jerónimo Ríos Sierra

Ph. D. en Ciencias Políticas

Universidad Complutense de Madrid, España

Zakia Shiraz

Ph. D. en Política y Estudios Internacionales

University of Leicester, Reino Unido

Colaboradores | Contributors | Colaboradores

Ph. D. Bruno de Melo Oliveira

Universidade da Força Aérea UNIFA, Brasil

Ph. D. Zakia Shiraz

University of Leicester, Reino Unido

Ph. D. Alex Jiménez Vélez

Centro de Investigación FAE

© Créditos fotografías cubiertas / separatas

Revista Aeronáutica

Fuerza Aérea Colombiana

Pares académicos | Academic Peers | Pares académicos

Lilia Edith Aparicio Niño

Ph. D. en Ciencias Técnicas

Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

Cristián Cofré Bolados

Ph. D. en Ciencias del Ejercito

Universidad de Santiago de Chile, Chile

Hernán Dario Cerón Muñoz

Ph. D. en Ingeniería Mecánica

Universidade de São Paulo, Brasil

Juan Ignacio D'lorio

Profesor de Ingeniería

Universidad Nacional de la Plata, Argentina

Andrés Calvillo Téllez

Ph. D. en Ciencias de la Educación

Instituto Politécnico Nacional, México

Pedro David Bravo-Mosquera

Ph. D. en Ingeniería

University of São Paulo, Brasil

Rubén Javier Medina Daza

Ph. D. en Informática con énfasis en Sistemas de Información Geográfica

Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

Leonardo Enrique Solaque Guzmán

Ph. D. en Ingeniería

Universidad Militar Nueva Granada, Colombia

Adalberto Escobar Castillo

Ph. D. en Contabilidad y Finanzas Corporativas

Universidad de la Costa, Colombia

Luisa Fernanda Mónico Muñoz

Ph. D. en Sistemas Propulsivos en Medios de Transporte

Fundación Universitaria los Libertadores, Colombia

Francisco Javier Valencia Duque

Ph. D. en Ingeniería, Industria y Organizaciones

Universidad Nacional de Colombia, Colombia

Julio Rangel Vellojín

Magíster en Gestión de la Tecnología Educativa

Universidad de Córdoba, Colombia

Lisbeth Katherine Duarte Herrera

Magíster en Ciencias Sociales con Especialidad en Desarrollo

Institución universitaria ESUMER, Colombia

Rodolfo Rodríguez Baracaldo

Ph. D. en Ciencia de Materiales

Universidad Nacional de Colombia, Colombia

Gonzalo Guillermo Moreno Contreras

Ph. D. en Ingeniería Mecánica

Universidad de Pamplona, Colombia

German Leonardo García Monsalve

Ph. D. en Ingeniería

Universidad Nacional de Colombia, Colombia

Seyka Verónica Sandoval Cabrera

Ph. D. en Economía

Universidad Autónoma de México, México

Andrés Eduardo Fernández Osorio

Ph. D. en Derecho y Ciencias Políticas

Escuela Militar de Cadetes "General José María Córdova", Colombia

Juan Camilo Mesa Bedoya

Ph. D. en Relaciones Internacionales

Institución Universitaria ESUMER, Colombia

Para suscripciones o canjes, diríjase a:

Revista Ciencia y Poder Aéreo

Ciencia y Poder Aéreo Journal | Revista Ciência e Poder Aéreo

✉ cienciaypoderareero@epfac.edu.co

(057-1) 620 6518 Ext. 1700, 1715, 1722, 1730

Biblioteca Escuela de Postgrados Fuerza Aérea Colombiana

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

(057-1) 620 6518. Ext. 1700, 1715, 1722, 1730

www.publicacionesfac.com

Contenido

Tecnología e Innovación

- 6-17 **Evolución orbital del satélite FACSAT-1 y estimación de su tiempo de reentrada**
Orbital Evolution of the FACSAT-1 Satellite and Estimation of its Re-entry Time
Evolução orbital do satélite FACSAT-1 e estimativa do seu tempo de reentrada
José Gregorio Portilla Barbosa, Jhonathan Orlando Murcia Piñeros
- 18-38 **Estudio de la resistencia a la tracción de depósitos de soldadura de la aleación AA2024-T3**
Study of Weld Deposits Tensile Strength in the AA2024-T3 Alloy
Estudo da resistência à tração dos reservatórios da liga de soldagem AA2024-T3
David Alberto Ramírez Vargas, Andrés Fernando Gil Plazas, Liz Karen Herrera Quintero
- 39-54 **Conectividad de Internet en Colombia y su relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (2015-2020)**
Internet Access in Colombia and its Relationship with the Sustainable Development Goals (2015-2020)
Conectividade da Internet na Colômbia e sua relação com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (2015-2020)
Jenny Paola Cervera Quintero
- 55-74 **Diseño de aeronave de combate no tripulada de quinta generación para el apoyo aéreo cercano**
Design of a Fifth Generation Unmanned Fighter Aircraft for Close Air Support
Projeto de aeronave de combate não tripulada de quinta geração para apoio aéreo próximo
Esteban Morales Aguirre, Mateo Duarte García, Esteban Paniagua García, Daniel Enrique Aldana Lopera, Javier Mauricio Sabogal Jaramillo, Jorge Elias Montoya Vélez, Juan Pablo Alvarado Perilla
- 75-86 **Picosatélite diseñado para medir concentración de gases de efecto invernadero y registrar imágenes en vuelo**
Picosatellite for Measuring Greenhouse Gas Concentrations and Recording Images during Flight
Picosatélite projetado para medir a concentração de gases do efeito estufa e registrar imagens em voo
Juan David Osorio Henao, Johan Jabrini Botina Monsalve, David Andrés Díaz Álvarez, Melissa Galeano Ruiz, Juan Pablo Higuíta Echavarría, Luis Felipe Burbano Mosquera

Gestión y Estrategia

87-101

Fuerza Aérea Colombiana: motor propulsor hacia el espacio ultraterrestre del país hacia un triple desarrollo

Colombian Air Force: Powering the Country Toward Outer Space within a Triple Development Approach

Força Aérea Colombiana: motor propulsor para o espaço exterior do país em direção a um triplo desenvolvimento

David Barrero Barrero

102-115

La frontera Colombia-Perú vista a través de la Operación de Apoyo al Desarrollo Binacional

The Colombia-Peru Border through the Binational Development Support Operation

Fronteira Colômbia-Peru vista através da Operação de Apoio ao Desenvolvimento Binacional

David González-Cuenca, Héctor Mauricio Cano Rodríguez

116-138

Desarrollo de una metodología para la gerencia de proyectos del sector aeroespacial en Colombia

Development of a Project Management Methodology for the Colombian Aerospace Sector

Desenvolvimento de uma metodologia para a gerência de projetos do setor aeroespacial na Colômbia

Giovanna Estefanía Ramírez-Ruiz, Daniel Leandro Cárdenas-Sabogal, Miguel Ángel García-Molina

Seguridad Operacional y Logística Aeronáutica

139-148

Estudio transversal: pérdida auditiva causada por ruido en el personal de la aviación militar ecuatoriana

Cross-sectional Study: Noise-induced Hearing Loss in Ecuadorian Military Aviation Personnel

Estudo transversal: perda auditiva causada por ruído no pessoal da aviação militar equatoriana

Álvaro Guillermo Ortiz Rodríguez

149-157

Rehabituación vestibular en la silla de Barany para el manejo de la aerocinetosis

Vestibular Adaptation in the Barany Chair for Handling Motion Sickness

Reabilitação vestibular na cadeira de Barany para o manejo da aerocinetose

María Alejandra Correa Guarín, Sonia Lucía Jaimes Gómez, Claudia Marcela Mozo Madariaga

159-170

Instrucciones para autores | Guidelines for Authors | Diretrizes para autores

Evolución orbital del satélite FACSAT-1 y estimación de su tiempo de reentrada

| Fecha de recibido: 3 de marzo del 2021 | Fecha de aprobación: 10 de abril del 2021 |

José Gregorio Portilla Barbosa

Doctorado en Física Teórica
Universidad Nacional de Colombia
Colombia
Grupo de Investigación: Astronomía,
astrofísica y cosmología
Rol de investigador: teórico y escritura
<https://orcid.org/0000-0002-4649-5972>
✉ jgportillab@unal.edu.co

Jhonathan Orlando Murcia Piñeros

Doctorado en Ingeniería y Tecnología Espacial
Instituto Nacional de Investigaciones
Espaciales del Brasil
Brasil
Grupo de Investigación: Grupo
matemática pura y aplicada
Rol de investigador: teórico y escritura
<https://orcid.org/0000-0002-7013-6515>
✉ jhonathan.pineros@unifesp.br

Para citar este artículo: Portilla-Barbosa, J., & Murcia-Piñeros, J. (2021). Evolución orbital del satélite FACSAT-1 y estimación de su tiempo de reentrada. *Ciencia y Poder Aéreo*, 16(1), 6-17. <https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaaereo.694>



Evolución orbital del satélite FACSAT-1 y estimación de su tiempo de reentrada

Orbital Evolution of the FACSAT-1 Satellite and Estimation of its Re-entry Time

Evolução orbital do satélite FACSAT-1 e estimativa do seu tempo de reentrada

Resumen: El presente trabajo tiene como propósito exponer algunos datos relacionados con la puesta en órbita del satélite FACSAT-1 —primer satélite perteneciente a una institución gubernamental colombiana—, así como estimar la tasa de decaimiento en sus primeros dos años de funcionamiento. Para ello se utilizaron datos de los elementos orbitales desde su puesta en órbita (finales de noviembre del 2018) hasta finales del 2020. Se evidenciaron dos etapas de decaimiento bien diferenciadas: la primera, de 8 m/d y, la segunda —desde finales de septiembre del 2020— de 18 m/d, esto último a causa de un aumento de la actividad solar que se aprecia en el flujo de la emisión solar en 2,8 GHz. También se muestran los resultados de la utilización de un propagador de alta fidelidad que permite modelar la evolución de los elementos orbitales en los próximos años, lo que no solo permitió estimar el reingreso del satélite FACSAT-1 para el primer semestre del 2030, sino también observar el comportamiento de los elementos orbitales en los próximos nueve años.

Palabras clave: CubeSat; decaimiento orbital; órbita terrestre baja; propagación orbital; resistencia atmosférica

Abstract: This work presents data related to the launch of the FACSAT-1 satellite into orbit —the first property of a Colombian government institution— and the estimates on its decay rate during the first two years of operation. For this purpose, we used data of the orbital elements from the date of its launching (late November 2018) until the end of 2020. Two well-differentiated decay stages were observed: 8 m/d and 18 m/d (from late September 2020); the latter due to increased solar activity by a rise of 2.8 GHz in the solar emission flux. This work also reports the results obtained after the implementation of a high-fidelity propagator, which allows modeling the evolution of orbital elements in the upcoming years. Said modeling also made it possible to estimate the re-entry of the FACSAT-1 satellite for the first half of 2030 and predict the behavior of orbital elements in the next nine years.

Keywords: CubeSat; orbital decay; low earth orbit; orbital propagation; atmospheric resistance.

Resumo: O presente trabalho tem como finalidade expor alguns dados relacionados à colocação em órbita do satélite FACSAT-1 - primeiro satélite pertencente a uma instituição governamental colombiana-, bem como fazer uma estimativa da taxa de decaimento em seus primeiros dois anos de funcionamento. Para isso, foram utilizados dados de elementos orbitais desde a sua colocação em órbita (final de novembro de 2018) até o final de 2020. Evidenciaram-se duas etapas de decaimento bem diferenciadas: a primeira, de 8 m/d e, a segunda, desde o final de setembro de 2020, de 18 m/d, o que se deve a um aumento da atividade solar que se observa no fluxo da emissão solar em 2,8 GHz. Também são apresentados os resultados da utilização de um propagador de alta fidelidade que permite modelar a evolução dos elementos orbitais nos próximos anos, o que não só permitiu estimar a reentrada do satélite FACSAT-1 para o primeiro semestre de 2030, mas também observar o comportamento dos elementos orbitais nos próximos nove anos.

Palavras-chave: CubeSat; decaimento orbital; órbita terrestre baixa; propagação orbital; resistência atmosférica

A más de seis décadas del inicio de la era del espacio por parte de la Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas (URSS), cuando puso en órbita terrestre el primer satélite artificial, Sputnik-I —una esfera con un diámetro inferior a 60 cm—, Colombia es poco lo que ha tenido que mostrar en la incursión de este tipo de tecnologías de frontera, y en desarrollo tecnológico en general. Solo hasta el 2007 se desarrolló el primer proyecto en el país, el pico-satélite Libertad-1, lanzado desde el cosmódromo de Baikonur en Kazajistán (Portilla, 2012), un pequeño cubo de aproximadamente 10 cm de lado (CubeSat de 1 unidad), financiado y adaptado por la Universidad Sergio Arboleda. Desde entonces, se ha dicho que esta universidad planea poner un segundo satélite llamado Libertad-2, pero hasta el presente esto no ha ocurrido.

En todo caso, proyectos como el Libertad-1 y otros muchos que se han verificado en otras partes del planeta, se han concretado gracias a los avances en la miniaturización de la electrónica y la amplia oferta de vehículos lanzadores —a causa de la privatización del sector espacial que comenzó a finales de la década de los 80—, lo que les permite ser desarrollados a un bajo costo si se comparan con el desarrollo tradicional de grandes satélites (Fernholz, 2018). Con esta apertura de la industria espacial, incluso los colegios de secundaria de los países en vías de desarrollo pueden ensamblar sus propios satélites y cargas útiles para sus proyectos de ciencias estudiantiles, tal y como es el caso del pico-satélite brasilero Tancredo-1 (Tikami *et al.*, 2017).

Los denominados CubeSats son satélites minúsculos de apenas unos cuantos kilogramos de peso, por lo que son clasificados dentro de los nanosatélites debido a su escasa masa (Stakem, 2020). Dichos CubeSats han permitido que naciones con poca trayectoria en el desarrollo aeroespacial tales como Colombia y Ecuador, accedan de algún modo a este tipo de tecnologías aun cuando su intervención en el diseño y construcción de algunos de sus componentes sea nula o, en el mejor de los casos, marginal. Inicialmente, la forma como llegaban a órbita los CubeSats era casi de “aventón” por su tamaño, lo que reducía formidablemente los costos del uso del cohete (Woellert *et al.*, 2011). En la actualidad, los vehículos lanzadores al igual que los

satélites han sido reducidos en tamaño, costos y tiempo de producción garantizando lanzamientos dedicados para este tipo de satélites.

Al observar la evolución de los proyectos de CubeSats, se identifican dos periodos importantes en el desarrollo de esta tecnología: el primero se extiende desde 1998 hasta el 2011 y comprende una etapa en la que la academia dominó por entero el desarrollo; el segundo, inicia en el 2012 y se extiende hasta el presente, y se caracteriza por el surgimiento y dominio de las aplicaciones comerciales a gran escala (Kulu, 2021; Bryce, 2020). En la primera etapa, las instituciones comenzaron a adaptar esta tecnología para proyectos espaciales de bajo costo, se capacitó a los estudiantes de pregrado, se adquirió la experiencia (*know-how*), se desarrollaron misiones de demostración tecnológica, y se obtuvo una madurez satisfactoria de diversos componentes y subsistemas con fines comerciales. Es en ese periodo que entró a operar el proyecto del satélite Libertad-1, una época muy favorable para lanzar este tipo de tecnología (ciclo de sobreexpectación).

Gracias al trabajo del grupo de profesionales que desarrolló el Libertad-1 y a su visión, el proyecto es visto como un referente en la región al ser pionero y, por ende, servir de inspiración para otros proyectos de pequeños satélites en los países vecinos; además, divulgó las tecnologías espaciales dentro del medio, adaptó las metodologías de ingeniería de sistemas espaciales y capacitó a los primeros profesionales en el país. Finalmente, originó un espacio para la incubación de la empresa Sequoia Space, la primera en el país dedicada al desarrollo de satélites.

Para finales del 2018, el satélite FACSAT-1 se constituyó en el segundo satélite artificial puesto en órbita por iniciativa de una institución colombiana, y el primero por parte de un organismo gubernamental, específicamente la Fuerza Aérea Colombiana (FAC). Ello lo ubica en el segundo periodo de desarrollo de los CubeSats —ya mencionado— y en el que se generan los primeros productos comerciales por parte de empresas privadas.

El FACSAT-1 fue construido en asociación con la empresa danesa GOMspace. Se puso en órbita conjuntamente con otros numerosos satélites a finales de

noviembre del 2018, por medio de un cohete Polar Satellite Launch Vehicle (PSLV) de fabricación india. El satélite propiamente dicho es un CubeSat 3U (compuesto de tres unidades) cuyo peso es del orden de 4 kg y con una vida útil proyectada de cinco años (León-Lozada, 2018). De acuerdo con sus gestores, el objetivo principal de la misión consiste en la toma de fotografías de la superficie terrestre con una resolución de 30 m, de modo que se pueda ir consolidando una “autonomía” de país en el proceso de poseer conocimiento casi en tiempo real de la situación del territorio colombiano y de otros lugares de la superficie terrestre que merezcan el interés de la nación.

Como es apenas claro, tratándose de un país como Colombia, notablemente atrasado en este tipo de tecnologías, se persigue también con la construcción, seguimiento y control del FACSAT-1, una consolidación de procesos de transferencia tecnológica que involucre a varios actores de la FAC en un proceso continuado de asimilación técnica que permita cimentar en un futuro próximo iniciativas espaciales auspiciadas por la nación.

Es evidente que las recientes investigaciones en tecnología espacial y la puesta en operación del satélite FACSAT-1, son una muestra del interés de las instituciones y profesionales del país por acceder y hacer uso de las aplicaciones espaciales, tales como la recepción de datos para monitoreo de recursos naturales, valoración de desastres naturales, vigilancia del territorio nacional y un largo etcétera, así como la capacitación de profesionales en desarrollo y operaciones de nano-satélites. Como consecuencia del éxito del FACSAT-1 y de incentivar de algún modo la participación del sector privado nacional en asuntos aeroespaciales, a inicios del 2020 salió a la luz el Documento Conpes 3983^[1] y se obtuvo la financiación tanto de los proyectos FACSAT-2 (Centro de Investigación en Tecnologías Aeroespaciales [CITAE], 2020) como del montaje de una estación de comunicaciones en la Antártida (Departamento Estratégico de Comunicaciones [DEC],

2020). Puesto que Colombia es un país “novato” en asuntos espaciales, con deficiencias en su entramado industrial y que adolece de un fuerte rezago en investigación científica de base, se espera que la visión a mediano y largo plazo con tales iniciativas sea fortalecer el desarrollo de una industria nacional que incluya una gran inversión de riesgo en las instituciones para fomentar y financiar proyectos de desarrollo de tecnología espacial, capacitar personal, impulsar la creación de empresas de base tecnológica, identificar los potenciales clientes y usuarios de esta tecnología, los productos derivados y, la comercialización de los mismos a nivel nacional e internacional; es decir, apremiar la adquisición de conocimientos y experiencia para estar a la par, al menos, de países que han acelerado su desarrollo en materia espacial en la última década, como por ejemplo Dinamarca, Luxemburgo, Nueva Zelanda y Australia.

En ese marco, es importante socializar y poner en relevancia lo que se ha avanzado en materia de la puesta de satélites artificiales fomentados por la nación y examinar los elementos de su evolución orbital, que ayuden a familiarizar y poner en contexto a todos aquellos interesados en aspectos puntuales de dinámica satelital, como uno de los muchos aspectos a tener en cuenta para que el país vaya asimilando y apropiando este tipo de estudios.

Aunado a lo anterior —y como se espera que los satélites puestos en órbita por parte de instituciones privadas o gubernamentales colombianas sigan siendo del estándar CubeSat u otros tipos de satélites pequeños—, se hace necesario conocer el comportamiento orbital de estos objetos, ya que al final de sus vidas útiles pasarán a engrosar el listado de objetos que conforman la basura espacial, temática importante de actualidad, debido al gran incremento del número de pequeños satélites en Low Earth Orbit (órbita baja terrestre) (LEO por sus siglas en inglés) experimentado en los últimos años, tales como el establecimiento de la constelación Dove para observación terrestre (Safyan, 2020), la constelación Starlink para llevar Internet a sitios remotos del planeta (Giuliari *et al.*, 2020) y el riesgo que ello puede implicar, por la posibilidad de colisiones cada vez más alta que puede poner en

1 “Política de desarrollo espacial: condiciones habilitantes para el impulso de la competitividad nacional”.

peligro la continuidad del entramado satelital y las operaciones orbitales tripuladas (Reiland *et al.*, 2020).

Debido a esto, la estimación de tiempos de reentrada es un dato deseable en el estudio de la población de satélites en LEO. Infortunadamente tal predicción no es una tarea sencilla, a causa de las numerosas fuentes de incertidumbre que conlleva a que, después de décadas de investigación, aún se sigan presentando errores relativos cercanos al 20 % (Pardini & Anselmo, 2013). Entre las variables que hacen difícil una predicción acertada de los tiempos de reentrada están los datos de rastreo inexactos y dispersos, formas complejas de los objetos, inexactitudes en los valores de la densidad atmosférica a las altitudes de interés, errores de predicción de actividad solar y geomagnética, modelamiento incorrecto de los coeficientes de resistencia, etcétera (Choi *et al.*, 2017). Esto es, demasiadas incertidumbres que complican un cálculo acertado.

El objetivo del presente artículo es estudiar la evolución orbital del satélite FACSAT-1 durante los poco más de dos años que ha estado ubicado en órbita terrestre, suministrar información más técnica tanto de sus parámetros orbitales como de sus condiciones de puesta en órbita, datos que no han sido lo suficientemente disseminados por sus gestores, y que, sin embargo, son importantes para la conformación de una memoria histórica sobre las primeras iniciativas espaciales de la nación. Así mismo, se presentan estimaciones del tiempo en que el satélite continuará en órbita antes de que reingrese y se destruya en las capas altas de la atmósfera terrestre.

Método

En primera instancia se describe la puesta en órbita del satélite FACSAT-1, para luego comentar el tipo de órbita en la que quedó. Después, con ayuda de los elementos de dos líneas reportados para el satélite se halla su tasa de decaimiento experimentada en sus dos primeros años. A partir de esos mismos elementos y con ayuda de un código escrito en Fortran —un propagador de alta fidelidad— se modelará la evolución de los

elementos orbitales en los próximos años, y así, se podrá estimar un posible tiempo de reingreso del satélite.

En la mañana del jueves 29 de noviembre del 2018 a las 9 h, 57 min, 30 s, hora local de la India (4 h, 27 min, 30 s, τ U; 23 h, 27 min, 30 s, del miércoles 28, hora de Colombia), despegó un cohete PSLV portando al FACSAT-1 conjuntamente con otros 30 satélites (Clark, 2018), que en total sumaban una carga útil de 641 kg. El hecho se realizó desde el centro de lanzamiento Satish Dhawan ubicado en la isla Sriharikota ($\phi=13^{\circ}43'11.8''$ N, $\lambda=80^{\circ}13'49.5''$ Este), conocido comúnmente como SHAR y situado en la costa este de la India.

Como ya se dijo, el vehículo de lanzamiento fue un cohete PSLV (vehículo lanzador de satélites polares). El cohete, de 44 metros de altura y cerca de 320 toneladas de peso, está conformado por cuatro etapas: la primera y la tercera son de combustible sólido; las restantes de combustible líquido. El PSLV goza de buenos palmares, ya que desde su primer intento de lanzamiento a finales de 1993 y hasta noviembre del 2020, ha realizado 51 vuelos, 49 de ellos exitosos.

Continuando con el lanzamiento del FACSAT-1, el cohete después de su despegue tomó dirección sures-te. Menos de dos minutos después entró en operación la segunda etapa que duró en funcionamiento otros dos minutos y medio. En este proceso el cohete ajustó su curso y tomó dirección sur, para evitar el sobrevuelo en la isla de Sri Lanka. Finalmente, la tercera y cuarta etapa se encargarían de dotar la velocidad suficiente para poner en órbita a la carga útil principal del cohete: el satélite HySIS (satélite de imagen hiperespectral, por sus siglas en inglés). De tamaño y masa relativamente modesto (no excede las 0,4 toneladas), este satélite de construcción india —con la habilidad de realizar observaciones de la Tierra en varias regiones del espectro electromagnético—, fue puesto en una órbita heliosincrónica² con inclinación de $97,96^{\circ}$ a una altura promedio cercana a los 636 km sobre la superficie terrestre (EoPortal Directory, 2018). Quedó

² Un tipo de trayectoria cuasi polar de baja altura cuyo plano orbital se desplaza a la misma tasa de movimiento y en la misma dirección del Sol visto desde la Tierra, esto es, de $0,98^{\circ}/d$.

registrado con el número 43.719 dentro de la catalogación del North American Aerospace Defense Command (Norad) o Comando de Defensa Aeroespacial de Norteamérica, al igual que como primera pieza (A) del lanzamiento 96 realizado en el transcurso del 2018.

Posterior a la colocación de la carga principal de la misión, la última etapa del PSLV procedió a reencender sus motores, pero ahora con el propósito de disminuir la altura (en unos 150 km) e iniciar la liberación de los satélites restantes pensados para orbitar la Tierra a alturas menores, de modo que, al final de sus vidas útiles, la atmósfera no tarde mucho en el proceso de decaimiento de la altura y la consiguiente reentrada y destrucción de estos (Madi & Sokolova, 2021). Fueron 30 satélites, la mayoría CubeSats, la mitad de los cuales pasaron a engrosar la red Dove de la empresa Planet, así como satélites pequeños de varias empresas estadounidenses, canadienses, así como de Países Bajos, Finlandia, Australia, España y Colombia.

El FACSAT-1 quedó registrado como la tercera pieza (C) en quedar en órbita de ese lanzamiento con el número 43.721 de la catalogación del Norad. En la tabla 1 se muestra el primer conjunto de elementos orbitales³ que registra Celestrak.

Tabla 1
Primer conjunto de elementos orbitales del satélite FACSAT-1

Ascensión recta del nodo ascendente	38.6324°
Argumento de latitud del perigeo	313.6880°
Inclinación	97.4864°
Excentricidad	0.0015676
Anomalía media	161.6758°
Semieje mayor (km)	6863.789
Altura del perigeo (km)	474.9
Altura del apogeo (km)	496.4
Periodo orbital (horas)	1.57305

Nota. Correspondientes al instante de tiempo 29 de noviembre del 2018 a las 15 h, 24 min, 7 s de TU, esto es, unas 11 horas después de su puesta en órbita.

Fuente: Celestrak.

3 Los elementos orbitales de un objeto son valores numéricos que permiten conocer la forma y la orientación de la órbita en el espacio, así como el conocimiento de los vectores posición y velocidad para un instante de tiempo en particular.

De acuerdo con las condiciones de inserción orbital, el FACSAT-1 —y los otros satélites compañeros— quedaron en órbitas que permiten desplazar la línea de los nodos en dirección antihoraria —vista desde el polo norte celeste—, con un incremento diario cercano a la tasa de movimiento aparente del Sol visto desde la Tierra, lo que permite que el satélite sobrevuele siempre el sitio de interés con las mismas condiciones de iluminación solar. En otros términos, en órbitas heliosincrónicas.

Teniendo en cuenta que la tasa de desplazamiento del nodo ascendente ($\Delta\Omega$) causada por el achatamiento terrestre está dada por,
$$\Delta\Omega = - \frac{3 \left(\frac{180}{\pi}\right) \sqrt{GM} J_2 R^2 \cos i}{2a^2(1-e^2)^2}$$
, en unidades de grados por día, donde G es la constante de Gravitación o de Cavendish ($6,67428 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$), M la masa de la Tierra ($5,9722 \times 10^{24} \text{ kg}$), J_2 el armónico zonal terrestre (0,001083), i la inclinación orbital con respecto al Ecuador, R el radio terrestre (6.378,14 km), a el semieje mayor y e la excentricidad (Portilla, 2018). Para el FACSAT-1, utilizando los datos de la tabla 1, se tiene un valor igual a $\Delta\Omega = 1,0045^\circ/\text{d}$. Este valor es ligeramente superior al valor ideal ($0,985^\circ/\text{d}$), pero lo suficientemente cercano a él como para lograr su cometido.

El FACSAT-1 quedó recién puesto en órbita en una trayectoria que le permite sobrevolar el sector occidental del país (en dirección norte a sur), principalmente sobre los litorales Atlántico y Pacífico, lo que se verifica poco después de las 10:00 a. m. hora legal colombiana.

El tiempo que tarda el satélite en pasar casi exactamente por la misma región geográfica, se puede estimar de la siguiente forma: puesto que el planeta Tierra se desplaza gracias a su movimiento de rotación de oeste a este, por cada órbita descrita el satélite se desplaza en un ángulo en dirección hacia el oeste con relación a un observador situado en la superficie de la Tierra. Dicho ángulo se puede calcular a través de $\Delta\psi = -360^\circ (T/Tt)$, donde T es el periodo de traslación del satélite en días solares medios y Tt es el periodo de rotación sideral de la Tierra (0,99727 en unidades de día solar medio) (Portilla, 2009).

En este caso: $T = 1,57305/24 = 0,0655$. De ese modo: $\Delta\psi = -23,65^\circ$.

La condición de paso sucesivo por el mismo punto de la superficie terrestre está dada evidentemente por $n|\Delta\psi| = m360^\circ$, en donde n y m representan dos números enteros. En el caso que nos ocupa tendremos entonces que: $n/m = 15,22$. Este número es casi igual a la frecuencia del satélite, esto es, el número de revoluciones que hace en un día, ya que $1/0,0655 = 15,26$. Y Puesto que $n/m = 15,22 \approx 61/4$, lo que significa que para realizar un paso sucesivo por el mismo punto de la superficie de la Tierra se deben completar 61 revoluciones del satélite, lo cual es posible al cabo de transcurridos cuatro días.

De este modo, el FACSAT-1 pasa aproximadamente sobre el mismo territorio de interés cada cuatro días. En el caso de la toma de fotografías sobre el territorio colombiano, el paso de norte a sur del satélite es el que se ha de utilizar para ello, por la obvia condición de contar con luz solar, pues existe otro paso del satélite en dirección sur a norte —casi sobre la misma región señalada—, pero que se verifica poco después de las 10:00 p.m. hora legal colombiana.

Resultados

En la figura 1 se observa la evolución de la altura promedio sobre la superficie terrestre en función del tiempo tanto del FACSAT-1 como de algunos de sus compañeros que fueron puestos en órbita casi de forma simultánea. Para la realización de esa gráfica se utilizaron los Two Line Elements (TLE) (elementos de dos líneas) y la forma estándar como el Norad que expresa los elementos orbitales de los objetos que se encuentran en órbita. Entre esos compañeros se han puesto los siguientes satélites que también son CubeSats: Hsat-1, Centauri-2 y el Flock 3R-9. El primero es el más masivo (13 kg), ya que se trata de un satélite integrado por 6U; los restantes están conformados por 3U, como el FACSAT-1, cuyas masas también oscilan entre 4 y 5 kg.

En el periodo estudiado —finales de noviembre del 2018 y finales de diciembre del 2020— se puede observar para los cuatros satélites dos tasas de decaimiento claramente definidas. La primera comprendida

entre el momento de su puesta en órbita y finales del mes de septiembre del 2020; la segunda, desde esta fecha hasta el último día del 2020, el límite de tiempo del presente estudio.

Este comportamiento está relacionado con un incremento de la actividad solar, iniciado a finales de septiembre del 2020, tal y como se puede observar en la figura 2, donde se ha puesto la variación del flujo solar en la longitud de onda de 10,7 cm, un conocido indicador directo de la actividad del Sol.

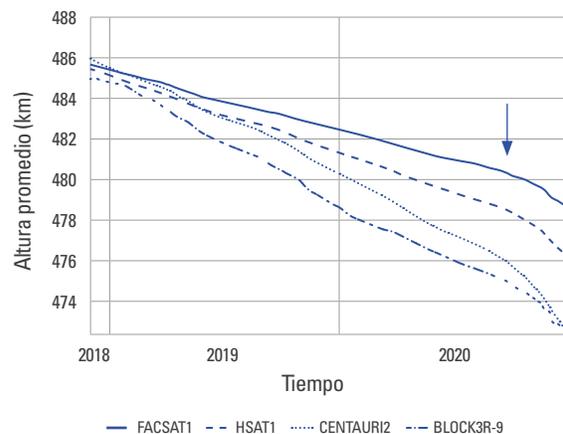


Figura 1. Decaimiento orbital del FACSAT-1 y varios satélites compañeros a lo largo de los primeros dos años en órbita

Nota. La flecha indicada señala el 27 de septiembre del 2020.

Fuente: elaboración propia.

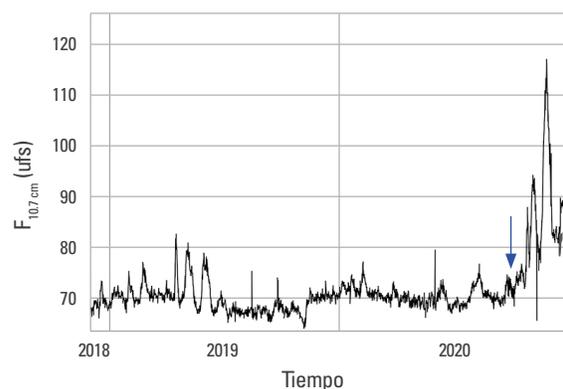


Figura 2. Variación del flujo del Sol observado en 10,7 cm (2.8 GHz) en unidades de flujo solar ($ufs = 10^{-22} \text{joules m}^{-2} \text{Hz}^{-1}$)

Nota. La flecha indicada señala el 27 de septiembre del 2020.

Fuente: elaboración propia con base en datos tomados del Laboratory for Atmospheric & Space Physics (LASP, 2017).

Entre su puesta en órbita y finales del mes de septiembre del 2020, el FACSAT-1 experimentó un decaimiento constante de su altura promedio de unos 8 metros por día; desde finales de septiembre, dicha caída pasó a ser del orden de unos 18 metros por día, lo que es un reflejo del aumento importante en el flujo de radiación proveniente del Sol que se ve traducido en una mayor resistencia de la atmósfera terrestre, lo cual acelera la tasa de decaimiento de los satélites en LEO.

En contraste, el satélite Hsat-1 tuvo una tasa de decaimiento mayor, de unos 15 metros por día en la primera etapa y de 36 metros diarios en la segunda. Lo anterior puede evidenciarse de la figura 1 y es el resultado de un área proyectada A significativamente mayor, debido a sus paneles solares aun cuando posee una masa m de 13 kg, que hace entonces que la relación A/m sea mayor, incrementado así su resistencia atmosférica, más que la que genera el FACSAT-1, y de ahí un decaimiento más pronunciado. En lo que sigue, se expondrá lo relacionado con la previsión de la reentrada atmosférica del satélite.

Desde la puesta en órbita del FACSAT-1 hasta el 1.º de febrero del 2021, se han generado más de 3.000 reportes de TLE, esenciales para el propósito de analizar la evolución de la órbita del satélite y estimar la fecha de su reentrada atmosférica. Al finalizar la vida útil de sus componentes, el satélite FACSAT-1 pasará a su estado no operacional y será considerado basura orbital, *Orbital Debris* (OD). Actualmente los OD son considerados elementos peligrosos para las operaciones espaciales porque incrementan la densidad de objetos en órbita, lo cual aumenta el riesgo de colisión con satélites operativos y restringe las operaciones en su posición orbital.

Otra aplicación de los reportes de TLE, es su uso en algoritmos para determinar el paso del satélite sobre las estaciones de rastreo y control, y las estaciones de comunicación para descarga de los datos de la carga útil. A futuro, estos mismos algoritmos de determinación orbital pueden servir como modelo para ser embarcados en los computadores a bordo de satélites para el sistema de determinación de órbita y control de actitud (Odacs), esencial en futuras misiones de constelaciones, vuelos en formación y experimentos

de direccionamiento de alta precisión (Wertz *et al.*, 2011; Kelecy *et al.*, 2007).

Para realizar el análisis de vida útil del satélite FACSAT-1 se usó el histórico de los TLE, pues al ser datos públicos son de fácil acceso. Sin embargo, es esencial complementar con datos de las estaciones de monitoreo (obtenidos por el operador del satélite) para mejorar la precisión de los algoritmos y de las predicciones. Hay que tener en cuenta que los TLE presentan errores generados por la baja precisión del modelo de perturbaciones, falta de información sobre la actitud del satélite, sus propiedades específicas: masa, materiales, dimensiones y, ruidos y *bias* de la señal, entre otros (Xu & Xiong, 2018; Levit & Marshall, 2011; Vallado & Cefola, 2012; Lee, 2002). Aun así, los datos obtenidos a partir de los TLE sirven para generar una predicción aceptable de la posición del satélite en los próximos tres días al último reporte de TLE, siempre y cuando se implementen en un modelo simplificado de perturbaciones tal como el SGP4^[4].

Una forma de mejorar la precisión de las predicciones, o estimación del estado, es a través de un propagador⁵ de alta fidelidad, tal como indica la norma ISO 27852:2016 (ISO, 2016). Este fue el método escogido para propagar los elementos orbitales del FACSAT-1 desde el momento de su inserción en órbita hasta su posible reentrada.

Los propagadores de alta fidelidad son sofisticados integradores numéricos para efectos de resolver las complicadas ecuaciones de movimiento; en ellos están incluidos las fuerzas ambientales que por periodos extendidos de tiempo afectan la trayectoria del satélite tales como el complejo campo gravitacional terrestre —modelado a través de una serie de armónicos esféricos— y la atmósfera terrestre, lo que requiere un modelo atmosférico que permita ante todo conocer la densidad del aire en función de la altura para efectos de encontrar la fuerza de resistencia que afecta

4 El SGP4 es un conocido modelo orbital analítico usado extensivamente para la predicción de órbitas de satélites, en particular, para aquellas en LEO.

5 En astrodinámica, la palabra “propagación” se utiliza para designar el proceso de usar las ecuaciones dinámicas fundamentales de movimiento conjuntamente con las fuerzas ambientales externas, para efectos de modelar el movimiento de un satélite por periodos extendidos de tiempo.

notablemente los satélites en LEO (Hintz, 2015). Dependiendo del sistema a estudiar, los propagadores bien pueden incluir, además la atracción gravitacional del sol y la luna, el efecto de la presión de radiación proveniente del sol y el que refleja la misma Tierra.

En particular, el propagador de alta fidelidad aquí utilizado incluyó un integrador numérico RKF-7/8, el modelo gravitacional terrestre EGM-08 con armónicos de orden 10x10 y el modelo atmosférico Nrlmsise-00 que incorporó los coeficientes geomagnéticos observados de los últimos cinco años y los estimados hasta el 2033 (Vallado, 2013). Así mismo, para el cálculo del coeficiente de arrastre se utilizó el método de los paneles en fluido enrarecido, obteniendo un coeficiente balístico medio de $0,1515 \text{ kg/m}^2$ (Piñeros *et al.*, 2021).

De las figuras 3 a la 7 se presentan los resultados de los elementos orbitales diarios, representados en color verde; los datos filtrados del histórico de los TLE están representados por los puntos de color negro y los ajustes de la órbita media calculada de los puntos propagados se presentan como líneas de color rojo. De la misma forma que los TLE contienen errores, es necesario que el propagador incluya datos de alta precisión en las condiciones iniciales, para disminuir la diferencia entre los datos estimados y los obtenidos de los TLE, también, para reducir el error de la propagación.

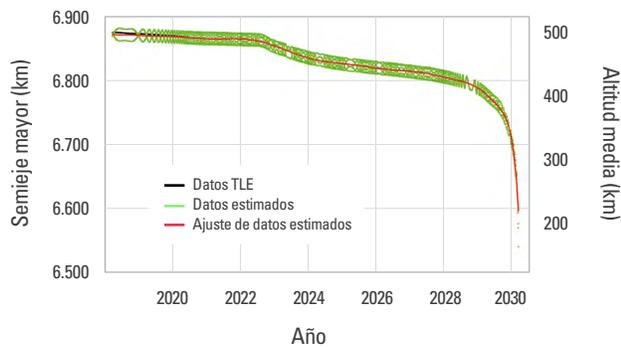


Figura 3. Evolución del semieje mayor y la altitud media en función del tiempo
Fuente: elaboración propia.

En la figura 3 se presentan los resultados de la evolución del semieje mayor y altitud media como función del tiempo. En el periodo desde noviembre del

2018 hasta febrero del 2021 se observa una buena correlación entre la órbita media calculada y los datos obtenidos de los TLE. Debido a la interacción con la atmósfera terrestre, se estima que el FACSAT-1 empezará un decaimiento rápido a partir del 2029, para reentrar en el primer semestre del 2030. Las ondulaciones observadas en los datos estimados son generadas por una combinación de los armónicos del modelo gravitacional en una inclinación y semieje mayor determinados.

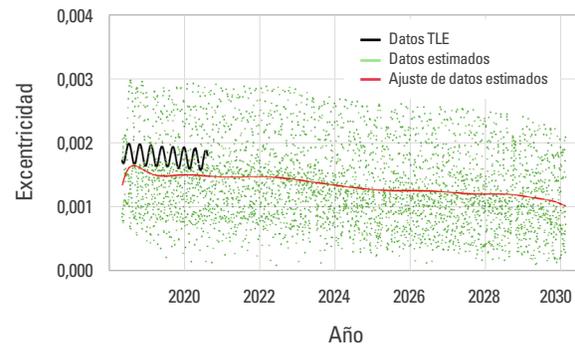


Figura 4. Evolución de la excentricidad en función del tiempo
Fuente: elaboración propia.

En la figura 4 se presentan los datos de la excentricidad. En este caso es evidente la diferencia entre el ajuste de los datos estimados con la información de los TLE. Esa diferencia se debe a la falta de precisión del orden de metros en los datos iniciales, que se propaga a lo largo de las estimaciones; no obstante, los resultados muestran el comportamiento esperado al reducir la excentricidad media por la caída del semieje mayor, es decir, el arrastre atmosférico tiende a circularizar la órbita.

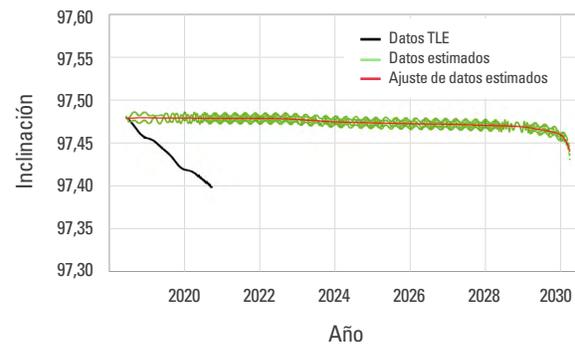


Figura 5. Evolución de la inclinación en función del tiempo
Fuente: elaboración propia.

En el caso de la inclinación (figura 5) se observa una diferencia significativa entre los datos de los TLE y los datos estimados. Esto se debe a que el elemento orbital es altamente perturbado por la dirección del fluido atmosférico, puesto que, al encontrarse en una órbita heliosincrónica, la dirección del satélite es básicamente perpendicular a la rotación de la atmósfera, lo que hace que el modelo utilizado tanto de vientos como atmosférico, no describa adecuadamente la interacción y, en consecuencia, el propagador genere algunas diferencias.

Como se explicó, el cambio de la ascensión recta del nodo ascendente es influenciado por la perturbación del achatamiento terrestre y, en este caso, los resultados simulados son muy cercanos a los datos obtenidos del histórico de TLE, mostrando el comportamiento esperado. El mismo comportamiento se observa con la evolución del argumento de latitud del perigeo (figuras 6 y 7).

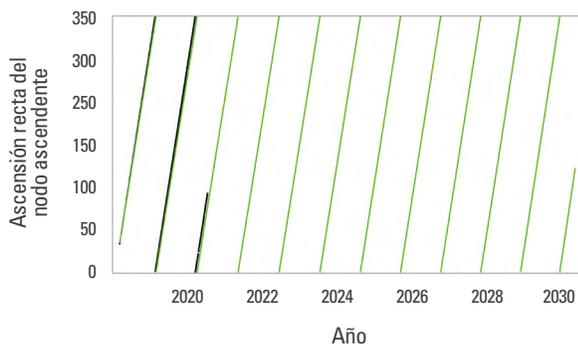


Figura 6. Evolución de la ascensión recta del nodo ascendente en función del tiempo

Fuente: elaboración propia.

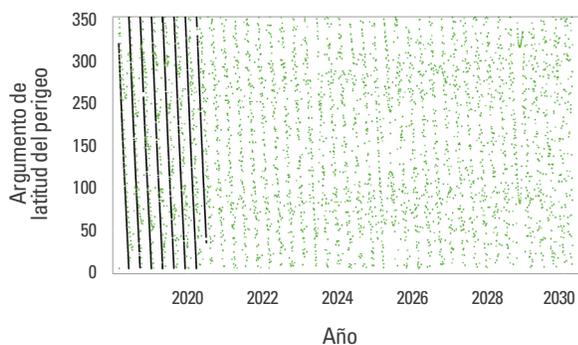


Figura 7. Evolución del argumento de latitud del perigeo en función del tiempo

Fuente: elaboración propia.

Conclusiones

El FACSAT-1 se constituyó en el primer satélite puesto en órbita por iniciativa de una institución gubernamental colombiana. Gracias a los procesos de miniaturización, estandarización y disminución de costos de puesta en órbita terrestre, naciones de escasos recursos como Colombia, pueden, a través de la contratación con empresas privadas del primer mundo, incursionar en este tipo de tecnologías y emprender así los primeros pasos en la adquisición de algún grado de independencia en el dominio de un campo que tiene cada vez más importancia económica, social, científica, cultural y política, como es el caso de las tecnologías aeroespaciales.

Sin embargo, el gran crecimiento en el número de pequeños satélites en LEO que se ha venido experimentado en los últimos años, trae como consecuencia un aumento no deseado de basura espacial, así como una posibilidad cada vez más creciente de colisiones, lo que pone en riesgo no solo la integridad de numerosos satélites funcionales, sino también las vidas de las personas en misiones tripuladas. De modo que los análisis de decaimiento orbital y la búsqueda de estrategias para disminuir la población de objetos una vez finalizan su vida útil, al igual que los estudios de predicción de reentrada, han venido cobrando especial relevancia.

El presente estudio tuvo como objeto la evolución orbital del satélite FACSAT-1 a lo largo de dos años desde su puesta en órbita. Con base en el registro de sus TLE se estableció la tasa de decaimiento orbital a causa del arrastre generado por la atmósfera. Desde su puesta en órbita hasta finales de septiembre del 2020 se observó una tasa de caída de 8 m/d en su altitud promedio; sin embargo, debido a un aumento importante de la actividad solar a partir de esa fecha, la tasa de caída se incrementó a 18 m/d en la altitud promedio.

Por otra parte, mediante la utilización de un propagador de alta fidelidad se realizó un estudio sobre la evolución orbital del FACSAT-1 para los años venideros, el cual permitió observar la evolución de los

elementos orbitales (semieje mayor, excentricidad, inclinación, ascensión recta del nodo ascendente y argumento de latitud del perigeo) y, permitió estimar una fecha probable de reingreso del satélite para el primer semestre del 2030.

En consecuencia, se espera que este tipo de estudios se consoliden dentro de la aún escasa comunidad astronáutica nacional, si hemos de tener presente el advenimiento en un futuro cercano de satélites como el Libertad-2 y el FACSAT-2, que se espera sean más versátiles, potentes y permitan con su desarrollo y puesta en órbita no solo una apropiación más adecuada y directa de este tipo de tecnologías, sino también mejorar el monitoreo del territorio colombiano (con los obvios beneficios en seguridad, prevención de desastres, minería, agricultura, catastro, etcétera) y sea posible disminuir el uso de los servicios de proveedores extranjeros.

Por último, es evidente que el desarrollo de este tipo de proyectos satelitales permite aumentar las capacidades tecnológicas del país y ayuda a identificar las dificultades internas y externas que tienen las instituciones para llevar a buen término los proyectos de esta naturaleza. Dado el contexto nacional y comparando su desarrollo tecnológico con el de países más avanzados, se recomienda el uso de estrategias que permitan identificar las necesidades claras de las empresas y el Gobierno para fomentar la inversión en este tipo de tecnologías, concientizar a los tomadores de decisiones sobre las ventajas de invertir en este tipo de proyectos para contribuir al desarrollo del país aun cuando hay que tener en cuenta que ellos constituyen inversiones de riesgo que demandan fuertes presupuestos, y cuyo desarrollo y resultado abarcan grandes extensiones de tiempo. Si bien la tecnología está avanzando aceleradamente, el proceso de desarrollo como nación debe ser necesariamente equivalente, o más rápido, para así disminuir la enorme brecha que se tiene con otros países, incluso del medio local.

Declaración de conflicto de interés: Los autores no manifiestan conflictos de interés institucionales ni personales.

Referencias

- Bryce. (2020). *Smallsats by the Numbers 2020*. Bryce space and technology. https://brycetechnology.com/reports/report-documents/Bryce_Smallsats_2020.pdf
- Centro de Investigación en Tecnologías Aeroespaciales. (2020, 9 de noviembre). *Desarrollo de segunda plataforma satelital: FACSAT-2*. Citea; Fuerza Aérea Colombiana. <http://www.fac.mil.co/inicia-desarrollo-de-segunda-plataforma-satelital-de-su-fuerza-aerea-colombiana-facsat-2>
- Choi, E. J., Cho, S., Lee, D., Kim, S., & Jo, J. H. (2017). A study on reentry predictions of uncontrolled space objects for space situational awareness. *Journal of Astronomy and Space Sciences*, 34(4), 289-302. <https://doi.org/10.5140/JASS.2017.34.4.289>
- Clark, S. (2018, 29 de noviembre). *Indian rocket launches 31 satellites*. Spaceflight Now. <http://spaceflightnow.com/2018/11/29/indian-rocket-launches-31-satellites/>
- Departamento Estratégico de Comunicaciones. (2020, 23 de enero). *IV campaña antártica de la Fuerza Aérea en su recta final*. DEC; Fuerza Aérea Colombiana. <http://www.fac.mil.co/iv-campa%C3%B1a-ant%C3%A1rtica-de-la-fuerza-a%C3%A9rea-en-su-recta-final>
- EoPortal Directory. (2018). *HySIS (HyperSpectral Imaging Satellite)*. EO Sharing Earth Observation Resources. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/h/hysis>
- Fernholz, T. (2018). *Rocket billionaires: Elon Musk, Jeff Bezos, and the new space race*. Houghton Mifflin Harcourt.
- Giuliani, G., Klenze, T., Legner, M., Basin, D., & Perrig, A. (2020). Internet backbones in space. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 50(1), 25-37. <https://doi.org/10.1145/3390251.3390256>
- Hintz, G. R. (2015). *Orbital Mechanics and Astrodynamics*. Springer.
- International Organization for Standardization, ISO. (2016). *ISO 27852:2016. Space systems - Estimation of orbit lifetime*. ISO. <https://www.iso.org/standard/68572.html#:~:text=ISO%2027852%3A2016%20describes%20a,debris%20in%20LEO%2Dcrossing%20orbits>
- Kececy, T., Hall, D., Hamada, K., & Stocker, D. (2007). Satellite maneuver detection using two-line elements data. En S. Ryan (Ed.), *Proceedings of the Advanced Maui Optical*

- and Space Surveillance Technologies Conference (p. E19). <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2007amos.confE..19K/abstract>
- Kulu, E. (2021). *Nanosats database*. <https://www.nanosats.eu/>
- Laboratory for Atmospheric & Space Physics, LASP. (2017). *Penticton Solar Radio Flux at 10.7cm, Time Series*. LASP. https://lasp.colorado.edu/lisird/data/penticton_radio_flux/
- Lee, B. S. (2002). NORAD TLE conversion from osculating orbital element. *Journal of Astronomy and Space Sciences*, 19(4), 395-402. <https://doi.org/10.5140/JASS.2002.19.4.395>
- León-Lozada, F. (2018, 3 de diciembre). *La Fuerza Aérea de Colombia lanzó FACSAT-1*. Latam Satelital. <http://latamsatelital.com/la-fuerza-aerea-colombia-lanzo-facsat-1/>
- Levit, C., & Marshall, W. (2011). Improved orbit predictions using two-line elements. *Advances in Space Research*, 47(7), 1107-1115. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.10.017>
- Madi, M., & Sokolova, O. (2021). *Space debris peril: pathways and opportunities*. CRC Press.
- Pardini, C., & Anselmo, L. (2013, 21-23 de mayo). *Re-entry predictions for uncontrolled satellites: results and challenges* [conferencia]. Actas de la 6th conferencia IAASS, Noordwijk, Países Bajos.
- Piñeros, J. O., Dos Santos, W. A., & Prado, A. F. (2021). Analysis of the orbit lifetime of CubeSats in low Earth orbits including periodic variation in drag due to attitude motion. *Advances in Space Research*, 67(2), 902-918. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.10.024>
- Portilla, J. G. (2009). *Elementos de astronomía de posición*. Universidad Nacional de Colombia.
- Portilla, J. G. (2012). La órbita del satélite Libertad 1. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 36(141), 491-500. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-39082012000400002
- Portilla, J. G. (2018). *Principios de mecánica celeste*. Proeditor.
- Reiland, N., Rosengren, A. J., Malhotra, R., & Bombardelli, C. (2020). Assessing and minimizing collisions in satellite mega-constellations. *Advances in Space Research*, 67(11), 3755-3774. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.01.010>
- Safyan, M. (2020). Planet's Dove Satellite Constellation. En J. Pelton (Eds.), *Handbook of Small Satellites* (pp. 1-17). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-20707-6_64-1
- Stakem, P. H. (2020). *History & Future of Cubesats*. Edición Kindle.
- Tikami, A., Moura, C. O., & Dos-Santos, W. A. (2017). *First on-orbit results from the Tancredo-1 Picosat mission*. Session (Vol. 2). Proceedings of the 1st IAA Latin American Symposium on Small Satellites: Advanced Technologies and Distributed Systems. http://mtc-m21b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/06.28.19.06/doc/tikami_first.pdf
- Vallado, D. A. (2013). *Fundamentals of Astrodynamics and Applications*. Wertz.
- Vallado, D. A., & Cefola, P. J. (2012, October). *Two-line element sets—practice and use* [ponencia]. 63rd International Astronautical Congress, Nápoles, Italia.
- Wertz, J. R., Everett, D. F., & Puschell, J. J. (2011). *Space mission engineering: the new SMAD*. Microcosm Press.
- Woellert, K., Ehrenfreund, P., Ricco A. J., & Hertzfeld, H. (2011). Cubesats: Cost-effective science and technology platforms for emerging and developing nations. *Advances in Space Research*, 47(4), 663-684. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.10.009>
- Xu, X. L., & Xiong, Y. Q. (2018). Orbit error characteristic and distribution of TLE using CHAMP orbit data. *Astrophysics and Space Science*, 363(2), 1-6. <https://doi.org/10.1007/s10509-018-3251-z>

Estudio de la resistencia a la tracción de depósitos de soldadura de la aleación AA2024-T3*

| Fecha de recibido: 20 de marzo del 2021 | Fecha de aprobación: 13 de abril del 2021 |

David Alberto Ramírez Vargas

Estudiante de maestría

Universidad Nacional de Colombia
Colombia

Grupo de Investigación: Análisis de Falla e Integridad de Superficies (AFIS)

Rol de investigador: teórico y escritura
<https://orcid.org/0000-0003-3045-8752>

✉ daaramirezva@unal.edu.co

Andrés Fernando Gil Plazas

Ingeniero mecánico

Universidad Nacional de Colombia
Colombia

Grupo de Investigación: Análisis de Falla e Integridad de Superficies (AFIS) y Grupo de investigación del Centro de Materiales y Ensayos (GIMES, SENA)

Rol de investigador: teórico y experimental
<https://orcid.org/0000-0001-6585-9121>

✉ agilp@unal.edu.co

Liz Karen Herrera Quintero

Doctora en Ciencia de Materiales

Universidad Nacional de Colombia
Colombia

Grupo de Investigación: Análisis de Falla e Integridad de Superficies (AFIS)

Rol de investigador: teórico
<https://orcid.org/0000-0003-2002-4336>

✉ lkherreraq@unal.edu.co

* Artículo de investigación resultado de la tesis de maestría vinculada al grupo de investigación de Análisis de fallas e integridad estructural, Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá.

Cómo citar este artículo: Ramírez Vargas, D. A., Gil Plazas, A. F., & Herrera Quintero, L. K. (2021). Estudio de la resistencia a la tracción de depósitos de soldadura de la aleación AA2024-T3. *Ciencia y Poder Aéreo*, 16(1). 18- 38, <https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaereo.708>



Estudio de la resistencia a la tracción de depósitos de soldadura de la aleación AA2024-T3

Resumen: En el presente artículo, se realiza un estudio de la resistencia a la tracción de diferentes depósitos de soldadura sobre láminas de la aleación de aluminio AA2024-T3 AlClad. La soldabilidad de la aleación, bajo procesos de arco, se considera limitada por su sensibilidad al agrietamiento en caliente y, por ello, se encuentra ampliamente estudiada en procesos de estado sólido o láser, en los que la afectación térmica es menor. La investigación tiene como objetivo estudiar el comportamiento mecánico de dicho aluminio al soldarlo con tecnología local. Para la experimentación, se realizaron depósitos con combinaciones de electrodo no consumible punto violeta, electrodo no consumible punto verde, metal de aporte ER4043 y sin metal de aporte (soldadura autógena). Los ensayos mecánicos estuvieron bajo el estándar ASTM E8 y bajo las recomendaciones del estándar AWS D1.2. Adicionalmente, se realizó el respectivo estudio de las superficies de fractura de cada uno de los depósitos. Entre los resultados, se destaca la notable reducción tanto de resistencia mecánica como de ductilidad, lo cual se debió a la alta presencia de porosidad, que desencadenó grietas de diversos tamaños, ligados, también, a una fragilización por hidrógeno y por presencia de partículas de segunda fase en los límites de grano.

Palabras clave: resistencia mecánica; GTAW-P; fractura; agrietamiento en caliente

Study of Weld Deposits Tensile Strength in the AA2024-T3 Alloy

Abstract: This paper examines the tensile strength of different weld deposits on sheets of the AA2024-T3 AlClad aluminum alloy. The weldability of this alloy under arc welding processes is considered limited due to its sensitivity to hot cracking. Therefore, it has been widely studied in solid-state or laser processes in which the thermal impact is reduced. The research aims to study the mechanical behavior of said aluminum alloy when local technology is used for welding. Experimentation included the use of deposits elaborated with combinations of non-consumable violet point electrode, non-consumable green point electrode, ER4043 filler metal, and without filler metal (autogenous welding). Mechanical tests were performed under the ASTM E8 standard and following the recommendations of the AWS D1.2 standard. The corresponding study of fractured surfaces in each deposit was also carried out. Results show a considerable reduction in both mechanical resistance and ductility as a result of the strong presence of porosity, which triggered cracks of various sizes, also linked to embrittlement by hydrogen and the presence of second-phase particles at grain boundaries.

Keywords: Mechanical strength; GTAW-P; fracture; hot cracking.

Estudo da resistência à tração dos reservatórios da liga de soldagem AA2024-T3

Resumo: No presente artigo, é realizado um estudo da resistência à tração de diferentes reservatórios de soldagem sobre lâminas de liga de alumínio AA2024-T3 AlClad. A soldabilidade da liga, sob processos de arco, é considerada limitada pela sua sensibilidade à fissuração no quente, e, por isso, se encontra amplamente estudada em processos de estado sólido ou a laser, em que a afetação térmica é menor. A investigação tem por objetivo estudar o comportamento mecânico do referido alumínio ao soldá-lo com tecnologia local. Para a experimentação, foram realizados depósitos com combinações de eletrodo não consumível ponto violeta, eletrodo não consumível ponto verde, metal de entrada ER4043 e sem metal de entrada (soldagem autônoma). Os ensaios mecânicos estiveram sob o padrão ASTM E8 e sob as recomendações da norma AWS D1.2. Adicionalmente, realizou-se o respectivo estudo das superfícies de fratura de cada um dos depósitos. Entre os resultados, destaca-se a notável redução tanto de resistência mecânica como de ductilidade, o que se deveu à alta presença de porosidade, que desencadeou fissuras de diversos tamanhos, ligados, também, a uma fragilização por hidrogênio e à presença de partículas de segunda fase nos limites do grão.

Palavras-chave: resistência mecânica, GTAW-P, fratura, fissuração em quente

Hoy en día, el aluminio representa cerca del 80 % del peso de las construcciones de aeronaves comerciales y el 50 % de aeronaves militares, en las que también coexisten las aleaciones de magnesio y las superaleaciones. Inicialmente, se trabajó con aleaciones 2017; después, con la 2024 y, en la actualidad, las aleaciones de las series 6XXX y 7XXX son las más usadas. La aleación 2024 fue introducida en la década de 1930 como una aleación de envejecimiento natural con mayor resistencia mecánica; fue desarrollada para reemplazar la aleación 2017 (Liu *et al.*, 2019; Mouritz, 2012).

Con el fin de mejorar los tiempos de mantenimiento y reducir gastos en el reemplazo de partes, se han estudiado diversas formas en que estos duraluminios pueden ser soldados. En general, las investigaciones apuntan a que la forma más efectiva de soldar los aluminios de la serie 2XXX es a través de procesos de soldadura en estado sólido, específicamente la soldadura por fricción (FSW) y la soldadura láser. Además, se centran en el estudio del efecto que tiene la entrada de calor sobre las propiedades mecánicas (Hashimoto *et al.*, 2016; Liang *et al.*, 2020; Soysal & Kou, 2019).

Fu *et al.* (2013) investigaron la dureza en la zona de agitación (sz, por sus siglas en inglés), para diferentes entradas de calor, de juntas sin tratamiento térmico posterior a la soldadura, denominado *as-welded*, y con envejecido natural posterior al procedimiento de soldadura (PWNA). Entre sus hallazgos, destacan que, con una alta entrada de calor, la dureza de la sz es menor que la del metal base; sin embargo, una baja entrada de calor no influye de forma directa en la dureza, sino que se presenta una alta dependencia de la velocidad de rotación: con un incremento en la velocidad de rotación, aumenta la dureza de dicha zona. También encontraron que no es necesario un PWNA, pues, con un adecuado control del pico de temperatura y la respectiva tasa de enfriamiento, es suficiente para alcanzar valores cercanos al metal base.

De forma análoga, Chen *et al.* (2015) investigaron el efecto de la entrada de calor sobre la dureza de la sz, pero con un tratamiento térmico posterior a la soldadura (PWAA). Los hallazgos son similares a los de Fu *et al.* (2013), al identificar que una alta entrada de calor, junto con una elevada velocidad de avance, representa

mejoras en la dureza de la sz, y que, a baja entrada de calor, es necesario incrementar la velocidad de rotación. En este caso, el tratamiento térmico posterior a la soldadura implicó una reducción en la dureza de la junta, a causa del sobrevejecimiento que se presentó.

Jones *et al.* (2005) reportaron dos zonas de dureza mínima dentro de la zona afectada por el calor. La más cercana a la zona afectada termomecánicamente (TMAZ) se debió al sobrevejecido de la fase S, en el ciclo térmico, mientras que la zona de mínima dureza exterior fue a causa de la disolución de la fase S, responsable en mayor parte del endurecimiento del metal base (Wang *et al.*, 2017).

Ahora, en cuanto a la unión de aleaciones disímiles, de las cuales la más común es la de la aleación AA2024 con la AA7075, Cavaliere *et al.* (2006) estudiaron el comportamiento mecánico y microestructural de la unión de láminas de estos dos materiales y observaron cómo la presencia de dendritas equiaxiales se fue reduciendo desde las zonas de recristalización hacia el centro de la junta. Sobre la resistencia mecánica, encontraron lo típico de una unión de materiales disímiles, esto es, ruptura en la zona afectada por el calor del material con menor resistencia (AA2024) y reducción en la vida a fatiga con disminución en la amplitud y elevada pendiente en la curva S-N. Por su parte, Gowthaman y Saravanan (2020), usando también aleaciones AA2024 y AA7075, experimentaron con combinaciones de la velocidad de rotación y velocidad de avance, con fuerza axial constante, y reportaron una combinación favorable cuando se tiene baja velocidad de avance y alta velocidad de rotación, lo cual produce una alta resistencia a la tracción.

Sobre la soldadura de la aleación por arco, como Gas Metal Arc Welding (GMAW, también conocida como MIG) y Gas Tungsten Arc Welding (GTAW o TIG), la información es bastante limitada, y se estudia principalmente la serie 6XXX y la soldadura de aleaciones disímiles. Norman *et al.* (1999) ejecutaron soldadura autógena con el proceso TIG para diferentes combinaciones de parámetros de soldadura. Determinaron que una combinación de altas velocidades de avance y bajas densidades de corriente otorgan las condiciones térmicas necesarias para la nucleación y crecimiento

de granos equiaxiales en el charco de soldadura. Además, observaron cómo en el centro de la soldadura se presenta una microestructura refinada, atribuida a las altas tasas de enfriamiento que operan en esa región.

Las soldaduras de materiales disímiles por arco son preferentes en las aleaciones AA6063 y AA7075. En concreto, Maamar *et al.* (2008) e Hima Bindu *et al.* (2020) realizaron estudios sobre la soldabilidad con la aleación AA7075. Maamar *et al.* encontraron que los granos del material base, adyacentes a la línea de fusión, presentan embastecimiento de los granos cristalizados y una migración de las partículas intermedias de segunda fase hacia sus límites, caso atribuible a la baja disipación de calor generado durante el proceso. Hima Bindu *et al.*, usando aporte ER5356, fueron testigos del ya mencionado fenómeno de embastecimiento del grano con el incremento de la corriente, ocasionando un aumento en la dureza y, al igual que Maamar *et al.*, encontraron segregación de partículas de segunda fase hacia los límites de grano, que resultaron en grietas intergranulares.

Por otro lado, Vijay *et al.* (2020), con su procedimiento de soldadura de las aleaciones AA2024 y AA6063, encontraron un posible incremento en la resistencia a la tracción y en la dureza por el incremento en la entrada de calor, el flujo de gas y la apertura de raíz. Por ello, es importante considerar la temperatura a la que puede llegar el material y el arco a causa del procedimiento de soldadura, ya que eso determina el comportamiento final de la soldadura y no será medida en el experimento. Por ejemplo, Esfahani *et al.* (2018), con su estudio sobre soldadura de aluminio puro bajo GTAW, indican que la zona afectada por el calor experimenta temperaturas entre 377 K (100 °C) y 643 K (370 °C). Du *et al.* (2019), en sus simulaciones y comparaciones de los gradientes de temperatura de la soldadura por arco sobre la aleación AA2024 de espesor 6 mm, indicaron que la temperatura del depósito en el punto de contacto con el electrodo es de casi 990 K (718 °C) y, a 2 mm, la isoterma estará cerca de los 600 K (327 °C).

En algunos estudios se comparan estos dos procesos de soldadura. Por ejemplo, Mohapatra y Sarangi (2016) y Squillace *et al.* (2004) compararon las técnicas

FSW y GTAW en el aspecto microestructural y de resistencia a la corrosión por *pitting*. Ambos concuerdan en que, para el proceso GTAW, la dureza cae tanto en la zona afectada por el calor como en el metal de soldadura, en relación con la alta temperatura que se induce por el proceso en sí; mientras que, para FSW, la SZ y la TMAZ presentan una caída en las propiedades mecánicas de resistencia a la tracción y dureza. Además, se pudo establecer que, para la HAZ, hay una ligera recuperación de estas propiedades mecánicas.

Cabe resaltar que hay técnicas nuevas y novedosas en la unión de estos metales, que implican una baja entrada de calor y evitan algunos de los problemas expuestos. Ahn *et al.* (2017) realizaron un estudio sobre los efectos de usar argón y helio en la soldadura por fibra láser, analizando la calidad en términos de ancho de cara, ancho de raíz socavado, falta de llenado y porosidad. Su principal conclusión es que, si bien con el helio y su alto poder de ionización se consigue un ancho adecuado a bajas velocidades, el argón ofreció una mejor calidad en el depósito. También analizaron el efecto de la tasa de alimentación del aporte sobre la composición y microestructura de la aleación soldada por fibra láser, encontrando que, en un intervalo de 2 a 3 m/min, se consiguió un radio de dilución de 9% en un depósito con 0,6% de silicio, reduciendo el compuesto Mg₂Si y, por ende, minimizando el riesgo de agrietamiento. Por su parte, Prakash *et al.* (2018) demostraron mejoras significativas de dureza y resistencia a la tracción, haciendo uso de la técnica Cold Metal Transfer (CMT).

En términos generales, la soldabilidad es relativamente reducida para un grupo amplio de aleaciones de aluminio, en el que las soldaduras tienden a ser frágiles y la fusión eutéctica alrededor de estas debilita la junta. Los refinadores de grano, como el titanio, el boro y el circonio, reducen la tendencia al agrietamiento (Mondolfo, 1976).

Ahora bien, características propias del aluminio, como su capa de óxido, su elevada conductividad térmica, su considerable coeficiente de dilatación térmica, los altos rangos de solidificación que experimenta y la alta solubilidad del hidrógeno en estado líquido, hacen de la soldadura del aluminio una tarea desafiante.

Cubrir todos los problemas potenciales al tiempo es complicado, pero acciones como controlar la entrada de calor y la velocidad de avance y los tratamientos previo y posterior a la soldadura han demostrado la reducción de sus efectos negativos (Qi *et al.*, 2019).

La combinación del alto coeficiente de expansión térmica, la contracción de solidificación y un amplio intervalo de temperaturas de solidificación desembocan en una sensibilidad al agrietamiento (ASM International, 2020b; Hatch, 1984). En este caso, un grano refinado hace que la película del líquido intergranular residual se reduzca, provocando una mayor cohesión de los granos, mitigando así el agrietamiento por solidificación, lo que mejora las propiedades mecánicas. En general, granos grandes se producen a causa de la baja disipación del calor generado. En ese sentido, el tamaño del grano aumentará con el aumento en la temperatura pico. El máximo pico de temperatura en la HAZ es en la frontera de la zona de fusión, por lo que esta es la responsable de la variación del tamaño del grano posterior al proceso de soldadura (Esfahani *et al.*, 2018; Kou & Le, 1988; Lancaster, 1999; Maamar *et al.*, 2008; Vijay *et al.*, 2020).

La porosidad es difícil de controlar, debido a la alta difusividad del hidrógeno en el aluminio líquido, la interacción con el ambiente y la alta tasa de solidificación. La difusión del hidrógeno puede llegar a ser tan alta como $1 \text{ cm}^3/\text{g}$, dando paso a la formación de burbujas. Según Ambriz y Jaramillo (2014), las burbujas deben tener un radio crítico mayor a $700 \mu\text{m}$ para que puedan sobreponerse a la tensión superficial y alcanzar la superficie con ayuda de la fuerza de empuje. Sin embargo, en un proceso real, el ciclo térmico de enfriamiento de la zona de fusión es muy rápido, por lo que es complicado, en algunos casos, llegar a ese estado de equilibrio. En realidad, se requiere de una tasa de solidificación muy baja para que la burbuja se forme y alcance su valor crítico. Al mismo tiempo, el grado de degradación de la zona afectada por el calor puede variar considerablemente si se lleva un control sobre las variables del proceso, tomando en consideración la influencia del ancho de esta zona del espesor del material, la velocidad de avance y la entrada de calor (ASM International, 2020b; Mathers, 2002).

De acuerdo con lo anterior, la investigación se centra en determinar qué tan factible es soldar un aluminio 2024-T3 con la tecnología disponible en Colombia. Para ello, se ejecutaron diferentes combinaciones de variables como electrodo no consumible y método de aporte, con el fin de evaluar la resistencia a la tracción de los depósitos. El estudio se complementa con el estudio de la superficie de fractura para, por un lado, determinar los diferentes modos y mecanismos de falla que se pueden presentar a causa de la combinación de variables y, por otro, contrastarlos con los tipos de fractura propuestos por Matsuda (Lippold, 2015).

Metodología

Para la experimentación, se llevaron a cabo diferentes depósitos de soldadura en láminas de la aleación de aluminio AA2024 en su estado de entrega T3 con AlClad, de acuerdo con la composición química indicada en la tabla 1. Las propiedades mecánicas de referencia se encuentran resumidas en la tabla 2.

Tabla 1
Composición química teórica de la aleación AA2024-T3

Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr
Balance	0.5	0.5	3.8-4.9	0.3-0.9	1.2-1.8	0.1

Fuente: elaboración propia, a partir de ASM International (2020a)

Tabla 2
Propiedades mecánicas reportadas de la aleación AA2024-T3

Aleación y tratamiento	Resistencia última		Resistencia a la fluencia		Elongación en 50 mm, %	Dureza HB
	MPa	ksi	MPa	ksi		
AlClad 2024-T3	450	65	310	45	18	120

Fuente: elaboración propia, a partir de ASTM B209-14 (2014)

Para los depósitos, se escogió un proceso GTAW con alta frecuencia y se trabajó con corriente alterna pulsada. Variables como velocidad de avance, corriente y voltaje se dejaron constantes para todos los

depósitos. Se trabajó con una trmezcla de gases de 200 ppm de óxido nítrico, 200 ppm de oxígeno y balance argón, que se asemeja a una mezcla de 20 % de helio, según lo indica su patente (Miller *et al.*, 2013). Las variables específicas del procedimiento pueden ser consultadas en la tabla 3. El recubrimiento AlClad fue retirado mediante cepillado mecánico, con el fin de mitigar las posibles inclusiones que puedan desencadenar en los depósitos (Tier *et al.*, 2009).

Tabla 3
Variables del proceso de soldadura por GTAW-HF

Voltaje (V)	Corriente pico (I)	Velocidad de avance (v)	Entrada de calor (Q)	Tasa de entrada de calor (q)	Flujo de gas
[V]	[A]	[in/min] [mm/s]	[W] = [J/s]	[kJ/in] [J/mm]	[L/min]
10.0	55.0	7.0 3.0	385.0	3.3 129.9	10.0

Fuente: elaboración propia.

La junta se trató de un bisel recto a tope sin separación de raíz, tal como se indica en la figura 1, de acuerdo con los estándares AWS A2.4 y AWS A3.0 (American Welding Society, 2020a, 2020b). Se trabajaron cuatro combinaciones de variables a partir de la variación del metal de aporte (con aporte ER4043 y sin aporte) y del electrodo no consumible (electrodo punto verde y electrodo punto violeta). Con el fin de obtener un adecuado número de probetas para analizar, se realizaron dos repeticiones de cada combinación, para un total de ocho cupones —tabla 4—. Cabe resaltar que se extrajeron dos probetas de tensión por depósito, de acuerdo con lo exigido por el código de calificación AWS D1.2 (American Welding Society, 2014).

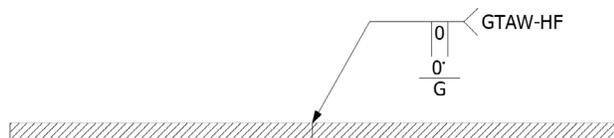


Figura 1. Esquema de junta a tope diseñada para el estudio
Fuente: elaboración propia.

Tabla 4
Depósitos de soldadura, agrupados por el material de aporte y electrodo no consumible

N.º depósito	Material de aporte	Electrodo no consumible	Abreviación
1	Sin Aporte	Punto verde	SAVE
8			
2	ER-4043	EWG - Punto Violeta	CAVI
7			
3	Sin Aporte	EWG - Punto Violeta	SAVI
5			
6	ER-4043	Punto verde	CAVE
4			

Nota. El número de depósito corresponde al orden en el que se ejecutó la soldadura, después de la aleatorización.

Fuente: elaboración propia.

Las respectivas probetas fueron maquinadas, tal como se indica en la figura 2, con una longitud calibrada de 50,8 mm (2 in) y sometidas a carga uniaxial en una máquina universal de ensayos SHIMADZU UH50A de 50kN, con una velocidad de avance del cabezal de 5 mm/min. El procedimiento de ensayo siguió las especificaciones del estándar ASTM E8 (ASTM E8/E8M-21, 2021) y del estándar AWS B4,0 (American Welding Society, 2016).

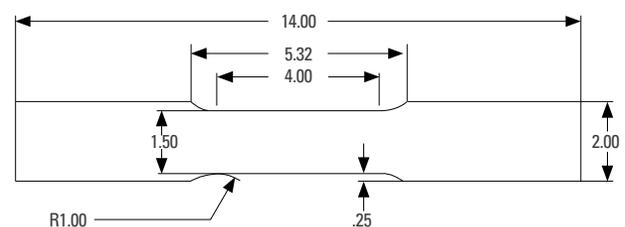


Figura 2. Esquema de las probetas usadas para el ensayo de tensión.
Unidades en pulgadas

Fuente: elaboración propia.

Para la observación y el análisis de las respectivas superficies de fractura, se utilizó un estereoscopio Discovery V.12 y un microscopio electrónico de barrido Phenom XL, al que se le acopló una sonda para análisis semicuantitativo de composición química de puntos sobre la superficie.

Para la observación y el análisis de las respectivas superficies de fractura, se utilizó un estereoscopio Discovery V.12 para identificar cualitativamente el modo de falla. Por microscopía electrónica de barrido (SEM) con el equipo Phenom xL, con acople de una sonda para microanálisis semicuantitativo de composición química (EDS), se observó la superficie de fractura con el ánimo de observar con mayor profundidad de campo y resolución la rugosidad presente en las probetas. También, mediante la emisión característica de rayos X de cada elemento, se reconoce la presencia de los elementos, asociándolos a la segregación o presencia de las partículas de segunda fase presentes y cómo influyen en su respuesta mecánica.

Resultados

Depósitos con electrodo punto verde y sin metal de aporte (SAVE)

El resultado de los ensayos de tracción para las probetas 1 y 8, correspondientes a la combinación de electrodo no consumible punto verde sin metal de aporte, se encuentra en las curvas de esfuerzo-deformación de la figura 3 y en la tabla 5.



Figura 3. Curvas esfuerzo-deformación combinación sin metal de aporte y electrodo punto verde

Fuente: elaboración propia.

Las probetas del depósito 8 mostraron un comportamiento similar entre sí. Por el contrario, las probetas del depósito 1 variaron entre sí en más del 32 % en resistencia y 43 % en ductilidad, lo que se considera como una inconsistencia debido a una posible variación en condiciones como la velocidad de avance o entrada de calor de la soldadura (por cambio en la distancia de arco), situación típica en procesos de soldadura manuales. Es evidente, también que, en ninguno de los cuatro ensayos, hubo una transición entre comportamiento elástico y plástico, asemejándose las curvas a las de un material frágil.

En términos generales, se evidencia una notable reducción, tanto en la resistencia última a la tracción como en la ductilidad, en los cuatro casos con respecto a los valores de referencia de 450 MPa de UTS y 18 % de alargamiento.

Tabla 5
Resumen esfuerzo último y alargamiento de la combinación sin metal de aporte y electrodo punto verde

SAVE			
Depósito	Muestra	uts [MPa]	Alargamiento
1	T1	138,88	3,45 %
1	T2	104,49	2,40 %
8	T1	50,85	1,37 %
8	T2	52,08	1,37 %

Fuente: elaboración propia.

Al realizar la respectiva fractografía, en las macrográficas de las figuras 4(a) y 4(b) se ve la alta concentración de porosidad en los depósitos de soldadura, donde, por la coloración amarilla, se percibe una corrosión. La superficie de fractura tiene aspecto granular, con una reflectividad y rugosidad apreciable, sin marcas aparentes de origen ni direcciones de propagación de la grieta, relacionándose con una fractura súbita frágil (ASM International, 2002). No hay rastros aparentes de deformación plástica.

Con la observación de la superficie a 500 aumentos —figura 4(c)—, se presume una fractura súbita mixta por la aparente existencia de microvacíos, junto con una trayectoria intergranular, lo que, de acuerdo con

ASM International (2002), se relaciona con una presencia parcial de elementos fragilizantes en los límites de grano, debido a la segregación. Con la micrografía a 1.000 aumentos, se aprecian ciertos hoyuelos en los brazos de las dendritas que se formaron. En esta imagen, se puede apreciar cómo el tipo de fractura se asemeja al Tipo D-F, por tratarse de una transición entre el dendrítico y plano (Lippold, 2015). En ambas imágenes es evidente la formación de porosidades de solidificación.

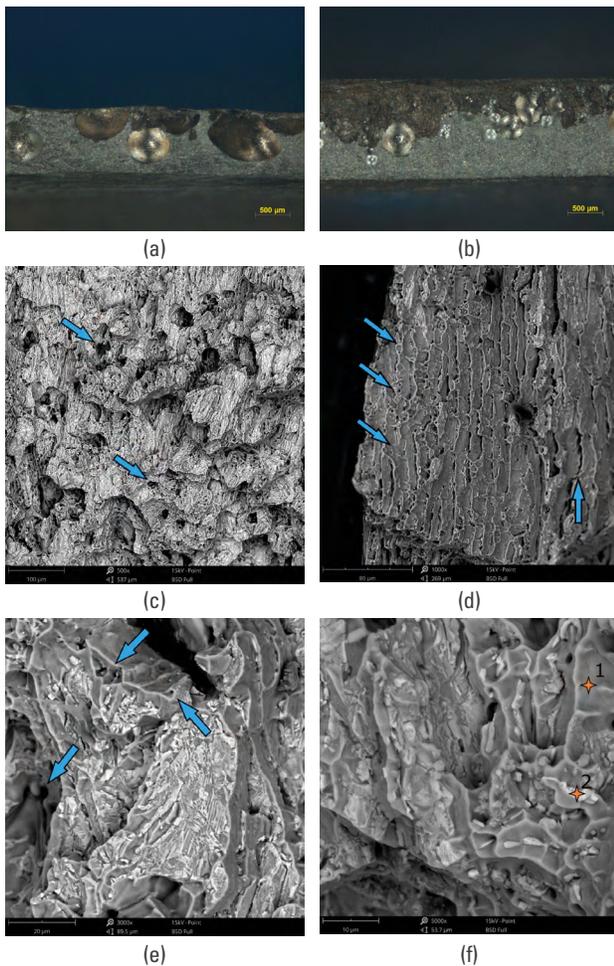


Figura 4. Superficies de fractura de la combinación sin metal de aporte y electrodo punto verde

Nota. Descripción de las imágenes: (a) macrografía de la superficie de fractura de la probeta 1 a 200X; (b) macrografía de la superficie de fractura de la probeta 8 a 200X; (c) micrografía de la superficie de fractura de la probeta 8 a 500X; (d) micrografía de la superficie de fractura de la probeta 1 a 1000X; (e) micrografía de la superficie de fractura de la probeta 8 a 3000X; (f) micrografía de la superficie de fractura de la probeta 8 a 5000X, con la indicación de los puntos para análisis mediante SEM/EDS.

Fuente: elaboración propia.

Con mayores aumentos, como los presentados en las figuras 4(e) y 4(f), se evidencia nuevamente la porosidad de contracción; pero, esta vez, se observa una trayectoria intergranular, en la que se ve un modo de fractura por descohesión (ASM International, 2002), posiblemente, a causa de los elementos que se alojan en algunos hoyuelos producto de la separación. Cabe resaltar la presencia de una capa, de lo que puede considerarse líquido eutéctico, que cubre parcialmente la superficie de fractura.

Mediante el análisis de composición elemental de los puntos indicados en la figura 4(f), se determina, a partir de la composición del punto 1, presentada en la tabla 6, que, por su alto contenido de aluminio, se trata de un elemento microestructural en solución sólida de la matriz del material. El espectro de composición elemental de este punto se presenta en la figura 5, en la que se evidencian los elementos identificados y analizados.

Ahora bien, analizando uno de los elementos que se advirtieron en los puntos de descohesión de los granos, como lo es el punto 2 de la figura 4, por el contenido de aluminio y cobre presentado en la tabla 7, se infiere que es un compuesto intermetálico del tipo Al-Cu-Mg, que, para las relaciones Cu/Mg de 2.81 y Mg/Si de 3.2 se consideran normales (Mondolfo, 1976) y que, a su vez, actuaron en ese punto como nucleadores de grieta. El respectivo espectro de composición elemental del punto 2 se presenta en la figura 6.

Tabla 6
Composición química elemental del punto 1 de la superficie de fractura de la combinación sin metal de aporte y electrodo punto verde

Elemento Químico		Concentración	
Nombre	Símbolo	Atómica %	Peso %
Aluminio	Al	95,97	93,89
Magnesio	Mg	2,68	2,36
Cobre	Cu	0,95	2,18
Plata	Ag	0,40	1,57

Fuente: elaboración propia.

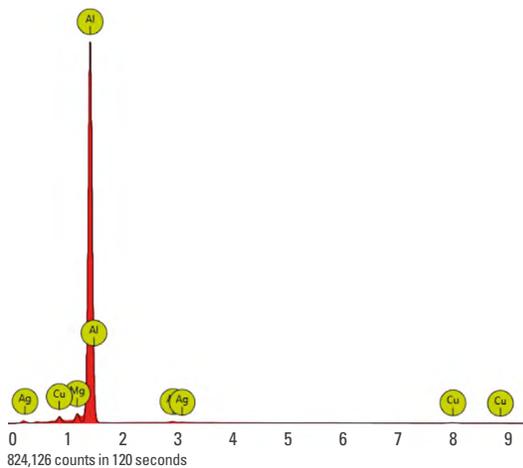


Figura 5. Espectro de composición por SEM/EDS del punto 1 de la superficie de fractura de la combinación sin metal de aporte y electrodo punto verde
Fuente: elaboración propia.

Tabla 7
Composición química elemental del punto 2 de la superficie de fractura de la combinación sin metal de aporte y electrodo punto verde

Elemento Químico		Concentración	
Nombre	Símbolo	Atómica %	Peso %
Aluminio	Al	78,43	66,82
Cobre	Cu	12,15	24,38
Magnesio	Mg	7,61	5,84
Hierro	Fe	0,97	1,71
Manganeso	Mn	0,58	1,01
Silicio	Si	0,27	0,24

Fuente: elaboración propia.

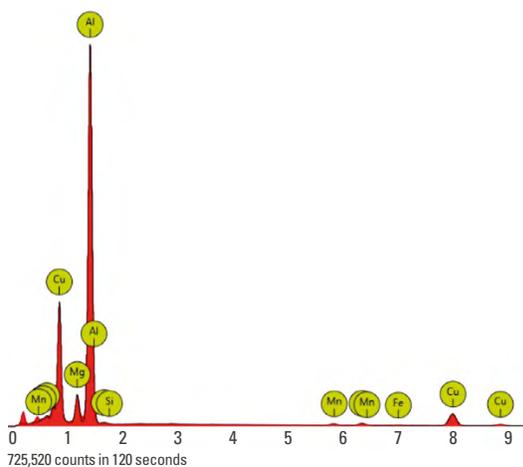


Figura 6. Espectro de composición por SEM/EDS del punto 2 de la superficie de fractura de la combinación sin metal de aporte y electrodo punto verde
Fuente: elaboración propia.

Depósitos con electrodo punto violeta y con metal de aporte (CAVI)

El resultado de los ensayos de tracción para las probetas 2 y 7, correspondientes a la combinación de electrodo no consumible punto violeta con metal de aporte, se encuentra en las curvas de esfuerzo-deformación de la figura 7 y en la tabla 8.

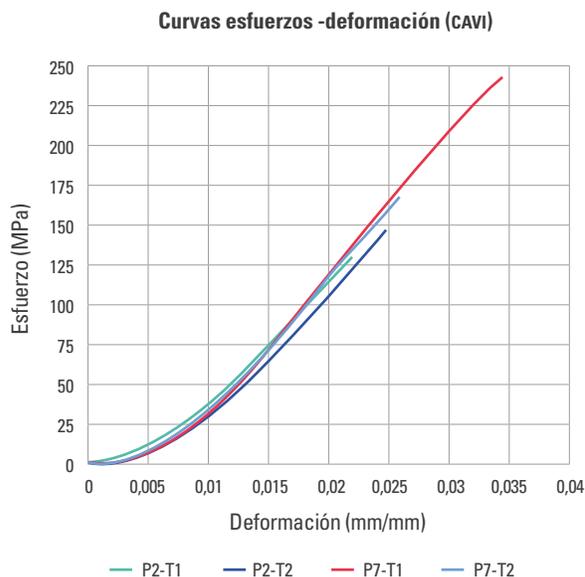


Figura 7. Curvas esfuerzo-deformación combinación con metal de aporte y electrodo punto violeta

Fuente: elaboración propia.

En esta combinación, se comprobaron valores de resistencia y ductilidad más consistentes, comparados con la combinación anterior, aunque sigue habiendo una merma considerable en ambas propiedades. El valor más alto en ductilidad y resistencia lo presentó la probeta 1 del depósito 7, que se acercó bastante al límite elástico; incluso, se aprecia una cierta curvatura al final, lo que puede significar el inicio de la transición entre la región elástica y plástica del material. Sin embargo, no se percibe un comportamiento más allá del límite elástico, y sus curvas presentan una similitud con las de un material frágil. Al haber fractura por debajo de la temperatura equicohesiva, se puede considerar como un fenómeno de fragilización (Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017) y se relaciona

directamente con la alteración no controlada de variables como distancia de arco y velocidad de avance, que, si bien se consideraron constantes, en realidad, posiblemente no lo fueron. Estas variaciones tienen una incidencia directa en el proceso de solidificación por la modificación de la tasa de enfriamiento y la relación G/R, haciendo que aspectos como la segregación por subenfriamiento constitucional también se vean alterados (Kou, 2003).

Tabla 8
Resumen esfuerzo último y alargamiento de la combinación con metal de aporte y electrodo punto violeta

CAVI			
Depósito	Muestra	UTS [MPa]	Alargamiento
2	T1	129,51	2,19 %
2	T2	145,50	2,47 %
7	T1	240,90	3,43 %
7	T2	166,10	2,58 %

Fuente: elaboración propia.

Las superficies de fractura presentaron una textura granular a 200 aumentos, de acuerdo con las figuras 8(a) y 8(b), con visible reflectividad y rugosidad, lo que, junto con el tipo de carga aplicada de tensión, presentada en la figura 7, permite señalar que se trató de una posible fractura súbita frágil. En esta ocasión, no hubo coloración relacionada con corrosión, pero sigue habiendo una concentración de poros, aunque de menor tamaño, si se compara con la anterior combinación. En ambas superficies de fractura se presentan marcas de río, que indican que hay diferentes niveles en el frente de propagación de la grieta, aunque aún hay una superficie consistente con un modo de carga I, como el que fue aplicado.

Con un aumento de 500, como el de la figura 8(c), es posible ver en detalle la concentración de poros de diversos tamaños, grietas y microgrietas en los límites de solidificación y los conocidos poros de contracción, también producto de la solidificación. En esta imagen es posible apreciar el ya nombrado desnivel de la superficie de fractura, que presenta los mismos defectos de la superficie más cercana. En esta

micrografía se presenta una trayectoria mayoritariamente intergranular.

En la figura 8(d), de 1.000 aumentos, se ve cómo, en efecto, la trayectoria de la fractura fue intergranular, pues se advierten ciertos huecos o vacíos en límite de grano, fenómeno conocido como *cavitación en límite de grano*. Respecto al tipo de fractura por agrietamiento, se ve tanto el tipo D, por lugares con apariencia de canasta de huevos, como el tipo D+F, por tratarse de un punto intermedio entre el dendrítico y el plano.

Con una imagen de 3.000 aumentos, como la de la figura 8(e), es posible notar cómo se trató de una descohesión en los límites de grano, y cómo hubo elementos de segunda en los vacíos de dichos límites. En esta imagen, es visible que hay zonas de la superficie de fractura cubiertas por una película de lo que puede ser un elemento fragilizante y es evidente la irregularidad en el llenado de los huecos de solidificación en el rango de temperatura frágil.

Analizando la composición química elemental de dos puntos cercanos sobre película que se presentó en la superficie de fractura, tal como se indica en la figura 8(f), se nota que ambos son casos de eutécticos, con un porcentaje mayor de cobre para el punto 1, de acuerdo con la tabla 9, y con la presencia de hierro y manganeso. Cabe resaltar que, en este aspecto, el contenido de magnesio se vio mermado, hecho atribuible a que el contenido de silicio fue mayor al 1 % —a causa del metal de aporte— y la relación Mg/Si se hizo menor, alrededor de 0,5 %, por lo que hubo más silicio para producir la reacción y formación del compuesto Mg_2Si , en el cual el remanente reaccionó con hierro y manganeso, toda vez que el hierro es una impureza común en las aleaciones de aluminio.

Sin embargo, el alto contenido de hierro lo convierte en un elemento que forma compuestos fragilizantes y que, a su vez, reduce el contenido de cobre soluble para formar otros compuestos, por lo que puede tratarse de uno de los motivos por el cual la resistencia se vio drásticamente reducida —tabla 10—. Los respectivos espectros de composición elemental por EDS de los puntos 1 y 2 se encuentran en las figuras 9 y 10, en las cuales se evidencia que todos los elementos químicos fueron considerados en el análisis.

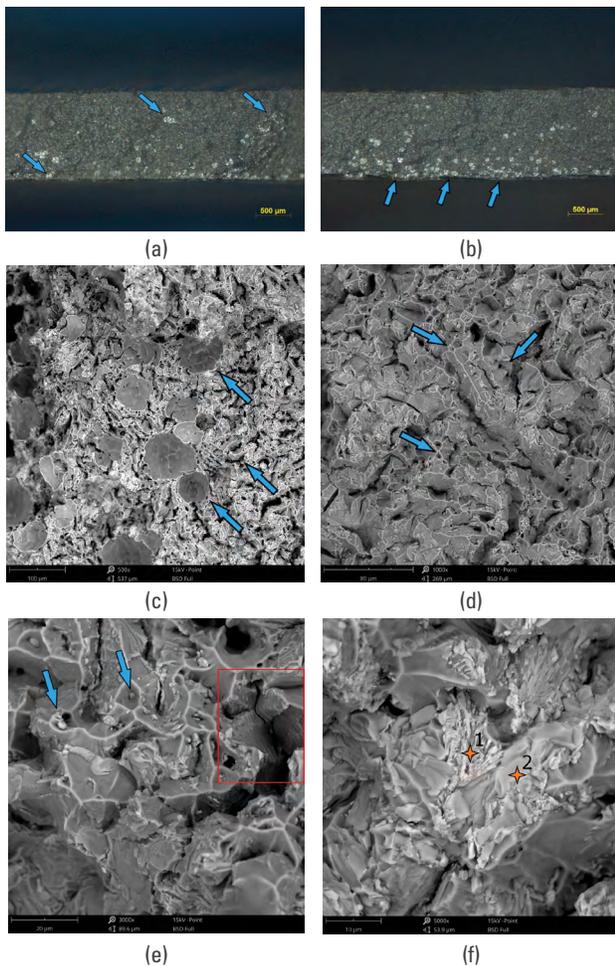


Figura 8. Superficies de fractura de la combinación con metal de aporte y electrodo punto violeta

Nota. Descripción de las imágenes: (a) macrografía de la superficie de fractura de la probeta 2 a 200X; (b) macrografía de la superficie de fractura de la probeta 7 a 200X; (c) micrografía de la superficie de fractura de la probeta 2 a 500X; (d) micrografía de la superficie de fractura de la probeta 2 a 1.000X; (e) micrografía de la superficie de fractura de la probeta 2 a 3.000X; (f) micrografía de la superficie de fractura de la probeta 7 a 5.000X, con la indicación de los puntos para análisis mediante SEM/EDS.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 9
Composición química elemental del punto 1 de la superficie de fractura de la combinación con metal de aporte y electrodo punto violeta

Elemento Químico		Concentración	
Nombre	Símbolo	Atómica %	Peso %
Aluminio	Al	76,08	60,26
Cobre	Cu	19,59	36,53
Magnesio	Mg	3,23	2,31
Silicio	Si	1,10	0,91

Fuente: elaboración propia.

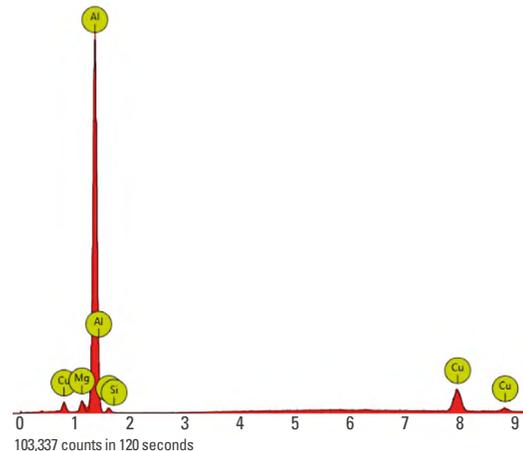


Figura 9. Espectro SEM/EDS del punto 1 de la superficie de fractura de la combinación con metal de aporte y electrodo punto violeta

Fuente: elaboración propia.

Tabla 10
Composición química elemental del punto 2 de la superficie de fractura de la combinación con metal de aporte y electrodo punto violeta

Elemento Químico		Concentración	
Nombre	Símbolo	Atómica %	Peso %
Aluminio	Al	78,81	64,47
Cobre	Cu	6,28	12,11
Hierro	Fe	7,09	12,01
Manganeso	Mn	6,08	10,12
Magnesio	Mg	1,74	1,28

Fuente: elaboración propia.

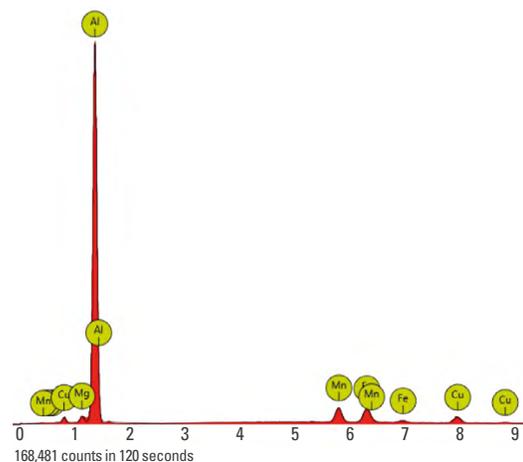


Figura 10. Espectro SEM/EDS del punto 2 de la superficie de fractura de la combinación con metal de aporte y electrodo punto violeta

Fuente: elaboración propia.

Depósitos con electrodo punto violeta y sin metal aporte (SAVI)

El resultado de los ensayos de tracción para las probetas 3 y 5, correspondientes a la combinación de electrodo no consumible punto violeta sin metal de aporte, se encuentra en las curvas de esfuerzo-deformación de la figura 11 y en la tabla 11.

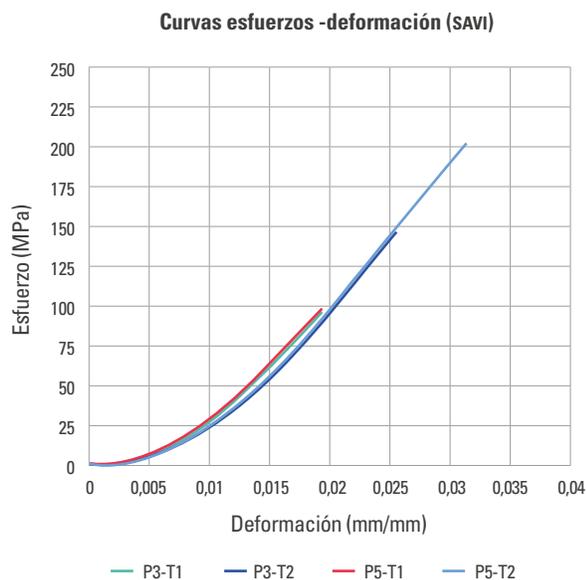


Figura 11. Curvas esfuerzo-deformación de la combinación sin metal de aporte y electrodo punto violeta
Fuente: elaboración propia.

Respecto a la combinación anterior, se presenta un comportamiento similar, en el cual las curvas siguieron el mismo recorrido en su parte elástica, pero con evidentes variaciones en resistencia mecánica y ductilidad. En general, los valores fueron mucho menores, a excepción de la probeta 2 del depósito 5, que presentó un esfuerzo máximo de 200 MPa, con una elasticidad aproximada de 3,17%. De nuevo, estas diferencias en la resistencia última entre las probetas se atribuyen principalmente a posibles variaciones no programadas de parámetros en la ejecución del procedimiento de soldadura, como las mencionadas en la sección anterior, afectando así el proceso de

solidificación y modificando las propiedades finales (Liu & Kou, 2017). Al igual que en los casos anteriores, no hay un límite elástico definido y las curvas se asemejan a las de materiales frágiles, lo cual, complementado con la idea anterior, muestra que la solidificación fuera de equilibrio hará cambiar el rango de temperatura frágil, que se refleja en el comportamiento mecánico del depósito (Lippold, 2015; Lippold, Böllinghaus, & Cross, 2011).

Tabla 11
Resumen esfuerzo último y alargamiento de la combinación sin metal de aporte y electrodo punto violeta

SAVI			
Depósito	Muestra	uts [MPa]	Alargamiento
3	T1	94,61	1,90 %
3	T2	142,37	2,55 %
5	T1	97,79	1,91 %
5	T2	200,87	3,17 %

Fuente: elaboración propia.

Al comparar las superficies de fractura de las probetas con mejor y peor desempeño —figuras 12(a) y 12(b), respectivamente—, es claro por qué hubo diferencia: mientras que en la probeta 1 del depósito 3 se ve una alta concentración de porosidad de diferentes tamaños, distribuida de forma uniforme en el cordón, en la probeta 2 del depósito 5, la porosidad es visiblemente menor en tamaño, pero con alta concentración. Ese menor tamaño con alta concentración de porosidad es el causante de que, si bien hubo un alto valor de resistencia, este estuvo muy por debajo del valor nominal.

Las superficies de fractura presentan una textura granular con apreciable brillo y rugosidad; no se observa deformación ni distorsión en la superficie, pero sí coloración relacionada con corrosión, como se muestra en la figura 12(a). En la figura 12(b) se ve una marca radial, indicación de que hubo cambio de nivel de la superficie. En general, sigue una superficie de fractura del tipo súbita frágil bajo un modo de carga tipo I.

Con una observación a 500 aumentos, como en la figura 12(c), es visible la concentración de porosidad de gas en la superficie de fractura, junto con porosidad de contracción, que se complementan con un alto número de grietas en límite de grano. En su mayoría, se presenta una trayectoria intergranular con aspecto rocoso, que se asocia con una fractura súbita frágil. De nuevo, la superficie muestra una película no uniforme de eutéctico, que puede ser el causante de la reducción en las propiedades mecánicas.

De la figura 12(d) a 1.000 aumentos y de la figura 12(e) a 3.000 aumentos, se puede concluir que se formó un tipo de fractura tipo F y tipo D, de acuerdo con la clasificación de Matsuda (Lippold, 2015), con las visibles grietas que estas acarrearán. También, se corrobora el supuesto de una trayectoria intergranular, con una evidente descohesión en los límites de grano y cavitación en estos, con presencia de partículas de segunda fase.

Al analizar dos películas de eutéctico sobre la superficie de fractura que, por su tonalidad, parecen ser diferentes entre sí, tal como se aprecia en los puntos 1 y 2 de la figura 12(f), dichas películas se asocian a compuestos de segunda fase del tipo Al-Cu-Mg, siendo diferentes, como se presumía, por la diferencia en la relación Cu/Mg (0,62 para el punto 1 y 2,42 para el punto 2), que es esperable, dada la cantidad de elementos que se hallaron en cada caso, reduciendo el contenido de cobre soluble, tal como se observa en las tablas 12 y 13 y los respectivos espectros de composición de las figuras 13 y 14.

Sobre la misma superficie de fractura, se analizó un punto 3, cuya composición se presenta en la tabla 14, y el espectro de composición elemental se muestra en la figura 15. Dado el porcentaje de composición de hierro y cromo, se asocia esta partícula como una impureza de baja solubilidad, con alta incidencia en la fragilización, especialmente por su tamaño. Cabe recordar que una forma de limitar la formación de este tipo de elementos fragilizantes radica en modificar el contenido de silicio, de tal forma que este retenga el contenido de hierro (Hatch, 1984).

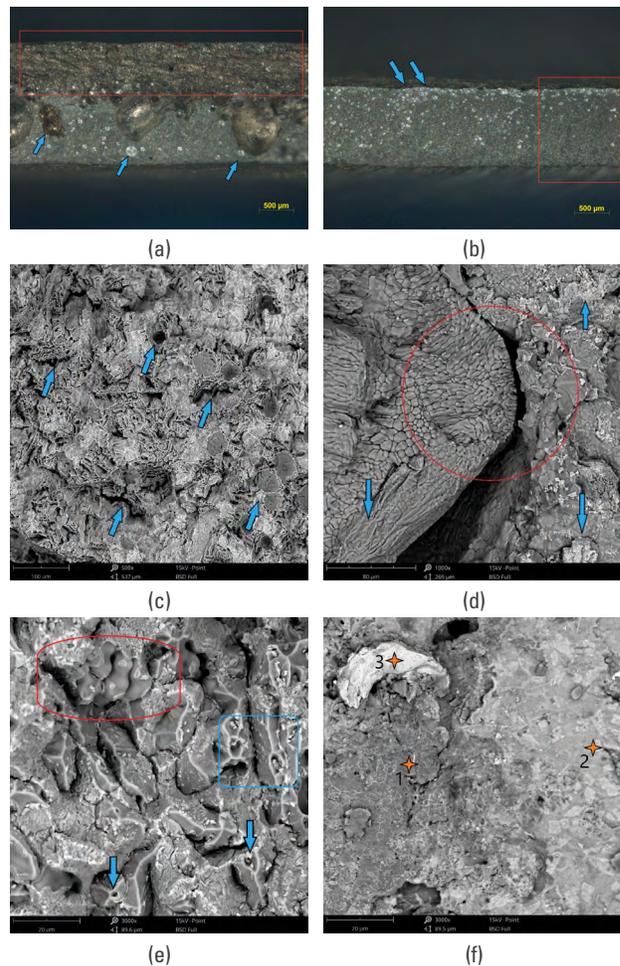


Figura 12. Superficies de fractura de la combinación sin metal de aporte y electrodo punto violeta

Nota. Descripción de las imágenes: (a) macrografía de la superficie de fractura de la probeta 3 a 200X; (b) macrografía de la superficie de fractura de la probeta 5 a 200X; (c) micrografía de la superficie de fractura de la probeta 5 a 500X; (d) micrografía de la superficie de fractura de la probeta 3 a 1.000X; (e) micrografía de la superficie de fractura probeta 5 a 3.000X; (f) micrografía de la superficie de fractura probeta 3 a 5.000X, con la indicación de los puntos para análisis mediante SEM/EDS.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 12
Composición química elemental del punto 1 de la superficie de fractura de la combinación sin metal de aporte y electrodo punto violeta

Elemento Químico		Concentración	
Nombre	Símbolo	Atómica %	Peso %
Aluminio	Al	92,63	89,18
Cobre	Cu	2,58	5,85
Magnesio	Mg	4,21	3,65
Plata	Ag	0,26	1,00
Silicio	Si	0,32	0,32

Fuente: elaboración propia.

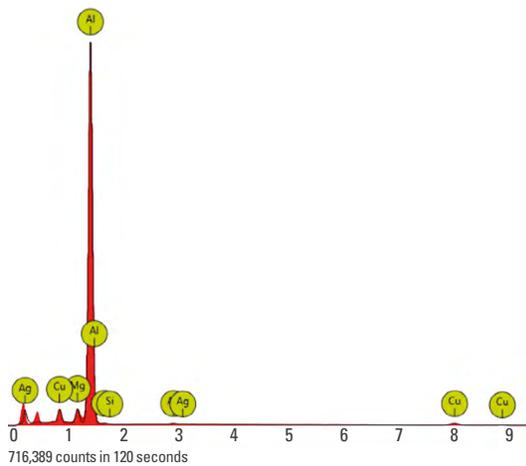


Figura 13. Espectro SEM/EDS del punto 1 de la superficie de fractura de la combinación sin metal de aporte y electrodo punto violeta
Fuente: elaboración propia.

Tabla 13
Composición química elemental del punto 2 de la superficie de fractura de la combinación sin metal de aporte y electrodo punto violeta

Elemento Químico		Concentración	
Nombre	Símbolo	Atómica %	Peso %
Aluminio	Al	70,33	55,12
Cobre	Cu	20,99	38,75
Magnesio	Mg	8,67	6,12

Fuente: elaboración propia.

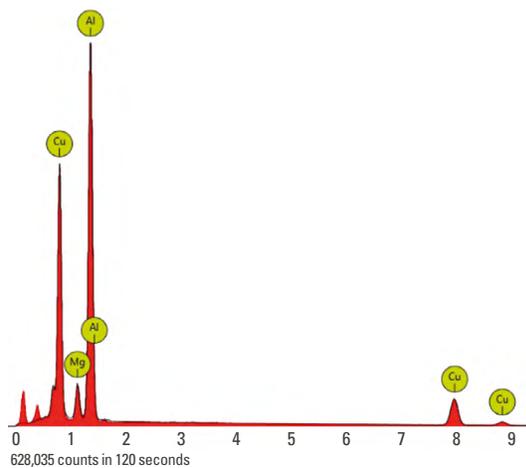


Figura 14. Espectro SEM/EDS del punto 2 de la superficie de fractura de la combinación sin metal de aporte y electrodo punto violeta
Fuente: elaboración propia.

Tabla 14
Composición química elemental del punto 3 de la superficie de fractura de la combinación sin metal de aporte y electrodo punto violeta

Elemento Químico		Concentración	
Nombre	Símbolo	Atómica %	Peso %
Hierro	Fe	57,21	63,48
Cromo	Cr	11,79	12,18
Manganeso	Mn	9,83	10,73
Aluminio	Al	16,09	8,63
Cobre	Cu	3,19	4,03
Magnesio	Mg	1,28	0,62
Silicio	Si	0,61	0,34

Fuente: elaboración propia.

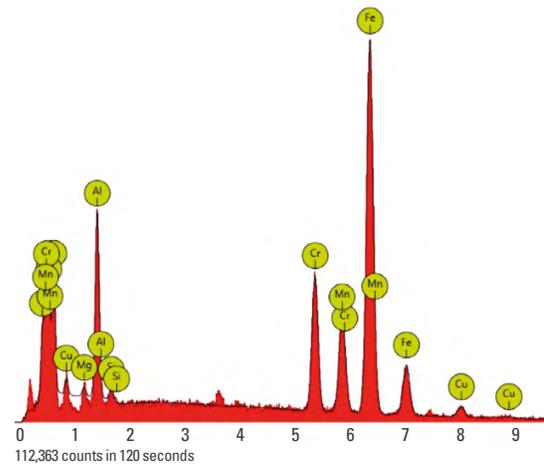


Figura 15. Espectro SEM/EDS del punto 3 de la superficie de fractura de la combinación sin metal de aporte y electrodo punto violeta
Fuente: elaboración propia.

Depósitos con electrodo punto verde y con metal de aporte (CAVE)

El resultado de los ensayos de tracción para las probetas 4 y 6, correspondientes a la combinación de electrodo no consumible punto verde con metal de aporte, se encuentra en las curvas de esfuerzo-deformación de la figura 16 y en la tabla 15.

Contrastando estos resultados con los de la combinación de electrodo punto violeta con metal de aporte (CAVI), es claro que hay una similitud en la que el valor promedio ronda los 170 MPa. Sin embargo, en este caso, no hubo un valor máximo tan marcado

como el de 240 MPa de la probeta 7-T1, aunque sí hubo mayor uniformidad en los valores; por ejemplo, las probetas P4-T2 y P6-T1 presentaron valores con diferencia de 5 MPa. Como fue la tendencia del ensayo, no hubo límite elástico marcado y los comportamientos fueron similares a los de un material frágil con las mismas connotaciones de los resultados anteriores.

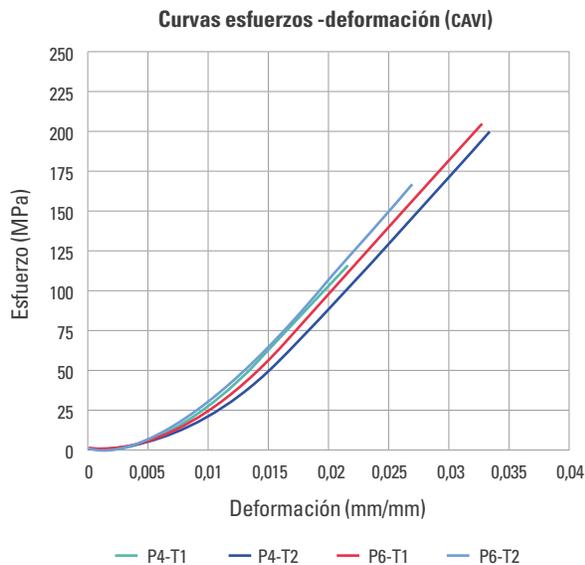


Figura 16. Curvas esfuerzo-deformación combinación con metal de aporte y electrodo punto verde
Fuente: elaboración propia.

Tabla 15
Resumen esfuerzo último y alargamiento de la combinación con metal de aporte y electrodo punto verde

CAVE			
Depósito	Muestra	UTS [MPa]	Alargamiento
4	T1	115,85	2,17 %
4	T2	199,06	3,33 %
6	T1	204,50	3,28 %
6	T2	167,10	2,69 %

Fuente: elaboración propia.

Mediante una comparación de las superficies de fractura de las probetas con peor rendimiento —probeta 1 del depósito 4, figura 17(a)— y mejor rendimiento —probeta 1 del depósito 6, figura 17(b)—, se nota la diferencia en la concentración de porosidad, siendo nula en la segunda. En ambas se aprecia una textura granular, con una marcada reflectividad y apreciable

rugosidad, rasgo distintivo de una fractura frágil de un material con baja resistencia. No se observa distorsión ni deformación, así como tampoco hay decoloraciones por corrosión. En ambas superficies hay marcas radiales a partir de la fibra media, separando dos superficies de fractura, que, de todas formas, siguen siendo del modo de carga I.

Cuando se observa la superficie de fractura de la probeta 4-T1, es clara la presencia de porosidad de gas a lo largo de esta, acompañada de grietas de solidificación y microgrietas dispersas. Se identifica un recorrido intergranular, con apariencia rocosa.

A pesar del aspecto libre de los defectos de los depósitos 6, en la figura 17(d) se observan poros de contracción y grietas en límites de grano. También se identificó un tipo de fractura tipo D, de acuerdo con Matsuda (Lippold, 2015), que tiene sentido por el alto contenido de película interdendrítica que se percibe. En esta imagen, no es apreciable de forma adecuada si se trató de un modo de fractura por descohesión. Para determinarlo, basta con mirar la figura 17(e), en la que se evidencia el recorrido intergranular con presencia tanto de una transición suave como de cavitación en límite de grano, aunque en menor intensidad que en casos anteriores. De nuevo, se observa que la película cubre gran parte de la superficie de fractura, y en los agujeros de los límites de grano se aprecian partículas de segunda fase.

Tal como se hizo en las combinaciones anteriores, se evaluaron puntos específicos sobre la superficie. De acuerdo con la figura 17(f), el primero era una película fina de eutéctico sobre el límite de grano, conclusión a la que se llegó por el alto contenido de cobre, como se presenta en la tabla 16 y su correspondiente espectro de la figura 18. Del punto 2 sobre la misma figura, por su aspecto, se pensaría que se trata de un compuesto tipo Al-Cu-Mg, pero, de acuerdo con la composición química elemental de la tabla 17, se ve que es, en su mayoría, aluminio con bajo contenido en silicio y cobre, que se le atribuye al alto contenido de silicio que se genera por el uso de un aporte ER4043, creando un exceso de este para reaccionar con el magnesio, cobre, hierro y magnesio. El espectro de composición de este punto 2 se encuentra en la figura 19.

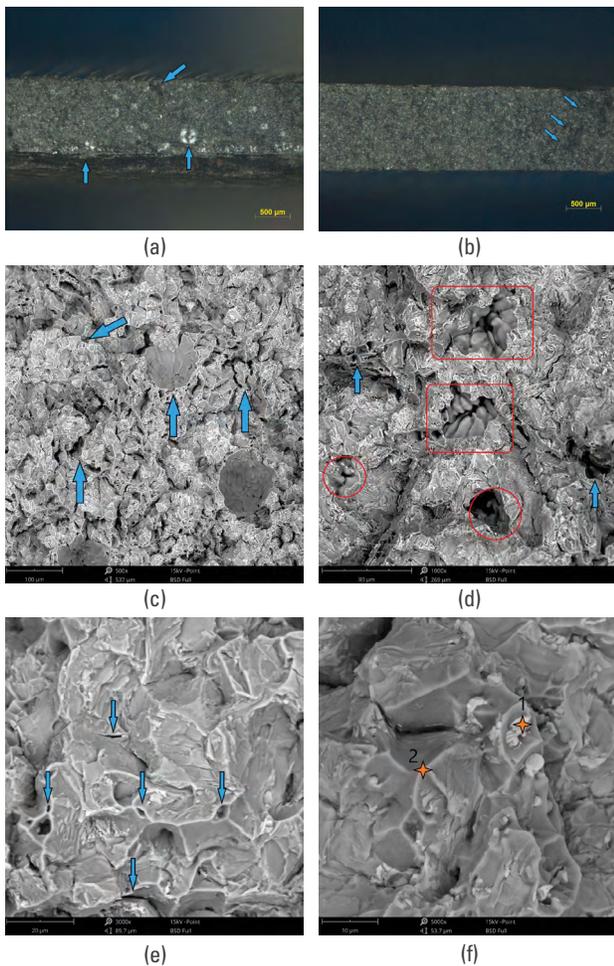


Figura 17. Superficies de fractura de la combinación con metal de aporte y electrodo punto verde

Nota. Descripción de las imágenes: (a) macrografía de la superficie de fractura de la probeta 4 a 200X; (b) macrografía de la superficie de fractura de la probeta 6 a 200X; (c) micrografía de la superficie de fractura de la probeta 4 a 500X; (d) micrografía de la superficie de fractura de la probeta 6 a 1.000X; (e) micrografía de la superficie de fractura de la probeta 4 a 3.000X; (f) micrografía de la superficie de fractura de la probeta 6 a 5.000X, con la indicación de los puntos para análisis mediante SEM/EDS.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 16
Composición química elemental del punto 1 de fractura de la combinación con metal de aporte y electrodo punto verde

Elemento Químico		Concentración	
Nombre	Símbolo	Atómica %	Peso %
Aluminio	Al	78,71	66,39
Cobre	Cu	13,86	27,54
Silicio	Si	3,60	3,16
Magnesio	Mg	3,83	2,91

Fuente: elaboración propia.

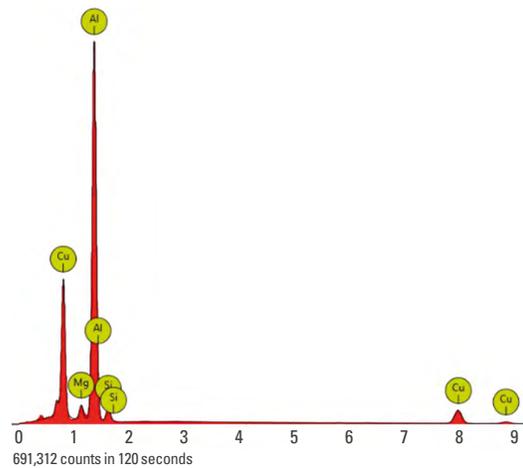


Figura 18. Espectro SEM/EDS del punto 1 de fractura de la combinación con metal de aporte y electrodo punto verde

Fuente: elaboración propia.

Tabla 17
Composición química elemental del punto 2 de fractura de la combinación con metal de aporte y electrodo punto verde

Elemento Químico		Concentración	
Nombre	Símbolo	Atómica %	Peso %
Aluminio	Al	94,58	93,54
Silicio	Si	2,60	2,68
Cobre	Cu	0,88	2,06
Magnesio	Mg	1,93	1,72

Fuente: elaboración propia.

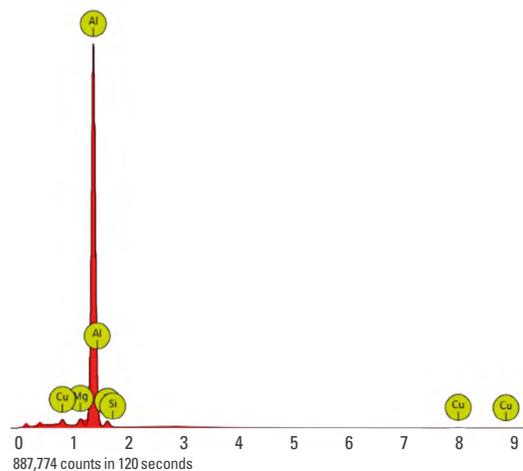


Figura 19. Espectro SEM/EDS del punto 2 de fractura de la combinación con metal de aporte y electrodo punto verde

Fuente: elaboración propia.

Discusión

A partir de la experimentación realizada, se evidenció la existencia de un recubrimiento no uniforme sobre la superficie de fractura. Dicho recubrimiento fue, en el proceso de solidificación, un líquido eutéctico que se fracturó (Böllinghaus & Herold, 2005). Esto está en sincronía con la afirmación según la cual, cuando un líquido se somete a una tensión hidrostática, se vuelve metaestable y, con una presión negativa lo suficientemente grande, se formarán poros finos (microporos), a causa de la cavitación de Fischer.

Asimismo, a partir de las evaluaciones, se evidenció la nula presencia del denominado *curado eutéctico*, lo que hace pensar que el proceso de solidificación presentó cambios en la tasa de solidificación, ligados directamente con variables como la velocidad de avance y la entrada de calor del proceso de soldadura como tal, que imposibilitaron el llenado de los intersticios de la estructura dendrítica coherente, una vez se alcanzó la temperatura de coherencia. Es por ello que, de acuerdo con la prueba de grietas y excesiva porosidad de las micrografías de fractura de las figuras 4, 8, 12 y 17, se asume una fractura del líquido eutéctico, con posible reducción del líquido disponible, o sin la suficiente fluidez para rellenar las cavidades producidas, obteniendo agrietamiento por solidificación.

Esta situación se encuentra fuertemente ligada con las propiedades mecánicas obtenidas en las diferentes combinaciones. De acuerdo con la figura 20, y como ya se expuso en varios apartados de la sección de resultados, una solidificación por fuera de equilibrio, como es habitual en un proceso de soldadura, crea un nuevo rango de temperatura frágil (de no equilibrio), el cual produce una región en la que la resistencia mecánica y la ductilidad caen a sus valores mínimos. Si el llenado o curado eutéctico no fueron efectivos en esa etapa, no es posible la recuperación de dichas propiedades, una vez se supera la zona pastosa.

Concatenando la información de la fractografía de las cuatro combinaciones, la textura presente en todas las superficies de fractura fue granular y el recorrido predominante identificado fue el intergranular,

del tipo liso o con hoyuelos por cavitación (mecanismo dúctil) del límite de grano, lo que se relaciona con una fractura súbita frágil por carga cuasiestática. En el mismo sentido, dada la evidencia de agrietamiento por solidificación, una fractura intergranular es esperable. Sin embargo, una fractura por debajo de la temperatura equicohesiva se asocia necesariamente con un fenómeno de fragilización (Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017). Por tanto, se llega a la conclusión de que hubo fragilización.

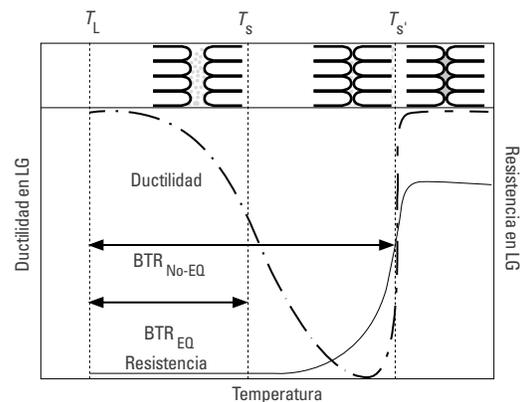


Figura 20. Curva BTR para ductilidad y resistencia en el rango de temperatura frágil de no equilibrio

Fuente: Lippold (2015, p. 130)

Adicionalmente, hechos como el que la superficie de fractura se vea granular cuando microscópicamente se tiene descohesión intergranular, o que haya una trayectoria perpendicular al modo de carga I, así como la reducción en ductilidad y resistencia en ensayos de tensión y que no haya fallo sobre la zona afectada por el calor, como es de esperarse, sino en el metal base, son indicios de fragilización por hidrógeno (Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017). Cabe resaltar que se considera como fragilización y no agrietamiento por hidrógeno, al tratarse de una fractura súbita con pérdida de resistencia y ductilidad ante una carga estática, o cuasiestática, como lo es un ensayo de tracción.

Los diferentes hoyuelos observados sobre las superficies de fractura hacen de la teoría de descohesión de Troiano, o de disminución de la energía superficial del metal, el mecanismo más adecuado para la investigación. Dicha teoría sostiene que el hidrógeno disuelto

tiende a migrar hacia regiones de esfuerzo hidrostático localizado (triaxial) y debilita el material por la reducción de energía de enlace de los átomos, por lo cual la presencia del esfuerzo, en este caso a tensión, facilita la difusión del hidrógeno en el interior del elemento (ASM International, 2002; Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017).

Cuando la fragilización es grave a temperatura ambiente, durante un esfuerzo constante aplicado, se conoce como *fragilización reversible interna por hidrógeno* (ASM International, 2002). En ese sentido, una alta temperatura disuelve el hidrógeno, y, si lo llevamos al plano de la investigación, realizar un tratamiento de solución sólida, posterior a la soldadura, puede disminuir este efecto perjudicial. Al mismo tiempo, conociendo la localización de una capa de líquido eutéctico que quedó alojada sobre las superficies de fractura, junto con la identificación de compuestos a base de impurezas, como el hierro y el cromo, más una trayectoria intergranular con cavitación en límite de grano y una evidente descohesión de los granos, se llega a la conclusión de que también se presentó fractura por la fragilización dinámica.

En este tipo de situaciones, no se suele presentar deformación plástica y los límites de grano, siendo zonas de mayor difusividad, sirven como sitio de ubicación de elementos fragilizantes. Para el caso particular que aquí se trata, se considera como elemento fragilizante el mismo eutéctico o las partículas de segunda fase, a los que, debido al procedimiento de soldadura, se les otorga la difusividad necesaria para producir el fenómeno. En general, los elementos fragilizantes actuaron reduciendo la fuerza de cohesión entre los átomos del material en las zonas que se concentran, nucleándose y propagándose así el agrietamiento (Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017).

Conclusiones

1. Fue predominante el comportamiento bajo tensión, similar al de materiales frágiles, en el que no se presentó, en ningún momento, un límite de proporcionalidad ni un límite elástico que permitiera distinguir elasticidad y plasticidad.
2. Las superficies de fractura presentaron una textura granular, con una apreciable reflectividad y rugosidad, sin distorsiones apreciables y, en algunos casos, con decoloración, que se relacionó con corrosión. También, dichas superficies de fractura se conservaron perpendiculares al esfuerzo aplicado, que se trató como un modo de carga I, lo que se relaciona con una fractura del tipo súbita frágil.
3. La porosidad fue recurrente y varió en tamaño entre superficies: era alta en los depósitos sin metal de aporte y reducida en aquellos con metal de aporte. Esta porosidad se relaciona directamente con la solubilidad del hidrógeno en el aluminio en estado líquido.
4. Con mayores aumentos, se identificó una fractura con recorrido intergranular suave y con cavitación en límites de grano, donde predominó el modo de fractura por descohesión.
5. El análisis de composición química elemental permitió establecer que la capa que cubría la mayoría de las superficies de fractura se trató de líquido eutéctico, que presentó heterogeneidad. En el mismo sentido, no se tiene la suficiente información para determinar el mecanismo por el cual se fracturó el líquido eutéctico en el proceso de solidificación por debajo de la temperatura de coherencia, pero sí se puede establecer, por los poros y grietas formados, que este fenómeno es, en parte, el responsable de las bajas propiedades mecánicas.
6. No hubo evidencia de curado eutéctico de las grietas, posiblemente porque el líquido eutéctico no tenía la suficiente fluidez para llenar los espacios interdendríticos, o porque no fue suficiente para la estructura coherente que se tenía en el proceso de solidificación.
7. Mediante el análisis químico de los elementos que se alojaron en los hoyuelos de los límites de grano, se determinó que eran de segunda fase y que se alojaron al límite de grano por el fenómeno de nucleación y crecimiento, así como por la segregación.

8. Con el análisis químico se determinó la presencia de compuestos formados por alto contenido de hierro y cromo, considerados como impurezas en el aluminio y que, al presentarse como compuestos, representan un riesgo en la integridad del material. Por tanto, se consideró esta situación como una potencial fragilización dinámica. Esto se sustenta en el hecho de que no se haya presentado falla por la zona afectada por el calor —esperable a causa de la recristalización—, sino por el metal de soldadura.
9. En los depósitos que tuvieron metal de aporte se evidenció un contenido de silicio mayor en el eutéctico, pero no fue el suficiente para reducir el agrietamiento en caliente.
10. La baja resistencia mecánica y la ductilidad se relacionaron con el rango de temperatura frágil de no equilibrio, que crea una zona donde ambas propiedades son mínimas.
11. Con el fin de obtener un grano refinado, que reduzca eficientemente la película de líquido intergranular, es conveniente aumentar la velocidad de avance y la entrada de calor. Este hecho puede ayudar a la reducción de la porosidad y no afectará, o será baja la afectación, del valor de subenfriamiento.
12. Por la textura, recorrido y evidente reducción en propiedades mecánicas, la fragilización se asocia, también, con un fenómeno de fragilización por hidrógeno. Esta conclusión se sustenta en la alta porosidad encontrada en todas las superficies de fractura. El mecanismo escogido fue el de la teoría de descohesión, en el cual el hidrógeno disuelto migra a regiones de esfuerzo hidrostático, debilitando el material localmente.
13. En general, los depósitos realizados con metal de aporte y con electrodo no consumible punto verde presentaron un rendimiento superior a los demás, seguidos por aquellos con metal de aporte y electrodo punto violeta.

Como trabajo futuro, se plantea migrar a un proceso automatizado, en el que variables como la velocidad de avance y la entrada de calor se mantengan

constantes y no sufran fluctuaciones que ocasionen diferencias en los resultados y que, por tratarse de un proceso manual, se consideran susceptibles de no permanecer constantes en el tiempo. Otra posible modificación futura sería usar aportes con mayor contenido de silicio o de cobre, como ER4047 o ER4145, los cuales pueden ayudar a combatir la formación de grietas de solidificación, recurrentes en los análisis realizados.

Declaración de conflicto de interés: Los autores no manifiestan conflictos de interés institucionales ni personales.

Referencias

- Ahn, J., Chen, L., He, E., Davies, C. M., & Dear, J. P. (2017). Effect of filler metal feed rate and composition on microstructure and mechanical properties of fibre laser welded AA 2024-T3. *Journal of Manufacturing Processes*, 25, 26-36. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.10.006>
- Ahn, J., He, E., Chen, L., Dear, J., & Davies, C. (2017). The effect of Ar and He shielding gas on fibre laser weld shape and microstructure in AA 2024-T3. *Journal of Manufacturing Processes*, 29, 62-73. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.07.011>
- Ambriz, R. R., & Jaramillo, D. (2014). Mechanical behavior of precipitation hardened aluminum alloys welds. *Light Metal Alloys Applications*, 35-59.
- American Welding Society (2014). *AWS D1.2/D1.2M: 2014 - Structural Welding Code-Aluminum* (6th Ed.). American National Standard Institute.
- American Welding Society (2016). *AWS B4.0:2016 - Standard Methods for Mechanical of Welds* (8th Ed.). American National Standards Institute.
- American Welding Society (2020a). *ANSI/AWS A2.4-20 - Standard Symbols for Welding, Brazing, and Nondestructive Examination*. American National Standards Institute.
- American Welding Society (2020b). *ANSI/AWS A3.09-20 - Standard Welding Terms and Definitions*. American National Standards Institute.
- ASM International (2002). *ASM Volume 11 - Failure Analysis and Prevention*. En *ASM Handbook*. Materials Park.
- ASM International (2020a). *ASM Volume 2 - Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials*. En *ASM Handbook*. Materials Park.

- ASM International. (2020b). ASM Volume 6 - Welding, Brazing and Soldering. En *ASM Handbook*. Materials Park.
- ASTM B209-14. (2014). Aluminum and Aluminum-Alloy Sheet and Plate 1. *ASTM International*, 1-25. <https://doi.org/10.1520/B0209-14.2>
- ASTM E8/E8M-21 (2021). Standard test methods for tension testing of metallic materials 1. *ASTM International*, 1-27. <https://doi.org/10.1520/E0008>
- Böllinghaus, T., & Herold, H. (2005). *Hot Cracking Phenomena in Welds*. Springer. <https://books.google.com.co/books?id=pLprPeLY-T0C>
- Cavaliere, P., Nobile, R., Panella, F. W., & Squillace, A. (2006). Mechanical and microstructural behaviour of 2024-7075 aluminium alloy sheets joined by friction stir welding. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46(6), 588-594. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.07.010>
- Chen, Y., Ding, H., Li, J., Zhao, J., Fu, M., & Li, X. (2015). Effect of welding heat input and post-welded heat treatment on hardness of stir zone for friction stir-welded 2024-T3 aluminum alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 25(8), 2524-2532. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(15\)63871-7](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1003-6326(15)63871-7)
- Du, J., Zhao, G., & Wei, Z. (2019). Effects of Welding Speed and Pulse Frequency on Surface Depression in Variable Polarity Gas Tungsten Arc Welding of Aluminum Alloy. *Metals*, 9(2), 114-134. <https://doi.org/10.3390/met9020114>
- Esfahani, M. M., Farzadi, A., & Zaree, S. R. A. (2018). Effect of welding speed on gas metal arc weld pool in commercially pure aluminum: theoretically and experimentally. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 59(1), 82-92. <https://doi.org/10.3103/S1067821218010121>
- Espejo Mora, É., & Hernández Albañil, H. (2017). *Análisis de fallas de estructuras y elementos mecánicos*. Universidad Nacional de Colombia.
- Fu, R., Zhang, J., Li, Y., Kang, J., Liu, H., & Zhang, F. (2013). Effect of welding heat input and post-welding natural aging on hardness of stir zone for friction stir-welded 2024-T3 aluminum alloy thin-sheet. *Materials Science and Engineering: A*, 559, 319-324. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.08.105>
- Gowthaman, P. S., & Saravanan, B. A. (2020). Determination of weldability study on mechanical properties of dissimilar Al-alloys using Friction stir welding process. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.599>
- Hashimoto, T., Zhang, X., Zhou, X., Skeldon, P., Haigh, S. J., & Thompson, G. E. (2016). Investigation of dealloying of S phase (Al₂CuMg) in AA 2024-T3 aluminium alloy using high resolution 2D and 3D electron imaging. *Corrosion Science*, 103, 157-164. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.corsci.2015.11.013>
- Hatch, J. E. (1984). *Aluminum Properties and Physical Metallurgy. Aluminum Science and Technology*. ASM International. <https://doi.org/10.1361/appm1984p001>
- Hima Bindu, A., Chaitanya, B. S. K., Ajay, K., & Sudhakar, I. (2020). Investigation on feasibility of dissimilar welding of AA2124 and AA7075 aluminium alloy using tungsten inert gas welding. *Materials Today: Proceedings*, 26, 2.283-2.288. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.494>
- Jones, M. J., Heurtier, P., Desrayaud, C., Montheillet, F., Allehaux, D., & Driver, J. H. (2005). Correlation between microstructure and microhardness in a friction stir welded 2024 aluminium alloy. *Scripta Materialia*, 52(8), 693-697. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2004.12.027>
- Kou, S., & Le, Y. (1988). Welding parameters and the grain structure of weld metal-A thermodynamic consideration. *Metallurgical Transactions A*, 19(4), 1.075-1.082. <https://doi.org/10.1007/BF02628392>
- Kou, Sindo. (2003). *Welding Metallurgy* (2nd Ed.). John Wiley & Sons, Inc. [https://doi.org/10.1016/S0016-7878\(62\)80017-0](https://doi.org/10.1016/S0016-7878(62)80017-0)
- Lancaster, J. F. (1999). *Metallurgy of Welding* (6th Ed.). Abington Publishing.
- Liang, M., Chen, L., Zhao, G., & Guo, Y. (2020). Effects of solution treatment on the microstructure and mechanical properties of naturally aged EN AW 2024 Al alloy sheet. *Journal of Alloys and Compounds*, 824, 153943. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.153943>
- Lippold, J. C. (2015). *Welding metallurgy and weldability*. John Wiley & Sons, Inc.
- Lippold, J., Böllinghaus, T., & Cross, C. E. (2011). *Hot cracking phenomena in welds III*. Springer Science & Business Media.
- Liu, J., & Kou, S. (2017). Susceptibility of ternary aluminum alloys to cracking during solidification. *Acta Materialia*, 125, 513-523. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.12.028>
- Liu, Y., Teng, F., Cao, F. H., Yin, Z. X., Jiang, Y., Wang, S. B., & Shen, P. K. (2019). Defective GP-zones and their evolution in an Al-Cu-Mg alloy during high-temperature aging.

- Journal of Alloys and Compounds*, 774, 988-996. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.10.061>
- Maamar, H., Mohamed, K., Rafik, R. O., Toufik, F., Nabil, D., & Djilali, A. (2008). Heat treatment and welding effects on mechanical properties and microstructure evolution of 2024 and 7075 aluminium alloys. *Materiali in Tehnologije*, 42(1), 18.
- Mathers, G. (2002). *The Welding of aluminium and its alloys*. CRC Press.
- Miller, P. L., Lyttle, K. A., Neff, J. B., Steyer, D. A., & Pierce., K. G. (2013). Welding Gas Compositions and Method for Use (20150165565). Patent Application Publication. <https://patents.justia.com/patent/20150165565#history>
- Mohapatra, S., & Sarangi, H. (2016). Comparison between tungsten inert gas and friction stir welding in commercial aluminium alloy plates. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences*, 2(3), 1.485-1.490.
- Mondolfo, L. F. (1976). *Aluminium Alloys: Structure and Properties*. Butterworths.
- Mouritz, A. P. (2012). *Introduction to aerospace materials. Journal of the Korean Medical Association* (Vol. 55). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.5124/jkma.2012.55.7.649>
- Norman, A. F., Drazhner, V., & Prangnell, P. B. (1999). Effect of welding parameters on the solidification microstructure of autogenous TIG welds in an Al-Cu-Mg-Mn alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 259(1), 53-64. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(98\)00873-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0921-5093(98)00873-9)
- Prakash, S., Kumar, R. J. F., & Jerome, S. (2018). Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of CMT welded Aluminium alloy 2024. *Materials Today: Proceedings*, 5(13), 26.997-2.7003. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.09.003>
- Qi, Z., Qi, B., Cong, B., Sun, H., Zhao, G., & Ding, J. (2019). Microstructure and mechanical properties of wire + arc additively manufactured 2024 aluminum alloy components: As-deposited and post heat-treated. *Journal of Manufacturing Processes*, 40, 27-36. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.03.003>
- Soysal, T., & Kou, S. (2019). Effect of filler metals on solidification cracking susceptibility of Al alloys 2024 and 6061. *Journal of Materials Processing Technology*, 266, 421-428. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.11.022>
- Squillace, A., De Fenzo, A., Giorleo, G., & Bellucci, F. (2004). A comparison between FSW and TIG welding techniques: modifications of microstructure and pitting corrosion resistance in AA 2024-T3 butt joints. *Journal of Materials Processing Technology*, 152(1), 97-105. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.03.022>
- Tier, M., Santos, J. F. dos, Souza Rosendo, T. de, Mazzaferro, J. A. E., Mazzaferro, C. C. P., Strohaecker, T. R., Bergmann, L., Olea, C., & Silva, A. (2009, 13-17 de julio). A study about the mechanical properties of Alclad AA 2024 connections processed by friction spot welding 1 [conferencia]. 64.º Congresso Internacional da Associação Brasileira de Metalurgia, Belo Horizonte, Brasil. https://www.researchgate.net/publication/280081104_A_Study_About_the_Mechanical_Properties_of_Alclad_AA2024_Connections_Processed_by_Friction_Spot_Welding_1
- Vijay, S., Rajanarayanan, S., & Ganeshan, G. N. (2020). Analysis on mechanical properties of gas tungsten arc welded dissimilar aluminium alloy (Al2024 & Al6063). *Materials Today: Proceedings*, 21, 384-391. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.136>
- Wang, S. B., Liu, Z. R., Xia, S. L., Key, J., & Chen, J. H. (2017). Tetragonal-prism-like Guinier-Preston-Bagaryatsky zones in an AlCuMg alloy. *Materials Characterization*, 132, 139-144. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matchar.2017.08.014>

Conectividad de Internet en Colombia y su relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (2015-2020)

| Fecha de recibido: 26 de marzo del 2021 | Fecha de aprobación: 19 de abril del 2021 |

**Jenny Paola
Cervera Quintero**

Doctoranda en Administración y Políticas
Públicas, Universidad Nacional de Córdoba

Corporación Universitaria Minuto de Dios
Colombia

Grupo de investigación: Trabajo de Llano
Rol de investigador: teórico, experimental y escritura
<http://orcid.org/0000-0003-1255-7503>
✉ j.cervera@javeriana.edu.co

Cómo citar este artículo: Cervera Quintero, J. (2021). Conectividad de Internet en Colombia y su relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (2015-2020). *Ciencia y Poder Aéreo*, 16(1), 39-54. <https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaereo.705>



Conectividad de Internet en Colombia y su relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (2015-2020)

Resumen: En el presente artículo se hace un estudio cuantitativo de carácter exploratorio sobre el avance en conectividad de Internet en Colombia, dada su inclusión en los indicadores de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). De allí, surge como objetivo de investigación verificar el estado de avance de los ODS relacionados con conectividad en Colombia al 2020, a partir de la revisión de los indicadores específicos sobre el tema y los avances desarrollados por los Gobiernos en el periodo 2015-2020, con el fin de reducir la brecha de desigualdad en conectividad de zonas rurales y territorios apartados. Los resultados son alentadores y muestran efectividad estatal en este tema; no obstante, existen vacíos en la información que dificultan su evaluación. En las conclusiones, se ve el estado de avance en cada indicador, así como recomendaciones de actualización constante de las bases de datos respecto a los avances en gestión y su relación directa con cada ODS.

Palabras clave: desarrollo sostenible; información; Internet; ODS

Internet Access in Colombia and its Relationship with the Sustainable Development Goals (2015-2020)

Abstract: This article presents a quantitative and exploratory study on the advancement regarding Internet access in Colombia after its inclusion within Sustainable Development Goals (SDG) indicators. The research objective is to verify the progress made on the SDGs related to Internet connectivity in Colombia by 2020. For this purpose, we reviewed specific indicators on the subject and information on the goals reached by the national administrations during 2015-2020 in order to reduce the existing connectivity gaps in rural areas and remote territories. The results are encouraging and show the effectiveness of the Colombian State in this matter. However, there are some gaps in the available information that make it difficult to evaluate the whole situation. The conclusions reflect on the progress in each indicator and make recommendations for the continuous updating of the databases based on management improvements and their relationship with each SDG.

Keywords: Sustainable development; information; Internet; SDGs.

Conectividade da Internet na Colômbia e sua relação com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (2015-2020)

Resumo: No presente artigo faz-se um estudo quantitativo de caráter exploratório sobre o avanço na conectividade da Internet na Colômbia, dada a sua inclusão nos indicadores dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Daí resulta como objetivo de investigação verificar o estado de adiantamento dos ODS relacionados com a conectividade na Colômbia até 2020, com base na revisão dos indicadores específicos sobre o tema e os progressos realizados pelos governos no período 2015-2020, a fim de reduzir a brecha de desigualdade na conectividade das zonas rurais e dos territórios afastados. Os resultados são encorajadores e demonstram eficácia estatal nesta matéria, mas há lacunas na informação que dificultam a sua avaliação. Nas conclusões é evidenciado o estado de avanço em cada indicador, bem como recomendações de atualização constante das bases de dados sobre os avanços em gestão e sua relação direta com cada ODS.

Palavras-chave: desenvolvimento sustentável; informação; Internet; ODS

En el 2015, la Asamblea General de las Naciones Unidas —de la cual Colombia es miembro—, aprobó la Resolución A/RES/70/1 denominada “Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible”, que busca “establecer un plan de acción en favor de las personas, el planeta y la prosperidad. También tiene por objeto fortalecer la paz universal dentro de un concepto más amplio de la libertad” (Organización de las Naciones Unidas [ONU], 2015, p. 1). Para conseguirlo, se desarrollaron 17 objetivos de desarrollo sostenible (ODS) y 169 metas, con el fin de retomar los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM) y lograr lo que hasta ese momento no se había alcanzado.

Los ODS constituyen la agenda universal para llegar al 2030 con acciones en campos críticos para la humanidad y el planeta, mediante las siguientes cinco esferas:

- Las personas, enfatizando en la lucha contra la pobreza y el hambre; con elevar las capacidades y libertades en condiciones de igualdad, dignidad y un medioambiente saludable.
- El planeta, en su protección a partir de la producción, gestión y consumo sostenibles satisfaciendo las necesidades actuales y futuras.
- La prosperidad, para que las personas puedan vivir en condiciones prósperas y dignas y, el progreso económico, tecnológico y social en armonía con el planeta.
- La paz, en la firme decisión de generar sociedades pacíficas y justas, libres de temor y violencia. Con la firme convicción de un desarrollo sostenible en condiciones de paz.
- Las alianzas, basadas en la solidaridad mundial, enfocadas hacia las personas más vulnerables a partir de la participación de todos los países, partes y personas interesadas. De conseguir esta sinergia, se lograrían cambios notables en las vidas y se transformaría el mundo en un lugar mejor (ONU, 2015).

En Colombia, el Departamento Nacional de Planeación (DNP) lidera la Secretaría Técnica de la Comisión ODS, en cabeza de la Dirección de Seguimiento y

Evaluación de Políticas Públicas. En el 2015, esta entidad empezó sus labores con la inclusión de los objetivos en el Plan Nacional de Desarrollo (2014-2018) “Todos por un nuevo país”, con el fin de direccionar su ejecución y propiciarlos como herramienta para generar las condiciones adecuadas para el cumplimiento de los acuerdos de paz. En el mismo sentido, los integró a las metas de los planes de desarrollo territoriales (PDT) (2015-2019) de los 32 departamentos colombianos y 31 ciudades capitales (DNP, 2016).

El Gobierno colombiano desarrolló en el 2018 el Documento Conpes¹ 3.918 “Estrategia para la Implementación de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) en Colombia”, con el fin de direccionar las políticas del país hasta el 2030 y así avanzar en metas concretas que favorezcan el logro de dichos objetivos y, a la vez, consolidar avances en mejora de las condiciones de la población. Este documento establece una hoja de ruta para cada meta, incluyendo indicadores, entidades responsables y asignación de recursos para su consecución efectiva (DNP, 2018).

De acuerdo con este documento, para el 2015 el país había superado las metas proyectadas para el ODM 8 “Fomentar una sociedad mundial para el desarrollo”, así, la meta del acceso universal a las tecnologías de la información y las comunicaciones (TIC) con un número de 119 abonados móviles por cada 100 habitantes; y la meta de promedio en usuarios de Internet por cada 100 habitantes, que estaba definida en 60 usuarios, llegó a un promedio de 79 usuarios, y la meta de acceso a computadores llegó a 34 computadores por cada 100 habitantes, superando los 24 proyectados (DNP, 2018).

Aun así, el Conpes indica que, debido a la concentración de la medición en las ciudades, se genera una brecha respecto a las zonas rurales y territorios más apartados del país, por lo que se precisó como un reto necesario la garantía del acceso universal a Internet. Esto último indica la gran importancia de la conectividad de Internet en la consecución de cada ODS, puesto que la difusión de las TIC y la interconexión mundial aceleran el progreso humano, reducen la brecha digital y desarrollan sociedades de conocimiento (ONU, 2015).

1 Consejo Nacional de Política Económica y Social.

En palabras de Thiriat (2020), “las TIC pueden contribuir a todos y a cada uno de los 17 ODS”; esto se ve en el uso y la necesidad actual de la conectividad y eficacia del servicio de Internet para la ciudadanía y así avanzar en la garantía de los derechos de la población y la ampliación de sus capacidades: trámites, participación ciudadana, educación, salud, acceso a la información, ciudades inteligentes, aplicaciones para la industria manufacturera, avances científicos, tecnológicos, acceso al *e-commerce*, entre otros.

A continuación, se referencian los cuatro indicadores correspondientes a la conectividad de Internet en las metas de los ODS (tabla 1).

la brecha encontrada en el ODM 8, respecto a la conectividad a Internet en zonas rurales y territorios apartados al 2020?

Para contestar estos interrogantes se formuló el siguiente objetivo general: verificar el estado de avance de los ODS relacionados con conectividad de Internet en Colombia al 2020 y, de ese modo, establecer dos objetivos específicos: (1) verificar si al 2020 se cumplen las metas 9c, 17.8, 4a y 5b; (2) identificar los avances desarrollados por los Gobiernos colombianos en el periodo 2015-2020 para reducir la brecha encontrada en el ODM 8 respecto a la conectividad a Internet en zonas rurales y territorios apartados.

Tabla 1
Indicadores de los ODS que incluyen específicamente avances en la conectividad de Internet

ODS	Meta ODS	Nombre Meta ODS	Nombre del indicador	Línea base 2015	Meta intermedia al 2018	Meta proyectada al 2030
9. Industria, innovación e infraestructura	9.c	Aumentar significativamente el acceso a TIC y esforzarse por proporcionar acceso universal y asequible a Internet en los países menos adelantados de aquí al 2020.	Hogares con acceso a Internet.	41,8 %	49,9 %	100 %
	17.8		9.c / 17.8 Porcentaje de personas que usan Internet.	56 %	60 %	93 %
4. Educación de calidad	4.a	Construir y adecuar instalaciones educativas que tengan en cuenta las necesidades de los niños, las personas con discapacidad y las diferencias de género, y que ofrezcan entornos de aprendizaje seguros, no violentos, inclusivos, eficaces para todos.	Porcentaje de matrícula oficial con conexión a Internet.	74,1 %	90 %	100 %
5. Igualdad de género	5.b	Mejorar el uso de la tecnología instrumental, en particular la tecnología de la información y las comunicaciones, para promover el empoderamiento de las mujeres.	Porcentaje de mujeres que usan Internet.	86,7 %	90 %	93 %

Fuente: elaboración propia con base en “Anexo C. Seguimiento a metas trazadas por ODS”, Conpes (2018).

Planteamiento del problema

De acuerdo con el contexto anterior, las preguntas de investigación en este estudio son dos: ¿cuál es el estado de avance de las metas ODS que incluyen conectividad a Internet al 2020?, y ¿qué avances han desarrollado los Gobiernos colombianos para mitigar

En ese sentido, este artículo se organizó en seis apartados. El primero, la introducción, plantea el problema. El segundo, los referentes teóricos, se describe una definición de desarrollo, marco de los ODS, diferentes actores, estado de la Agenda 2030 en Colombia y acercamiento al ODS 9 desde la conectividad a Internet. El tercero presenta la metodología seleccionada

para responder las preguntas de investigación: cuantitativa de carácter exploratorio. El cuarto muestra los resultados en los cuales se desarrollan los cálculos y la metodología aplicada. El quinto da a conocer la discusión y análisis sobre los hallazgos obtenidos. Por último, el sexto expone las conclusiones del estudio.

Referentes teóricos

El concepto de desarrollo como marco de los ODS

La visión de desarrollo sostenible data de 1992, en la Conferencia sobre Desarrollo y Medio Ambiente de Río. Allí se presentó como una aspiración mundial la necesidad de favorecer la igualdad en torno al acceso de oportunidades, y la garantía de derechos de las presentes y futuras generaciones. Esta urgencia ha hecho que el desarrollo sostenible se convierta en cuestión de derechos humanos para eliminar todas las formas de discriminación, así como también la preservación del medioambiente para el futuro (Celi-Frugoni, 2020).

Amartya Sen habla sobre la responsabilidad de los estados en la urgencia de dignificar la vida de las personas a través de acciones que regulen y mitiguen los impactos del mercado. Así mismo, los mercados tienen responsabilidades socioambientales con los territorios en los que desarrollan sus actividades como contraprestación a las utilidades que les genera su operación, además de generar empleos de calidad. El Estado también tiene la responsabilidad de generar equidad y justicia social en respeto por las diferencias sociales, en contexto de democracia participativa en los que la libertad y la dignidad humana sean ejes fundamentales (Celi-Frugoni, 2020).

Cabe aclarar que el desarrollo sostenible está enmarcado en un contexto de liberalismo político y económico que cuenta con una reorientación ética hacia los principios mencionados. Así, los estados cooperan en la promoción de un sistema económico favorable que lleve al crecimiento económico de todos los países. Esta concepción es el marco teórico de la Agenda

2030. Amartya Sen es referencia para los gobernantes en la toma de decisiones equitativas en aras del bien común y la mitigación de los efectos de desigualdades profundas y corrupción en el tejido social. En esta forma de gobierno, el papel de la sociedad es relevante y oportuno, el control social y la *accountability* son parte esencial de la gobernanza (Zambam & Echevarría-Borba, 2020).

Alcanzar el desarrollo sostenible requiere de profundas transformaciones en el ámbito económico y social de cada país. Es un enfoque a largo plazo que implica la administración inteligente de los recursos para garantizar el futuro de la humanidad. Requiere de sinergia entre sistemas, comprensión de contextos, administración consciente de fuentes de energías renovables y no renovables, desarrollo del potencial económico con sostenibilidad y satisfacción de necesidades actuales sin comprometer a las generaciones futuras (Peña, 2018).

Otros actores

La consecución de los ODS no corresponde únicamente a las acciones gubernamentales de los Estados miembro de la ONU, pues no es suficiente. Para su consecución y buen término, deben existir sinergias entre el Gobierno, el sector privado, organismos internacionales, la academia y, en general, la ciudadanía desde la participación activa en cada etapa, debido a que es una agenda que permite llegar a un modelo de desarrollo consensuado en la sostenibilidad de la humanidad y del planeta (Perea, 2019).

Los procesos de cooperación internacional (CI) se llevan a cabo según el propósito de armonizar los intereses que pueden generar conflictos, por esto, todos los problemas que generan consecuencias globales deben contar con cooperación internacional para evitar que los países adopten visiones individualistas que pueden llevar a empeorar el inconveniente en sus territorios, así como originar otros en el sistema internacional. De esta manera, la CI se entiende como una herramienta para enfrentar desafíos mundiales a partir de la sinergia que le permite a los países

fortalecerse hasta alcanzar las metas, en este caso, la Agenda 2030 (Rueda, 2019).

En el plano internacional, los países del sur han desarrollado alianzas sur-sur y triangular, con el objetivo de cumplir la Agenda 2030. Para el 2018, Colombia obtuvo un puntaje levemente superior (66,6%) en comparación con el promedio de la región (66%); no obstante, y al ser parte de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), los esfuerzos deben ser aún mayores, pues el promedio de cumplimiento en esta organización es de 76,9%. Otro de los puntos que hacen de Colombia un país observado en el ámbito internacional son el destacado papel que tuvo en la Cumbre Río+20 en el 2012 y la firma del Acuerdo de Paz con las FARC-EP (Rueda, 2019).

Gracias a los avances vistos, Colombia ha dejado de ser un país que recibe cooperación de manera exclusiva para convertirse en un doble referente de recepción y oferta. Lo primero, para apoyar el éxito de la coyuntura del posconflicto, y lo segundo se debe a la fortaleza demostrada en temas de construcción de paz y seguridad para otros países del sur. Dentro del apoyo internacional buscado para lograr la Agenda 2030, Colombia ha pedido explícitamente la ayuda de actores multilaterales como la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (Cepal), la OCDE y la ONU (Rueda, 2019).

El sector privado puede desarrollar una función importante en la consecución de los ODS dada la generación de riqueza, empleo y desarrollo, que su propósito cumple en el país donde se encuentren. Por ello, algunos programas de responsabilidad social empresarial (RSE) abordan esta temática. No obstante, de acuerdo con estudios desarrollados en la materia, resulta que los programas están enfocados hacia formas tradicionales de entender el desarrollo, es decir, únicamente hacia el crecimiento económico sin detenerse en la concepción de la sostenibilidad. Se enfocan en necesidades urgentes con altas posibilidades de materialización de resultados inmediatos para mostrar (Pérez *et al.*, 2020).

De acuerdo con Porter y Kramer (citados en Pérez *et al.*, 2020), esta sería una estrategia corporativa que busca la licencia social, mas no un compromiso real

con la consecución de los ODS. Como consecuencia, se crean continuidades no constructivas que impiden la posibilidad de sincronizar acciones en conjunto que conduzcan a la Agenda 2030, y si esto ocurre en el área económica, que sería el foco de acción, la visión del desarrollo sostenible requiere de mayores esfuerzos debido a que está en sus manos el acatar las normas ambientales y cambiar sus esquemas de producción hacia formas más amigables con el planeta, específicamente en el entorno y comunidad en donde operan (Pérez *et al.*, 2020).

Lo anterior permite comprender a 2020 que la integralidad de los programas de RSE que dirigen sus esfuerzos hacia los ODS, desarrollan estas acciones sin ser conscientes de la naturaleza sistémica de la Agenda 2030, de manera tal que se desaprovechan las posibles sinergias entre actores, así como también aquellas enfocadas a cumplir un ODS específico y de esa manera contribuir a la consecución adicional de otros relacionados (Pérez *et al.*, 2020).

El sector académico puede contribuir a la Agenda 2030 desde las alianzas para la investigación y el fomento de los ODS; no obstante, en Colombia este actor no tiene un papel específico y hasta el momento no se ha visto como un actor comprometido, sino que se han visto algunas iniciativas individuales en torno a la consecución de las metas de los ODS, en cuanto a su investigación y desarrollo. Uno de estos actores ha sido la Universidad de Los Andes, quien actualmente es parte de la Red de Soluciones Sostenible de las Naciones Unidas liderada por la Universidad de Columbia. Esta alianza permite construir un centro de pensamiento para lograr conexiones que posibilitan el cumplimiento de los ODS en la región (Guette *et al.*, 2020).

La publicación *Sustainable Development Solutions Network*, de la Universidad de Cambridge propone los siguientes puntos clave para abordar los ODS desde las universidades: el aprendizaje y enseñanza para tomarse en serio la Agenda 2030; la investigación para el avance científico y la creación de nuevas aplicaciones tecnológicas para comprender las esferas de desarrollo sostenible y bienestar de la sociedad; el liderazgo social para fomentar nuevos líderes dirigidos hacia la Agenda 2030, y la sostenibilidad, la cual insta

sobre la responsabilidad de campus más sostenibles (Guette *et al.*, 2020).

La sociedad debe ser protagonista en los procesos de desarrollo, pues esta soluciona problemas habituales aun cuando los gobiernos no lo logran y, en estas respuestas generan procesos de innovación en los que sus valores y representaciones aportan a cambios transformadores. En los procesos de ODS, la sociedad civil puede participar a través de varias funciones: generadores, codesarrolladores o beneficiarios, y aportar su experiencia, conocimiento y necesidades en la formulación, implementación, veeduría y evaluación de proyectos y programas asociados a la Agenda 2030 (Hormecheas-Tapia *et al.*, 2020).

La sociedad posee un gran potencial innovador para el desarrollo de soluciones, el cual es vital para implementar políticas públicas transformadoras y ser parte más activa de los cambios que países como Colombia requieren. Uno de esos casos es el de Medellín durante la anterior década. Allí, la participación activa de la comunidad fue la fortaleza para lograr transformaciones de largo alcance. Fortalecer los movimientos de base con recursos, tecnología y participación activa en los procesos de ODS pueden generar grandes cambios y apoyar en la consecución de la Agenda 2030 (Hormecheas-Tapia *et al.*, 2020).

Resultados ODS al 2019

De acuerdo con la publicación de resultados del país en el índice de ODS para el 2019 desarrollada por el Observatorio Regional ODS, para ese año, Colombia se ubicó en la posición 9 de 24 países en los cuales es posible medir este indicador en la región con 64,75% de cumplimiento general. Fue superado por Chile, quien lidera la lista con 73,68%, Uruguay, Costa Rica, Ecuador, Argentina, Perú y Brasil, respectivamente. Colombia supera al promedio regional en 14 de los 17 objetivos y presenta rezago en tres: ODS 8 “Trabajo decente y crecimiento económico”, ODS 10 “Reducción de las desigualdades” y ODS 15 “Vida de ecosistemas terrestres” (Sánchez-Gómez, 2020).

Al revisar puntualmente los indicadores del ODS 9 “Industria, innovación e infraestructura”, en los que se

encuentra específicamente la conectividad a Internet, se puede observar en los indicadores 9.1 de población que utiliza Internet que Colombia estuvo por encima del promedio de la región y en el 9.2 sobre número de suscritos a banda ancha móvil, se encontró un rezago notorio de alrededor el 8% en relación con la región (Sánchez-Gómez, 2020).

Retos de la conectividad a Internet en Colombia

El derecho a la información busca la libertad para consultar, difundir, promover datos y contenidos en igualdad de condiciones, a través de cualquier herramienta o medio. Por ello es un derecho necesario para desarrollar la agencia de conocimiento y accionar otros derechos de primera, segunda y tercera generación; así como también para ejercer la democracia a partir de la participación ciudadana, el acceso a la cultura y el uso de las herramientas de Gobierno Abierto. Por lo tanto, tener dificultades o no acceder a la conectividad a Internet genera brechas en la garantía de derechos humanos de la población afectada (Alcalá, 2019).

Esta situación se manifiesta de manera más notoria en territorios rurales y apartados del país, debido a la acentuación de las brechas digitales. La brecha de acceso, que se mide entre quienes tienen acceso y quienes no; la brecha de uso, dada entre los que tienen acceso pero no hacen uso y la brecha de calidad de uso, a causa de la diferencia en la participación de los que tienen acceso y los que son usuarios. Los determinantes de estas brechas son la tecnología disponible, producto de la apropiación e infraestructura; la apropiación social de las TIC como resultado de su valor social; la capacidad de las personas para alcanzar beneficios de las TIC; las condiciones de desarrollo económico y distribución geográfica de las regiones y las características demográficas de la población (Peña-Gil *et al.*, 2017).

En zonas rurales, la posibilidad de contar con Internet permite que la comunicación sea mucho más rápida en lugares en los que antes era muy difícil comunicarse. De igual forma, la apertura de nuevos motores de desarrollo como el turismo y emprendimientos

orgánicos permiten nuevos mercados y, con ellos, la formación de empleos para las personas. De modo que la difusión de nuevos conocimientos y saberes originados en el agro pueden apoyar a la solución de problemas similares en otras regiones del país, promoviendo el desarrollo agropecuario del país, la educación para niños, niñas y adolescentes (NNA) y formación universitaria virtual para las regiones, entre otras ventajas (Felizzola-Cruz, 2010).

De esta manera, es un reto necesario para los gobiernos disminuir las brechas que se originan en las zonas apartadas del país. En ese sentido, en el Plan Nacional de Desarrollo (2018-2022), quedó como objetivo la generación de un modelo sostenible para la conectividad social en zonas urbanas y, en especial, en zonas rurales, así como el respaldo de la Ley 1978 de 2019 (Ley de Modernización Sectorial), que prioriza el acceso a las TIC por parte de la población en condición de vulnerabilidad socioeconómica, de territorios rurales y apartados del país. Propósitos para los cuales la Ley promovió programas para el acceso a TIC, promoción de servicios comunitarios que permitan el ejercicio de la ciudadanía y contribuyan a la disminución de la brecha digital, remoción de barreras para la divulgación de contenidos de interés general y el acceso a esta información por parte de comunidades étnicas (Martínez-Corral, 2019).

Así, el Gobierno colombiano estaría encaminado en la tarea de garantizar el acceso a Internet como derecho y la disminución de las brechas que impiden su garantía en zonas rurales y apartadas. Esto visto en su importancia para el acceso a los derechos a la educación y el trabajo, el fortalecimiento de la participación ciudadana, veeduría y control político (antes excluidos para esta población por factores geográficos y económicos) y la promoción de la libertad de expresión, difusión de pensamiento y opiniones y recibir información veraz, consagrados en la Constitución Política de Colombia (Valderrama-Castellanos, 2018).

COVID-19 y la conectividad a Internet

Teniendo en cuenta el contexto originado por la pandemia COVID-19, se han hecho más notorias las

disparidades en acceso a las TIC en territorios rurales y apartados dentro del territorio colombiano. El cierre de colegios y jardines trasladó la responsabilidad del acompañamiento de la educación de NNA a los hogares, especialmente a las madres. La garantía de educación disminuyó en la proporción al acceso a dispositivos como computadores, tabletas, celulares del grupo familiar y el bajo nivel educativo de los padres para guiar a sus hijos. Del mismo modo, la dificultad en el acceso a Internet en estos territorios, que es un problema estructural para la implementación de la educación digital necesaria en pandemia (Cediel *et al.*, 2020).

Las denuncias de violencia doméstica en áreas urbanas han sido mayores que las originadas en áreas rurales en el confinamiento. Esto se debe al subregistro que sufren las mujeres del agro por la dificultad de acceso a Internet, también a las rutas para efectuar sus denuncias. Además, las mujeres del agro no pueden reunirse en torno a sus costumbres comunitarias, lo que podría suplirse de contar con conectividad suficiente y acceso a la formación para su uso. En cuanto a la venta de sus cosechas, las plataformas electrónicas serían excelente estrategia; sin embargo, el agro no cuenta con suficiente conectividad, equipos, ni capacitación requerida para esta posibilidad (Cediel *et al.*, 2020).

Metodología

Este artículo se basa en una investigación cuantitativa, de naturaleza exploratoria. Se seleccionó este método con el fin de describir al 2020 el estado de avance de las acciones de los Gobiernos colombianos para aumentar la conectividad de Internet en el país, dados los ODS y los esfuerzos desarrollados para superar la brecha en la ruralidad y territorios apartados. Para Hernández-Sampieri, las ventajas de los estudios exploratorios radican en la posibilidad de abordar problemas poco estudiados, identificar conceptos importantes y preparar nuevos estudios a partir de la información obtenida (Hernández-Sampieri *et al.*, 2010).

Para la primera pregunta de investigación se revisará el impacto de las acciones gubernamentales desde el momento de la línea base de los ODS, relacionados con conectividad a Internet respecto a los últimos datos obtenidos. Las unidades de análisis son los indicadores de las metas correspondientes a conectividad en Internet 9.c, 17.8, 4.a y 5.b, respectivamente. Las hipótesis son proposiciones que relacionan dos o más variables con el ánimo de comprobarse empíricamente y luego verificar su valor en la realidad. Para este caso se plantearon las siguientes hipótesis:

- A 2020 el estado de avance de la conectividad de Internet en el país, medido por las metas de los ODS 4.a, 5.b, 9.c y 17.8, es acorde con la cifra proyectada para ese año.
- Los avances desarrollados por los gobiernos colombianos en el periodo 2015-2020 disminuyen las brechas de conectividad en áreas rurales y territorios apartados del país.

Resultados

Los cálculos desarrollados se basaron en la información obtenida de las cifras de línea base y meta intermedia del Conpes 3918 y del Informe Anual de Avance en la Implementación de los ODS en Colombia-2020,

desarrollado por el DNP. Para entender los valores y cálculos es necesario conocer las siguientes condiciones: los ODS se desglosan en metas, que a su vez se miden en indicadores. Los datos del Informe ODS al 2020 provienen de diferentes años (2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018 y 2019). Se tomó al 2018 como año de referencia puesto que de este provienen los últimos datos de los indicadores de las metas de conectividad a Internet (es decir, no se cumple con la medición al 2020 por ausencia de datos oficiales).

Los indicadores se calculan de acuerdo a su medida de acumulación, de allí se clasifican cuatro categorías: reducción, flujo, capacidad y acumulado. Las metas de reducción corresponden a aquellas que minimizan condiciones adversas como la incidencia de la pobreza monetaria, las tasas de mortalidad, entre otros. Las metas de flujo son las que se renuevan anualmente, como el porcentaje de matrícula oficial con conexión a Internet. Las metas de capacidad se relacionan con la cobertura, este tipo se usa de manera exclusiva para el indicador 7.1.1.C. correspondiente a la cobertura de energía eléctrica. Finalmente, las metas de acumulado conciernen a crecimiento de condiciones deseadas como el porcentaje de personas que usan Internet, hogares con acceso a Internet y porcentaje de mujeres que usan Internet (DNP, 2020).

Para responder al primer interrogante de investigación se desarrolló la tabla 2, la cual arroja la siguiente información:

Tabla 2
Avance de las metas ODS que incluyen específicamente mejoras en la conectividad de Internet al 2020

ODS	Meta ODS	Nombre del indicador	Línea base 2015	Meta intermedia al 2018	Último dato disponible al 2018	Avance respecto a línea base 2015	Avance respecto a meta intermedia al 2018
9. Industria, innovación e infraestructura/	9.c	Hogares con acceso a Internet.	41,80 %	49,90 %	53,18 %	11,38 %	3,28 %
	9.c / 17.8	Porcentaje de personas que usan Internet.	56,00 %	60,00 %	64,00 %	8,00 %	4,00 %
17. Alianzas para lograr los objetivos							
4. Educación de calidad	4.a.	Porcentaje de matrícula oficial con conexión a Internet.	74,10 %	90,00 %	70,00 %	-4,10 %	-20,00 %
5. Igualdad de género	5.b.	Porcentaje de mujeres que usan Internet.	55,20 %	60,60 %	64,99 %	9,79 %	4,39 %

Fuente: elaboración propia con base en "Anexo C. Seguimiento a metas trazadas por ODS", Conpes (2018) y DNP (2020).

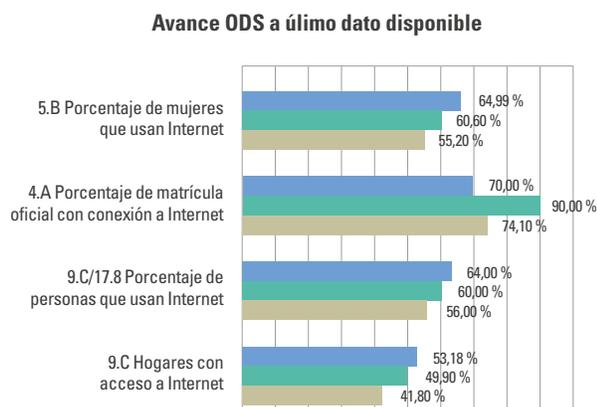


Figura 1. Porcentaje de avance de las metas relativas a conectividad de Internet

Fuente: elaboración propia.

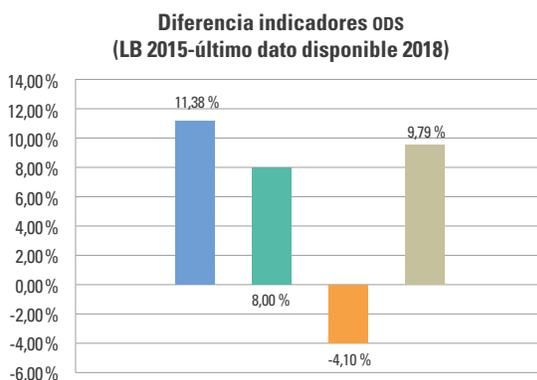


Figura 2. Porcentaje de avance de las metas relativas a conectividad de Internet

Fuente: elaboración propia.

De esta manera se obtiene que en el estado de avance de los indicadores de conectividad al 2018, se cumplió con la meta 9.c desde el indicador “hogares con acceso a Internet” con un 53,18 % cuando la meta intermedia a ese año era de 49,90 %, y el avance desde el 2015 fue de 11,38 %. Respecto a las metas 9.c y 17.8 en su indicador “porcentaje de personas que usan Internet” se llegó al 64 % cuando la meta intermedia a ese año era de 60 %, con un avance desde el 2015 de 8 %. Respecto a la meta 4.a en el indicador “porcentaje de matrícula oficial con conexión a Internet” se obtuvo un 70 % cuando la meta para el 2018 era de 90 %, adicional se obtuvo una disminución desde el 2015 de -4 %. Ahora, respecto a la meta 5.b en el indicador

“porcentaje de mujeres que usan Internet”, se llegó a 64,99 % cuando la meta intermedia se posicionaba en 60,6 % con un avance desde el 2015 de 9,79 %.

Se observa cómo a metas intermedias al 2018, los resultados sobrepasaron el valor estimado salvo para el indicador de la meta 4.a “porcentaje de matrícula oficial con conexión a Internet”, en el cual no se logró la meta de flujo intermedia, sino que se encontró un rezago respecto a la línea base. Al indagar más sobre este indicador, que se mide a partir de los datos producidos cada año, se encontró que para el 2016 el porcentaje logrado fue de 78,30 %, en el 2017 disminuyó a 62,63 % y en el 2018 subió a 70,30 %. Estos resultados se obtienen de las fuentes de información que llegan al Ministerio de Educación provenientes de las secretarías de educación por departamento (Ministerio de Educación Nacional, 2021).

No obstante, la situación de accesibilidad a Internet en Colombia se asemeja a la del mundo entero, pues de acuerdo al Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible elaborado por la ONU para el 2019, de manera mundial la conectividad a Internet está por encima del 90 %, lo que implica que casi toda la población mundial tendría acceso a Internet, por lo menos en una red (3G). Sin embargo, y aunque esta cifra es alentadora, no todos están en capacidad de aprovecharla, dejando el indicador de personas que usan Internet aproximadamente a la mitad. Esto implica esfuerzos gubernamentales y de los prestadores de servicio para disminuir los costos del acceso a Internet de banda ancha y llegar a los lugares donde es más difícil acceder por situación geográfica o contexto social (ONU, 2019).

Así mismo, este informe indica que gracias al acceso a redes de banda ancha se obtiene un efecto positivo en la economía mundial, con una relación de aumento del 1 % en proporción al 0,08 % del PIB, lo que sumado a las condiciones mencionadas en el marco teórico respecto a los retos de conectividad a Internet en Colombia, en términos generales y con ocasión de la pandemia COVID-19, generó aumento en el acceso a educación, disminución de brechas digitales, mayor acceso a garantía de derechos, entre otros (ONU, 2019).

De acuerdo con el informe “Resultado de Colombia, índice ODS de 2019” (Sánchez-Gómez, 2020), el indicador del porcentaje de la población que usó Internet es levemente superior en el país respecto a la región (menos de dos puntos porcentuales), lo mismo sucedió para sus ODS correspondientes, los objetivos 9 y 17. Para ese análisis, el autor tomó como región a los países de América Latina y del Caribe con las últimas cifras que ofrecen las entidades oficiales colombianas en el 2018.

Las fuentes oficiales de información sobre conectividad en Colombia ofrecen datos únicamente hasta el 2018. Esta situación evidencia que el manejo y publicación de datos en el país no es óptimo, pues, aunque se encontró un informe de gestión de ODS para el 2020, sus datos no estaban actualizados, por lo cual no se puede revisar el comportamiento del periodo 2015-2020 como se había planteado inicialmente. También es difícil evidenciar el nivel de avance sobre metas de conectividad a 2030 y cuantificar la efectividad de las acciones del Gobierno del 2018 a la fecha. Esta falencia afecta directamente la política de datos abiertos a la cual se comprometió Colombia desde el 2011, al ser parte de la Alianza para Gobierno Abierto promovida por el Gobierno de Obama en los Estados Unidos (Alianza Gobierno Abierto Colombia, 2021).

Para responder a la segunda pregunta, se tomaron los datos de los Informes de Gestión para el Congreso que el Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (MinTIC) del 2015 al 2020. De esta manera se logró medir la continuidad en algunas de las iniciativas desarrolladas por los gobiernos correspondientes a ese periodo.

Dentro de las acciones enfocadas a disminuir la brecha de conectividad, se encuentran:

- El Proyecto Nacional de Fibra Óptica. Tiene como meta conectar los 1.122 municipios a partir de la oferta de operadores privados y de servicios públicos sin costo, en diferentes zonas de los municipios, instituciones públicas, de educación, Centros Vive Digital y Kioscos Vive Digital.
- Los puntos Vive Digital. Son centros comunitarios de TIC dentro de las ciudades y municipios

para el uso primordial de personas con dificultades socioeconómicas, allí se desarrollan servicios de capacitación y formación en informática, desarrollo de trámites virtuales de Gobierno electrónico y acceso ilimitado de Internet con los objetivos primordiales de educación y trabajo.

- Los Kioscos Vive Digital. Proveen de Internet a centros poblados de territorios rurales con más de 100 habitantes y cabeceras municipales ubicadas en las zonas más apartadas de Colombia.
- La entrega de tabletas y computadores a instituciones educativas públicas, NNA y docentes.
- Conexiones digitales. Este proyecto brinda el servicio de Internet a instituciones públicas y a hogares de bajos ingresos (viviendas VIP, estratos 1 y 2) a través de tarifas subsidiadas.
- Proyecto Nacional de Conectividad de Alta Velocidad. Está destinado a llevar conectividad a los departamentos del país con mayor dificultad geográfica de acceso con soluciones inalámbricas (MinTIC, 2015).
- Zonas digitales. Zonas de Internet público y gratuito con cobertura de 7.200 metros cuadrados (MinTIC, 2019).

En la tabla 3 están recopilados los datos de las acciones gubernamentales de los gobiernos 2014-2018 y 2018-2022. Se puede observar cómo algunas de las iniciativas se mantuvieron en el tiempo, el Proyecto Nacional de Conectividad de Alta Velocidad de Soluciones Inalámbricas, los Kioscos Vive Digital y la entrega de tabletas y computadores. De la iniciativa de conexiones digitales, solo se encontró información para los dos primeros años de estudio, el Programa Nacional de Fibra Óptica generó resultados desde el 2017 y la iniciativa de Zonas Digitales que se originó en el 2019. Es de aclarar que de acuerdo con el Informe de ese año, fue un tiempo destinado a la programación de nuevas metas y compromisos del Gobierno 2018-2022 y la decisión de continuidad de iniciativas de conectividad provenientes del anterior Gobierno, plasmadas en el Eje de Inclusión Social Digital (MinTIC, 2019).

Tabla 3

Acciones para reducir la brecha digital en zonas rurales y apartadas del país (2015-2020)

Iniciativa	Año 2015	Año 2016	Año 2017	Año 2018	Año 2019	Año 2020
Puntos Vive Digital	889	872	894	930		
Kioscos Vive Digital	5.524	6.755	6.968	7.142	4.407	1.231
Tabletas y computadores	2.000.000	2.504.624	3.500.719	4.340.121	4.544.299	4.727.644
Conexiones digitales	45.000	89.497				
Proyecto Nacional de Conectividad de Alta Velocidad Soluciones Inalámbricas	1.078	1.106	1.168	786	815	
Proyecto Nacional de Fibra Óptica			788	788	788	911
Zonas digitales					2	522

Fuente: elaboración propia con datos del MinTIC (2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020).

Puntos vive digital



Figura 3. Avance Puntos Vive Digital instalados

Fuente: elaboración propia.

El número de Puntos Vive Digital creció de 889 a 930 del 2015 al 2018, llegando a 30 de los 32 departamentos del país (MinTIC, 2018). En el 2019 y el 2020 no se reporta información al respecto, por lo que no se conoce sobre su continuidad, eliminación o desarrollo de un nuevo programa con propósitos similares.

Kioscos vive digital

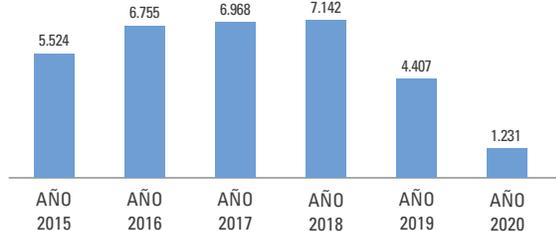


Figura 4. Avance Kioscos Vive Digital instalados

Fuente: elaboración propia.

Del 2015 al 2018, los Kioscos Vive Digital llegaron a 945 de los 1.122 municipios del país, en los 32 departamentos. Esta iniciativa fue extendida en parte por el

siguiente Gobierno, reportándose para el 2020 un cumplimiento de 1.231 Kioscos ubicados por todo el territorio nacional.

Tabletas y computadores

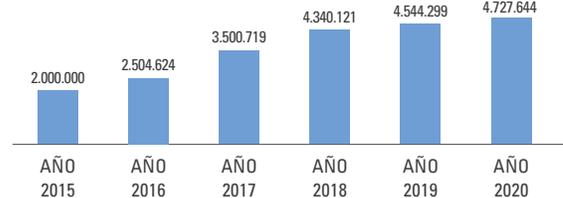


Figura 5. Avance tabletas y computadores entregados

Fuente: elaboración propia.

Del 2015 al 2020, la iniciativa de entregar tabletas y computadores a estudiantes, docentes y planteles educativos se ha mantenido. De allí que en seis años se pasara de 2.000.000 de dispositivos entregados a 4.727.644, lo cual disminuye la brecha de conectividad a Internet, pues significa que se han brindado equipos a aproximadamente el 10 % de la población del país.

Conexiones digitales



Figura 6. Conexiones digitales

Fuente: elaboración propia.

El número de conexiones digitales aumentó de 45.000 a 146.918 entre el 2015 y el 2018. Se reportaron dificultades por parte del operador en el 2015 por problemas de seguridad en zonas apartadas, impidiendo la instalación de 10.081 puntos más. En el informe del 2019 se evidencia el interés por continuar y preparar de un nuevo escenario para su contratación e implementación (Mintic, 2020).

Proyecto nacional de conectividad de alta velocidad soluciones inalámbricas (municipios)



Figura 7. Municipios cubiertos con conectividad inalámbrica
Fuente: elaboración propia.

El proyecto nacional de alta velocidad ha presentado un decrecimiento, pasó de 1.078 municipios en el 2015 a 815 en el 2019. Esto se explica por el cambio de cobertura de estos territorios a soluciones en fibra óptica.

Proyecto nacional de fibra óptica (municipios y zonas alcanzadas)



Figura 8. Municipios cubiertos con fibra óptica
Fuente: elaboración propia.

Esta iniciativa nació en el 2017 (Mintic, 2017) posterior a los acuerdos de paz y se mantuvo en el mismo número durante tres años. En el 2020 aumentó el número de 788 a 911 municipios y zonas alcanzadas, especialmente en aquellos identificados como programas de desarrollo con enfoque territorial (PDET).

Este proyecto tuvo dos zonas digitales en el 2019 y aumentó su cobertura a 522 zonas en 451 municipios en el 2020. De esta manera, la población puede conectarse sin costo, desde sus dispositivos a esta red con 30 Mbps (Mintic, 2020).

Zonas digitales

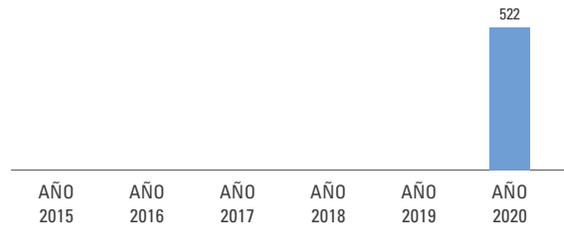


Figura 9. Municipios cubiertos con zonas digitales
Fuente: elaboración propia.

Las anteriores acciones han sido desarrolladas por los gobiernos colombianos en el periodo 2015-2020, con el fin de brindar garantía de acceso a Internet en todos los municipios y zonas apartadas del país. Como se ha observado, algunas iniciativas se han mantenido en el tiempo y existen programas en implementación que tienen por objetivo trabajar en la reducción de esta brecha. Aun así, es difícil cuantificar el impacto de estas acciones sin contar con datos al 2020 e información respecto a la continuidad o cambio sobre las iniciativas. De igual manera, se conoce que el tiempo de pandemia ha exigido a los Gobiernos celeridad en la aplicación de iniciativas para garantizar el derecho a la información.

Conclusiones

La Agenda 2030 compone la línea de acción para los Estados miembro de las Naciones Unidas. Esta implica la necesidad de desarrollar un modo de producción y vida sostenible en el presente, garantizando lo mismo para generaciones futuras, basados en la dignidad humana, la conservación del planeta y la prosperidad económica. Esta triada busca disminuir las desigualdades sociales, económicas y de poder.

El presente estudio exploratorio abordó la conectividad de Internet y su relación con los ods como temática. De allí se intentó responder al avance en las metas ods al 2020; sin embargo, dado que los últimos datos oficiales provienen del 2018, se puede dar respuesta solo a ese año. Así, se encuentra que los indicadores 9.c y 17.8 correspondientes al número de

hogares con acceso a Internet, medidos por acumulación, sobrepasó en 3,28% la meta intermedia proyectada para ese año. Con el indicador 9.c en porcentaje de personas que usan Internet, medido por acumulación, también sobrepasó a la meta intermedia en 4%.

El indicador 4.a correspondiente al “porcentaje de matrícula oficial con conexión a Internet”, medido por flujo, tuvo un valor inferior a la meta proyectada para ese año en -20%, lo que indica que para el 2018 el número de NNA matriculados disminuyó respecto a los años anteriores y a su proyección. El indicador 5.b, correspondiente al “porcentaje de mujeres que usan Internet”, fue superior a la meta estimada para ese año en 4%. Por lo tanto, se puede decir que, salvo la meta correspondiente al indicador 4.a., todas aquellas correspondientes a conectividad de Internet fueron superiores a la meta proyectada para el 2018.

Para esta respuesta se hace necesario aclarar que cada indicador de las metas ODS no se miden a través de un único método, sino que corresponden a cuatro clasificaciones: flujo, reducción, acumulación y capacidad, motivo por el que se deben analizar por unidad y no en conjunto, así, cada meta indicada contribuye al cumplimiento de su ODS respectivo. La meta 5.b para el ODS 5 “Igualdad de género”, la meta 9.c con sus dos indicadores para el ODS “Industria, innovación e infraestructura” y el 17.8 para el ODS 17 “Alianzas para lograr los objetivos”.

Esta particularidad en la medición encontrada en la investigación da pie para nuevos estudios en los cuales se pueda profundizar y encontrar correlaciones y causalidades que expliquen de manera más detallada el impacto de las acciones de gobierno en el logro de los ODS así como su interrelación.

En cuanto a la segunda pregunta, se encuentra que luego del 2015 el Gobierno nacional desarrolló una serie de esfuerzos para llegar a territorios apartados y zonas rurales, alcanzando la cobertura de los 32 departamentos a partir de diferentes iniciativas: el Proyecto Nacional de Fibra Óptica, Proyecto Nacional de Conectividad de Alta Velocidad Soluciones Inalámbricas, Kioscos Vive Digital, Puntos Vive Digital y la entrega de tabletas y computadores. Así mismo, en el empalme e inicio de Gobierno en 2018-2019 se

encontró continuidad en cuatro de estas iniciativas y la creación del Eje de Inclusión Social Digital, en el cual se encuentra el proyecto en ejecución de la inclusión de zonas wifi y la programación de nuevas soluciones para continuar en la ampliación de cobertura de Internet en el territorio colombiano.

De esa manera se describen las acciones gubernamentales desarrolladas para reducir la brecha encontrada en el ODM 8. Esta pregunta también abre la posibilidad para nuevos estudios, enfocados hacia evaluaciones de impacto de los programas desarrollados sobre el número de beneficiarios y condiciones de calidad en la conectividad de la población alcanzada.

Como recomendación para los Gobiernos y sus entidades, surge la actualización constante del avance en las metas ODS, de manera tal que los *stakeholders* —población, entidades gubernamentales, academia, sector privado y organismos internacionales— puedan contar con esta información y así contribuir en la consecución de estos logros. Por último, la actualización de estos datos permite que el país mantenga su posicionamiento en los estándares de Gobierno Abierto como garantía de un Estado Social de Derecho.

Declaración de conflicto de interés: La autora no manifiesta conflictos de interés institucionales ni personales.

Referencias

- Alcalá, M. (2019). Desigualdad en el acceso a Internet en México y la afectación en el ejercicio del derecho humano a la información. *Nuevo Derecho*, 15(24), 55-70. <https://doctrina.vlex.com.co/vid/desigualdad-acceso-internet-mexico-808437945>
- Alianza Gobierno Abierto Colombia (2021, 22 de abril). ¿Qué es la Alianza para el Gobierno Abierto? *Alianza Gobierno Abierto Colombia*. <https://agacolombia.org/acerca-de/>
- Caballero, K., & Ferrer, J. (2011). *Evaluación de políticas públicas con microsimulaciones*. Cepal.
- Cediel, N., Sánchez, M., Sánchez, D., & Castro, P. (2020). Pandemia de COVID-19: obstáculo para el logro de la equidad de género y el cierre de la brecha urbano-rural en

- Colombia. *Revista de la Universidad de la Salle*, 123-144. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.22265.29288>
- Celi-Frugoni, A. (2020). Desarrollo sostenible y enfoque de las capacidades desde una perspectiva de género: contribuciones de las teorías de Amartya Sen y Martha C. Nussbaum. En N. Zambam & H. A. Kujawa (Eds.), *Estudios sobre Amartya Sen* (pp. 75-91). Editorial FI.
- Departamento Nacional de Planeación (2016). *Inclusión de los ODS en los Planes de Desarrollo Territorial, 2016-2019*. DNP. https://assets.ctfassets.net/27p7ivvbl4bs/6jh0CeselwW2gkocYuAeq6/c4929c8e51b711858254f30cb9aac57a/ODS_en_los_PDT.PDF
- Departamento Nacional de Planeación (2018). *Documento CONPES 3918. Estrategia para la implementación de los Objetivos de Desarrollo Sostenible*. DNP. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3918.pdf>
- Departamento Nacional de Planeación (2020). *Informe Anual de Avance en la Implementación de los ODS en Colombia - 2020*. DNP. <https://ods.gov.co/es/resources>
- Felizola-Cruz, Y. M. (2010). Tecnologías de información y comunicación para el desarrollo rural en Colombia. *Economía, gestión y desarrollo*, 10, 97-124. <https://revistas.javerianacali.edu.co/index.php/economia/article/view/387>
- Guette, A., Sánchez, A., Llanos, D., Rojano, G., & Quintero, V. (2020). El rol de la academia en el cumplimiento de la agenda 2030. *Investigación y desarrollo en TIC*, 11(2), 38-48. <http://revistas.unisimon.edu.co/index.php/identific/article/view/4934>
- Hernández-Sampieri, R., Fernández-Collado, C., & Baptista-Lucio, M. (2010). *Metodología de la Investigación*. (5.ª Edición). McGraw-Hill.
- Hormecheas-Tapia, K., Legarda-López, M., Ruiz-Castañeda, W., & Villalba-Morales, M. (2020). Participación de la sociedad civil en las dinámicas de innovación para el logro de los ODS. Un marco de análisis. *Iberoamerican Journal of Development Studies*, 9(1), 120-145. https://doi.org/10.26754/ojs_ried/ijds.435
- Martínez-Corral, P. (2019). Autogestión y asistencialismo: dos extremos del debate sobre el acceso a Internet en zonas rurales colombianas. *Revista Lumen Gentium*, 3(2), 9-22. <http://revistas.unicatolica.edu.co/revista/index.php/LumGent/article/view/219>
- Ministerio de Educación Nacional (2021). *Porcentaje de Matrícula oficial con conexión a Internet*. Ministerio de Educación Nacional. <https://www.mineducacion.gov.co/portal/micrositios-institucionales/Conexion-Total-en-Conexion-Total-en-Cifras/348154:Porcentaje-de-Matricula-oficial-con-conexion-a-Internet>
- MINTIC (2015). *Informe de gestión al Congreso de la República de Colombia 2015*. Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. https://www.mintic.gov.co/portal/715/articles-124549_doc_pdf.pdf
- MINTIC (2017). *Informe de Gestión al Congreso de la República de Colombia 2016*. Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. https://www.mintic.gov.co/portal/715/articles-124509_doc_pdf.pdf
- MINTIC (2018). *Informe de Gestión al Congreso de la República de Colombia 2017*. Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones.
- MINTIC (2019). *Informe de Gestión al Congreso de la República de Colombia 2018-2019*. Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. https://www.mintic.gov.co/portal/715/articles-124506_doc_pdf.pdf
- MINTIC (2020). *Informe de Gestión al Congreso de la República de Colombia 2019-2020*. Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. https://www.mintic.gov.co/portal/715/articles-152219_doc_pdf.pdf
- Organización de las Naciones Unidas (2015). *Resolución 70/1. Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo sostenible*. Naciones Unidas. https://unctad.org/system/files/official-document/ares70d1_es.pdf
- Organización de las Naciones Unidas (2019). *Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Naciones Unidas. https://unstats.un.org/sdgs/report/2019/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2019_Spanish.pdf
- Peña-Gil, H., Cuartas-Castro, K., & Tarazona-Bermúdez, G. (2017). La brecha digital en Colombia: un análisis de las políticas gubernamentales para su disminución. *Redes de Ingeniería*, 59-71.
- Peña, C. (2018). *Las ciencias sociales: múltiples enfoques*. Universidad Central de Venezuela.
- Perea, L. (2019). Los objetivos de desarrollo sostenible y su inclusión en Colombia. *Revista Producción+Limpia*, 14(1), 122-127. <https://doi.org/10.22507/pml.v14n1a8>
- Pérez, O., Romero, M. C., & Vargas, P. (2020). Interacciones y sinergias entre ODS: un análisis desde la responsabilidad social en Colombia. *Revista Desarrollo y Sociedad*, (86), 191-244. <https://doi.org/10.13043/DYS.86.6>
- Rueda, F. M. (2019). Cooperación Internacional para el Desarrollo y Estrategias Nacionales para el cumplimiento de los ODS. Aproximaciones a los casos de Colombia y Chile. *Revista Internacional de Cooperación y Desarrollo*, 6(1), 179-195.

Sánchez-Gómez, J. (2020). *Resultados de Colombia índice ODS 2019. Más rezagos que objetivos cumplidos*. Observatorio Regional de los ODS. <https://doi.org/10.21500/23825014.3770>

Thiriat, P. (2020). *Análisis de la incidencia asociada a TIC en la medición de la pobreza multidimensional en Colombia* [Tesis de maestría, Pontificia Universidad Javeriana de Colombia]. <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/49044>

Valderrama-Castellanos, D. E. (2018). *El acceso a Internet como Derecho Fundamental: Caso costarricense y su viabilidad en Colombia*. Universidad Católica de Colombia. <https://doi.org/10.14718/NOVUMJUS.2018.12.2.9>

Zambam, N., & Echevarría Borba, J. (2020). Amartya Sen: abordagem introdutória sobre escolhas coletivas e sociais. En N. Zambam & H. Kujawa, *Estudos sobre Amartya Sen* (pp.14-27). Editorial FI.

Diseño de aeronave de combate no tripulada de quinta generación para el apoyo aéreo cercano

| Fecha de recibido: 2 de marzo del 2021 | Fecha de aprobación: 8 de abril del 2021 |

Esteban Morales Aguirre

Estudiante de Ingeniería Aeronáutica

Universidad Pontificia Bolivariana
Colombia

Semillero de Investigación en Ingeniería Aeroespacial

Rol de investigador: teórico, experimental y escritura

<http://orcid.org/0000-0001-7054-7376>

✉ estanimation1@hotmail.com

Mateo Duarte García

Estudiante de maestría en Energía

Universidad Pontificia Bolivariana
Colombia

Semillero de Investigación en Ingeniería Aeroespacial

Rol de investigador: teórico, experimental y escritura

<https://orcid.org/0000-0002-9926-3104>

✉ mateoduartegarcia@yahoo.es

Esteban Paniagua García

Estudiante de Ingeniería Aeronáutica

Universidad Pontificia Bolivariana
Colombia

Semillero de Investigación en Ingeniería Aeroespacial

Rol de investigador: teórico, experimental y escritura

<https://orcid.org/0000-0003-1734-1736>

✉ esteban.paniaguag@upb.edu.co

Daniel Enrique Aldana Lopera

Estudiante de Ingeniería Aeronáutica

Universidad Pontificia Bolivariana
Colombia

Semillero de Investigación en Ingeniería Aeroespacial

Rol de investigador: teórico, experimental y escritura

<https://orcid.org/0000-0003-1351-6025>

✉ danielenrique.aldana@mail.polimi.it

Javier Mauricio Sabogal Jaramillo

Estudiante de Ingeniería Aeronáutica

Universidad Pontificia Bolivariana
Colombia

Semillero de Investigación en Ingeniería Aeroespacial

Rol de investigador: teórico, experimental y escritura

<https://orcid.org/0000-0003-3625-0709>

✉ javier.sabogal@upb.edu.co

Jorge Elias Montoya Vélez

Docente de cátedra

Universidad Pontificia Bolivariana
Colombia

Semillero de Investigación en Ingeniería Aeroespacial

Rol de investigador: escritura

<https://orcid.org/0000-0002-0006-7841>

✉ jorgeelias.montoya@upb.edu.co

Juan Pablo Alvarado Perilla

Docente de tiempo completo

Universidad Pontificia Bolivariana
Colombia

Semillero de Investigación en Ingeniería Aeroespacial

Rol de investigador: teórico y escritura

<https://orcid.org/0000-0001-5257-6093>

✉ juan.alvarado@upb.edu.co

Cómo citar este artículo: Morales Aguirre, E., Duarte García, M., Paniagua García, E., Aldana Lopera, D. E., Sabogal Jaramillo, J. M., Montoya Vélez, J. E., & Alvarado Perilla, J. P. (2021). Diseño de aeronave de combate no tripulada de quinta generación para el apoyo aéreo cercano. *Ciencia y Poder Aéreo*, 16(1), 55-74, <https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaereo.693>



Diseño de aeronave de combate no tripulada de quinta generación para el apoyo aéreo cercano

Resumen: La evolución en el diseño de aeronaves de combate se ha visto modificada por la inclusión de nuevos parámetros de alta exigencia, dentro de los cuales se incluyen las áreas de investigación relacionadas con la aerodinámica, la furtividad y la optimización en los procesos de operación. El presente artículo contempla el diseño de un Vehículo de Combate Aéreo no Tripulado (UCAV) para la ejecución de misiones de Apoyo Aéreo Cercano (CAS por sus siglas en inglés) en las próximas décadas. Los resultados obtenidos demuestran las habilidades de los UCAV como aeronaves de quinta generación para el reemplazo de flotas reconocidas mundialmente (A-10 Thunderbolt II y Sukhoi Su-25) y, además, garantiza su utilidad y viabilidad en los futuros entornos de combate. Así mismo, la investigación se enfoca en una de las variables de mayor discusión respecto a la supervivencia en el combate aéreo, se trata de la furtividad por fenómenos electromagnéticos, con la cual se obtuvieron valores de Sección Equivalente de Radar (RCS) iguales a $-24,18$ dBsm o representables en un área de detectabilidad de $0,0038$ m² en configuración limpia, de modo que este valor es inferior al de aeronaves furtivas como lo es el Northrop Grumman B-2 Spirit. Finalmente, el diseño permite la operación con un máximo peso de despegue de 61,900 lb y una carga paga de 11,240 lb que se acondicionan a una configuración alar y de estabilizadores para rangos transónicos.

Palabras clave: aeronave no tripulada; apoyo aéreo cercano; furtividad; militar.

Design of a Fifth Generation Unmanned Fighter Aircraft for Close Air Support

Abstract: The evolution of combat aircraft design has been modified by the inclusion of new highly demanding parameters within the research areas of aerodynamics, stealth, and operating processes optimization. Hence, this article presents the design of an unmanned combat aerial vehicle (UCAV) for the execution of close air support (CAS) missions in the forthcoming decades. The results achieved prove the abilities of UCAVs as fifth-generation aircrafts for the replacement of internationally recognized air fleets (A-10 Thunderbolt II and Sukhoi Su-25) and, likewise, ensure their usefulness and feasibility in future combat environments. This research focuses on one of the most widely discussed variables in air combat survival, that is, stealth due to electromagnetic phenomena, for which we obtained a radar cross-section (RCS) value of -24.18 dBsm, represented in a detectability area of 0.0038 m² in clean configuration, that is lower than the reported by stealth aircrafts such as the Northrop Grumman B-2 Spirit. The design of the proposed aircraft allows operation with a maximum takeoff weight of 61,900 lbs. and a maximum payload of 11,240 lbs., retrofitted to a wing and outrigger configuration for transonic ranges.

Keywords: Unmanned aircraft; close air support; stealth; military.

Projeto de aeronave de combate não tripulada de quinta geração para apoio aéreo próximo

Resumo: A evolução na concepção de aeronaves de combate foi modificada pela inclusão de novos parâmetros de alta exigência, incluindo as áreas de investigação relacionadas com a aerodinâmica, a furtividade e a otimização dos processos operacionais. O presente artigo contempla o desenho de um Veículo de Combate Aéreo Não Tripulado (UCAV) para a execução de missões de Apoio Aéreo Próximo (CAS) nas próximas décadas. Os resultados obtidos demonstram as capacidades dos UCAV como aeronaves de quinta geração para a substituição de frotas reconhecidas a nível mundial (A-10 Thunderbolt II e Sukhoi Su-25) e, além disso, garante sua utilidade e viabilidade nos futuros ambientes de combate. Da mesma forma, a pesquisa se concentra em uma das variáveis de maior discussão a respeito da sobrevivência no combate aéreo, trata-se da furtividade por fenômenos eletromagnéticos, com a qual se obtiveram valores de Seção Equivalente de Radar (RCS) iguais a $-24,18$ dBsm ou representáveis numa área de detectabilidade de $0,0038$ m² em configuração limpa, de modo que este valor é inferior ao de aeronaves furtivas como é o Northrop Grumman B-2 Spirit. Finalmente, o projeto permite a operação com peso de descolagem máximo de 61,900 lb e uma carga paga de 11,240 lb que sejam condicionados a uma configuração alar e de estabilizadores para escalas transônicas.

Palavras-chave: aeronave não tripulada; apoio aéreo aproximado; furtividade; militar.

Las múltiples estrategias utilizadas por las fuerzas militares en conflictos armados han sido causantes de la creación de aeronaves con capacidades únicas para el cumplimiento de tareas especializadas y con un alto margen de éxito en su operación. Esto ha permitido la constante evolución del sector aeronáutico-militar, pues se han propuesto diseños enfocados a misiones específicas, por ejemplo, una de las más famosas se denomina Patrulla Aérea de Combate (CAP, por sus siglas en inglés), la cual define una aeronave con capacidad de superioridad aérea, en otras palabras, configuración aire-aire con el propósito de patrullaje y seguridad del espacio aéreo (Dirwan, 2020). Otro ejemplo es la existencia de misiones de ataque donde se da el uso de bombas o misiles aire-tierra para objetivos terrestres, una práctica catalogada como bombardeo de precisión —bombas inteligentes guiadas por láser, programadas por medio de coordenadas— (Andrew *et al.*, 2018).

El análisis del avance tecnológico de los últimos años establece que se debe tener en cuenta la combinación de las misiones, lo que es consecuente con la aparición de las cazas polivalentes o Avión de Combate Polivalente (MRCA por sus siglas en inglés), como lo son el F-16 Fighting Falcon o el F/A-18 Hornet (Biswas, 2019). Sin embargo, una de las misiones más conocidas en la aviación militar mundial es el Apoyo Aéreo Cercano (CAS, por sus siglas en inglés), este efectúa operaciones relacionadas con el ataque y supresión de enemigos con la finalidad de apoyar tropas terrestres en la zona de combate. Estas consideraciones son convenientes para el diseño de aeronaves como el A-10 Thunderbolt II, Sukhoi SU-25, North American Rockwell OV-10 Bronco y el Embraer EMB 314 Super Tucano que se especializan en el uso de armas como misiles aire-tierra, bombas y proyectiles a baja cota, convirtiéndose en una extensión del campo de batalla terrestre, lo que tiene altas implicaciones morales en las unidades de tierra (Correll, 2019).

Actualmente, destaca el uso de aeronaves no tripuladas para misiones de ataque de precisión como el MQ-9 Reaper (Watts, 2013). Esta tecnología está sometida a constantes análisis, pues, aunque los pilotos no se encuentran en peligro real durante la misión, se

necesita superar varios desafíos en materia de confiabilidad (Fields, 2012). De acuerdo con lo anterior, se han investigado los métodos más comunes de hackeo de este tipo de aeronaves, para así concretar estrategias que superen los ciberataques. También se demuestra que los ataques pueden generar daños irreversibles en la aeronave y la pérdida total del control (Rani *et al.*, 2016). Asimismo, estos vehículos enfrentan armas de mitigación e interferencia que pretenden derribar drones; dichas armas ya han sido investigadas y se han sugerido pasos a seguir para eliminar las incursiones de aeronaves no tripuladas en espacio aéreo restringido (Sathyamoorthy, 2015).

Sin embargo, las limitaciones y amenazas de los drones se han documentado de forma minuciosa; incluso, se han hecho investigaciones en las que se simulan situaciones de estos ataques hacia drones con el fin de estandarizar prácticas de operación confiables (Yaacoub *et al.*, 2020). Además, gracias a las investigaciones y evoluciones obtenidas en los últimos años, se puede considerar a las aeronaves no tripuladas como el futuro de la aviación; prueba de esto es el desarrollo de nuevos uCAV por parte de entidades —entre ellas la OTAN— que apoyan la investigación para el diseño de aeronaves no tripuladas con características furtivas como el Saccon, con objetivos de estudio de estabilidad y control de estas configuraciones (Cummings & Schütte, 2012). De ese modo, estos diseños son usados después para el desarrollo de un uCAV funcional, lo que muestra una constante evolución de los avances científicos en esta materia (Cummings & Schütte, 2012).

Por otra parte, el diseño de aeronaves se encuentra acotado bajo una categorización de generaciones que consideran la evolución en el campo de operaciones, por lo tanto, a medida que se fortalecen las formas de mitigar la operatividad de una aeronave, deberá existir un desarrollo que contrarreste, recupere y supere la operatividad anterior. La asociación estadounidense Atlantic Council establece que la quinta generación posee una amplia gama de armas de precisión acompañadas por sistemas de apuntado electroópticos, capacidades de guerra electrónica—interferencia de radares—, capacidades de

comunicación —enlaces de datos de baja probabilidad de interceptación—, equipadas con un sistema de aviónica confiables que permita una excelente relación humano-máquina. Dejando a un lado la capacidad aire-aire compuesta por misiles y Radares de Barrido Electrónico Activo (AESA, por sus siglas en inglés), la característica más importante para la quinta generación es la baja observabilidad ante radares y buscadores térmicos, lo que es crucial y diferencial respecto a otras aeronaves (James & Gouré, 2019).

Hoy en día existen investigaciones centradas en el diseño de aeronaves de quinta generación con el propósito de cumplir las necesidades de defensa en el futuro, estas proponen aviones polivalentes y aeronaves tripuladas (Liangliang *et al.*, 2016), en este último caso, los diseños están enfocados en la superioridad aérea (Atique *et al.*, 2016). También se ha combinado la quinta generación con aeronaves no tripuladas UCAV, estas investigaciones incluyen conceptos como el de la inteligencia artificial para así eliminar cualquier dependencia de un piloto (Kong *et al.*, 2020). Adicionalmente, existen propuestas de diseño para aeronaves no tripuladas de quinta generación con la función de caza bombardero (Sepúlveda & Smith, 2019a), e inclusive, se han caracterizado en detalle misiones donde los UCAV de quinta generación son destinados a misiones de bombardeo de precisión (Sepúlveda & Smith, 2019b).

Ahora bien, las nuevas exigencias en el área de operaciones de las últimas décadas han sido causantes de la salida de servicio de aeronaves como el Su-25 o del uso de aeronaves más livianas como el A-29B Super Tucano, estas traen consigo una visión futura sobre la adquisición de unidades polivalentes, y a la vez, supone la eliminación de los conceptos especializados dentro de esta industria. Aunque la historia ha demostrado que aeronaves con múltiples versiones del A-10 tienen una alta efectividad en sus misiones, es inevitable el debate sobre la salida de servicio de estos vehículos (Ho, 2018). La principal amenaza para esta aeronave son las reducidas posibilidades de cambios en sistemas de aviónica, proliferación de aeronaves polivalentes, conceptos de furtividad y capacidades de ejecución de múltiples tipos de misiones que suelen

ser parámetros de difícil acceso a una aeronave ya manufacturada y antigua (Green & Zeckhauser, 2019). En retrospectiva, no se sugiere una eliminación de flota, más bien, se exige un camino de transformación y adaptación a los nuevos conflictos que presenta el siglo XXI (Nordhagen, 2018).

Finalmente, este documento desarrolla un proceso de diseño caracterizado por una visión mejorada en las misiones de apoyo aéreo cercano, también denominadas CAS; en dicho proceso se sugiere el uso de aeronaves de combate no tripuladas de quinta generación que incluyen adaptaciones a diferentes velocidades de operación, teniendo en cuenta factores como la precisión, la maniobrabilidad, el uso de la GAU-8/A y los entornos de combate que puedan presentarse en el futuro.

Materiales y métodos

Requerimientos de diseño

El diseño de aeronaves de nueva generación para el cumplimiento de misiones tipo CAS se especializa en requerimientos estipulados por aviones de categorías similares (A-10 Thunderbolt II y Sukhoi-25). Además, las exigencias militares que se presentan en la actualidad incluyen características de quinta generación. Por esto, teniendo en cuenta los referentes planteados, se extrajeron los conceptos principales para crear un diseño optimizado, furtivo y con supremacía respecto a sus antecesores. La información se presenta en la tabla 1.

Dentro de las condiciones presentadas en la tabla 1 se contemplan parámetros de supervivencia y de operación, así mismo, se establecen condiciones de diseño enfocadas en la furtividad y aerodinámica de la aeronave. Por otra parte, cada uno de estos requerimientos se debe relacionar directamente con un perfil de misión que permita considerar las facultades y las condiciones que debe contener el diseño para el cumplimiento de sus objetivos como UCAV, por lo cual, en la figura 1 se especifican cada una de las etapas de vuelo para el cumplimiento de misiones tipo CAS.

Tabla 1
Conceptos base para el diseño de una aeronave con objetivos de misión para el apoyo aéreo cercano

n.º	Concepto	n.º	Concepto
1	Aeronave de ala fija	6	Capacidad de resistencia frente a fuerzas G que se encuentran en los rangos desde -3 hasta 7 teniendo en cuenta un máximo peso de despegue.
2	Remotamente pilotado	7	No superar las velocidades de operación de 120 kt, 300 kt y 900 kt para Stall Speed, Corner Speed y Maximum Level Speed respectivamente.
3	Baja detectabilidad (RCS<0,005 m ² en configuración limpia)	8	Techo de operación no menor a 40.000 ft y ratio de ascenso mínimo de 10.000 ft/min.
4	Diseño desarrollado para la supervivencia en combate	9	Definición de puntos externos e internos de disposición en carga paga.
5	GAU-8 Avenger como arma principal	10	Motores que operen bajo las condiciones del ambiente, mediante el uso del aire como medio de combustión (oxígeno).

Fuente: elaboración propia

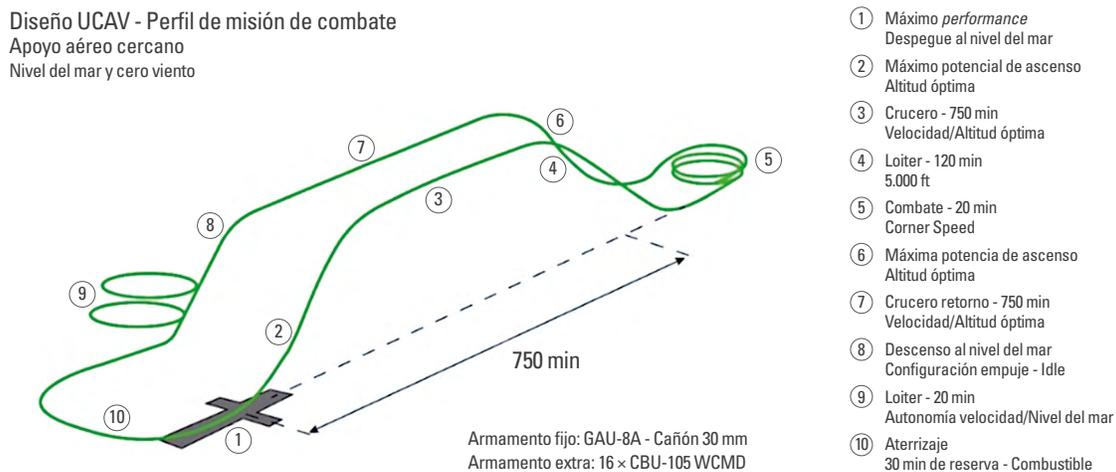


Figura 1. Perfil de misión de combate relacionada con el apoyo aéreo cercano
Fuente: elaboración propia.

La distribución de una misión tipo CAS ha sido clasificada en 10 etapas, como se observa en la figura 1, lo que permite la inclusión de rangos, tiempos y condiciones principales de operación. Además, en el diseño se puede tener en cuenta la necesidad de una carga paga, determinada por un armamento fijo (GAU-8A-Cañón de 30 mm) y un armamento extra (16 x CBU-105 y dispensador de munición con corrección de viento), para una posible etapa de combate que se encuentra en la fase 5 de vuelo. Finalmente, con estas consideraciones se procedió a establecer una metodología de

diseño que permitiera el desarrollo de un UCAV de quinta generación especializado en las misiones de apoyo aéreo cercano.

Metodología de diseño

El diseño conceptual de la aeronave fue ejecutado mediante de tres etapas que estudiaron acercamiento, diseño y evaluación de cada uno de los procesos con los

que se obtendrá el UCAV de quinta generación. De igual manera, cada una de estas fases se realizó bajo un flujo metodológico como se muestra en la figura 2, el cual permite obtener un desarrollo lógico y de constante re-actualización que beneficiaría los resultados finales de la investigación.

Tomando en cuenta la información de la figura 2 se determinaron tres ítems para el desarrollo del diseño: etapas, acciones y herramientas. Así mismo, contienen tres etapas de ejecución denominadas: preanálisis del diseño, diseño de la aeronave y conclusión del diseño. Primero, se realizó una conceptualización general sobre aeronaves que se aplican en misiones tipo CAS, y se evaluaron requerimientos, competencias y bases de datos relevantes. Posteriormente, se procedió con el foco de diseño conceptual de la aeronave incluyendo teorías de diseño, características de aeronaves

de quinta generación e información de la etapa anterior, para concluir con la evaluación de los resultados y su aporte para las futuras generaciones de aeronaves. A continuación, se describe cada una de estas etapas.

Etapa 1: preanálisis del diseño

Para dar inicio al diseño del UCAV, se tuvieron en cuenta cada una de las especificaciones mencionadas en la tabla 1 y los parámetros mostrados en la figura 1. A su vez, se identificaron las principales limitantes que influyen en factores como la capacidad de carga, velocidades y condiciones de operación para el cumplimiento de misiones relacionadas con el apoyo aéreo cercano. Las variables determinadas en el primer acercamiento pautaron los criterios necesarios para la incorporación de una base de datos enlazada



Figura 2. Flujo metodológico para el diseño de un UCAV de quinta generación
Fuente: elaboración propia.

con aeronaves que cumplan misiones CAS, en la que se incluyó información dimensional, de pesos, facultades de operación y otros elementos relevantes para el diseño.

De igual manera, con la base de datos fundamentada en herramientas científicas, como lo estipula la figura 2, se realizó una estimación de pesos evaluada a través de tres métodos comparativos, los cuales interactuaron entre ellos para la determinación de errores y comprobación de los pesos de diseño —máximo peso de despegue y peso vacío—. Dentro de estos procedimientos se encuentra el uso del *software* académico *Advanced Aircraft Analysis*, el cual combina criterios estadísticos para realizar aproximaciones dimensionales. Posteriormente, se plantearon las teorías de Raymer (2018) enfocadas en el desarrollo de cada una de las etapas de vuelo de la misión y, por último, se hizo un acercamiento por medio de fracciones máxicas que relacionaron variables aerodinámicas como la eficiencia aerodinámica —razón entre la sustentación y el arrastre— y los factores de consumo de combustible.

Para concluir la etapa de preanálisis, se tomaron en cuenta los pesos obtenidos y requerimientos de operación de la aeronave para determinar los componentes de carga alar (W/S) y la razón entre empuje y peso (T/W). Con la inclusión de variables de operabilidad y aerodinámica se realizó la graficación de un *matching plot* que considera el cumplimiento de criterios de performance para la selección de un punto de diseño. Además, este diagrama brinda información relacionada con valores de superficie alar y empuje requerido en la aeronave (Raymer, 2018). Dentro de los parámetros de performance se pueden definir restricciones por *corner speed*, velocidades de operación, distancias de despegue y aterrizaje, maniobrabilidad y condiciones de ascenso.

Etapa 2: diseño de la aeronave

Después de hacer un acercamiento al diseño definido se dio inicio a la etapa 2; con el apoyo de varios *software* especializados se realizaron análisis, optimización y verificación de las principales teorías aplicadas al

diseño de aeronaves, así mismo, se hizo énfasis en los ítems de aerodinámica y furtividad como se muestra a continuación.

Estimación aerodinámica

Para la determinación de las superficies aerodinámicas se tuvo en cuenta la fase crucero, ya que es la sección de vuelo más crítica de mayores tiempos y rangos, además, tomando en cuenta los criterios de máximo peso de despegue, condiciones, altitud y velocidades se procede a determinar las características aerodinámicas que debe cumplir el perfil alar. Con estas variables se llevó a cabo una recolección de perfiles que cumplieran estos requerimientos para, luego, evaluarlos en parámetros de coeficiente de sustentación, coeficiente de arrastre, coeficiente de momentos y geometría, este incluye facilidad de manufactura y espesores.

De este modo, el perfil aerodinámico seleccionado, las condiciones de vuelo y la superficie alar —extraída del *matching plot*— se determinó inicialmente de forma en planta del ala, la cual fue evaluada en el *software* *OpenVSP* para obtener las principales variables aerodinámicas —coeficientes de sustentación, arrastre y momentos— y comprobar el cumplimiento de cargas mínimas de sustentación. Así mismo, este primer diseño del ala fue sometido a una optimización geométrica en la que se usó el *software* *Aeolus ASP*, por medio de la inclusión de rangos dimensionales —tamaño de cuerda, flechamientos y envergadura— se buscó la configuración con mayor eficiencia aerodinámica —mayor coeficiente sustentación y menor coeficiente de arrastre—.

Por otra parte, las consideraciones anteriores fueron las bases principales para el diseño de los estabilizadores de la aeronave, los cuales se complementaron con las definiciones generales de la estabilidad dinámica y estática, tanto longitudinal como lateral, demostradas en la ecuación 1 (Bravo-Mosquera et al., 2018).

$$C_{M\infty} = a_{wb} (\bar{x}_{CG} - \bar{x}_{ac,wb}) - a_t \left(1 - \frac{\partial \epsilon}{\partial \alpha}\right) \eta_t \frac{S_t}{S} (\bar{x}_{ac,t} - \bar{x}_{CG}) \quad (1)$$

De igual forma, los conceptos de estabilidad se completaron con componentes dimensionales establecidos por comportamientos regulares en aeronaves de categorías similares, los cuales se estipularon por medio de la ecuación 2, ecuación 3 y ecuación 4 (Cidrás-Estévez, 2019).

$$SHt = CHt \frac{Sw * C_{maw}}{LHt} \quad (2)$$

$$CHt = \frac{C_{mw}}{CLHt} \quad (3)$$

$$SVt = CVt * \frac{bw * Sw}{LVt} \quad (4)$$

Estimación de furtividad

El análisis de RCS hace parte de una evaluación que considera los aspectos de geometría y materiales; en este caso, mediante un análisis computacional se podrán ejecutar aproximaciones certeras a la firma de radar que el diseño planteado genera (Chen *et al.*, 2015).

Por otro lado, las simulaciones se realizaron por medio del *software* Pofacets, un código desarrollado por el Dr. David C., director de facultad del Laboratorio de Antenas y Microondas del Departamento de Ingeniería Eléctrica e Informática de la Escuela Naval de Posgrados en Monterey-California (Jenn, 2019). Con el objetivo de garantizar una cercanía en los resultados del *software*, se estipularon ecuaciones base de geometrías investigadas, estas se representaron en las ecuaciones de la tabla 2. Así mismo, se realizaron aproximaciones a aeronaves actuales que brindaran un criterio más justificable de tipo aeronáutico.

Tabla 2
Fórmulas aproximadas de RCS para algunos objetos

Objeto	Dirección	RCS [σ]	Simbología
Esfera	Cualquiera	πr^2	r: radio
Cono	Axial	$\frac{\lambda^2}{16\pi} \tan^4 \theta$	θ : semiángulo de cono a: radio de curvatura del vértice
Paraboloide	Axial	πa^2	L: longitud
Cilindro	Normal al eje	$\frac{2\pi L^2}{\lambda}$	Λ : longitud de onda

Fuente: Chen *et al.* (2005).

Del mismo modo, los conocimientos de RCS en la aeronave brindaron información sobre supervivencia o detectabilidad relativa de esta ante radares militares de diferentes frecuencias y potencias, su modelo matemático está definido bajo las interacciones que existen entre el radar —antena— y el objeto, estipuladas por la ecuación 5, y la relación del RCS entre la distancia del emisor, la energía incidente y la energía dispersada, representadas por la ecuación 6 (Chatzigeorgiadis, 2004).

$$R_{max} = \sqrt{\frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 P_{min}}} \quad (5)$$

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|\vec{E}_s|^2}{|\vec{E}_i|^2} \quad (6)$$

Para la ecuación 5, R_{max} es el máximo rango de detección, P_t es el poder de transmisión que se refiere a la potencia de microondas en vatios, G es la ganancia de la antena, de modo que representa la cantidad de energía transmitida o recibida desde una dirección determinada, λ es la longitud de onda, σ el RCS del objeto y P_{min} es la señal mínima detectable. Para la ecuación 6, R es la distancia a la que está el emisor de la onda electromagnética y \vec{E}_s junto con \vec{E}_i hacen referencia a las amplitudes del campo eléctrico del campo incidente y disperso respectivamente.

Etapa 3: conclusión del diseño

Finalmente, para concluir el diseño se realizó una verificación de todos los requerimientos definidos en la etapa 1, además, se compararon las bases de datos obtenidas durante el desarrollo de la investigación y se garantizó los beneficios de la nueva aeronave respecto a la competencia internacional. De igual manera, se demostraron las capacidades que se obtienen al utilizar una aeronave tipo UCAV en el cumplimiento de misiones CAS, teniendo en cuenta las características de las aeronaves de quinta generación.

Resultados y discusión

Estimación de características generales de la aeronave

A través de los procedimientos mencionados en la sección “Etapa 1: preanálisis del diseño” se estableció como componente de mayor relevancia el concepto de las fracciones másicas, con lo cual se logró obtener un acercamiento en los valores de peso de la aeronave que pueden ser demostrados en la tabla 3; estos consideran cada uno de los limitantes relacionados con la misión de apoyo aéreo cercano que ejecutará la aeronave en operación y con los pesos promedios obtenidos al dar uso de las bases de datos.

Tabla 3
Estimación inicial de pesos en la aeronave para la ejecución de misiones tipo CAS

Concepto	Misión 1
Radio [nmi]	750
Peso carga paga [lb]	11.240
Peso de despegue [lb]	61.817
Peso de combustible [lb]	19.861
Peso vacío [lb]	30.715

Fuente: elaboración propia.

Los resultados obtenidos en la tabla 3 dan un punto de partida para el diseño de la aeronave, en los que se incluyen los valores de máximo peso de despegue —condición fundamental para el diseño aerodinámico—, peso vacío que permite analizar el peso disponible en la aeronave para la inclusión de sistemas eléctricos, aviónica, motores, entre otros y, finalmente, los componentes de peso de combustible y carga paga que se distribuirán en el volumen de la aeronave

Tabla 4
Verificación de los resultados obtenidos por fracciones másicas

Parámetro	Fraciones másicas	Base de datos	Error (%)	Aaa software	Error (%)	Consumo combustible	Error (%)
Peso de despegue [lb]	61.817	61.817	0	61.861	0,07	61.817	0
Peso vacío [lb]	30.715	32.613	6,17	30.161	1,8	31.084	1,2

Fuente: elaboración propia.

para control de centro de gravedad, rangos de operación y tipo de misión a cumplir. Por otro lado, para verificar la certeza de los valores obtenidos por medio de fracciones másicas se llevó a cabo una comparación respecto a los otros métodos de obtención de pesos, como se observa en la tabla 4, y se realizó el cálculo del error relativo porcentual que se tiene en cada uno de los resultados.

La verificación realizada en la tabla 4 establece porcentajes de error relativo porcentual bajo y totalmente adecuado para la aplicación de estos valores como objeto inicial de diseño. Por ese motivo, al tomar los datos de referencia que incluyen condiciones de vuelo en aterrizaje, despegue y crucero, y al incluir los pesos de despegue y posibles valores aerodinámicos requeridos fue posible realizar la estimación de *matching plot* para la selección de dimensiones de superficie alar y empuje, como se muestra en la figura 3.

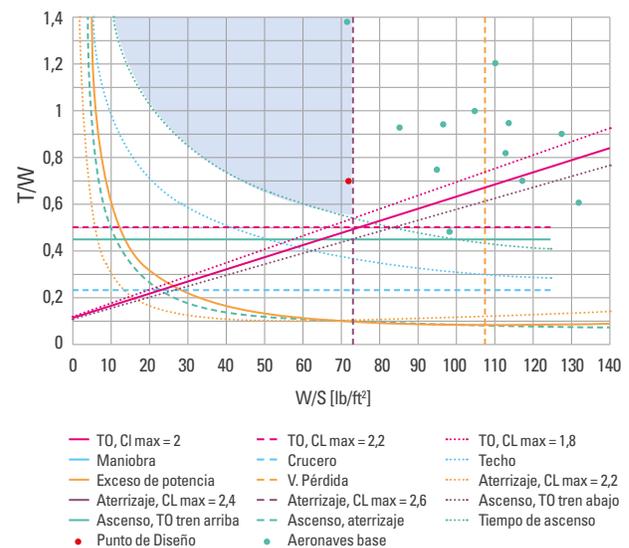


Figura 3. Estimación del punto principal de diseño para la extracción de superficie alar y empuje requerido

Fuente: elaboración propia.

Las relaciones obtenidas para la aeronave especifican el cumplimiento de todos los limitantes planteados en la sección “Etapa 1: Preanálisis del diseño” que además, relaciona la inclusión de estándares de diseño como lo es el bajo consumo de combustible y la baja necesidad de un área alar con amplias dimensiones. Estos resultados son significativos respecto a un área alar igual a 80 m^2 y un empuje mínimo de 43.271 lbf , los cuales son cercanos a aeronaves de altas prestaciones como lo es el Lockheed Martin F-22 Raptor.

Por lo anterior, las bases de empuje requerido implican la preselección de un motor adecuado a la aeronave, mediante una base de datos aplicada a los motores de mayor relevancia en el campo, por lo que se optó por el uso de dos F199-PW-100, caracterizados por un alta eficiencia en el consumo de combustible, capacidad de hasta 35.050 lbf con módulo de afterburner y un peso de 2.998 Lb . Adicionalmente, sus referencias en la industria lo hacen un motor de excelentes prestaciones (Deskin & Yankel, 2002) que se encuentra en constante evolución para las nuevas aeronaves que ingresarán en manufactura en las próximas décadas.

Diseño de superficies aerodinámicas

De acuerdo con los estándares mencionados en la subsección anterior, los requerimientos de diseño de superficies aerodinámicas se acoplaron al cumplimiento del máximo peso de despegue, maniobras de alta

relevancia para las aeronaves de tipo CAS, conceptos de arrastre aerodinámico y otros elementos de importancia en la operación regular. Por ello, el proceso de diseño inició con el desarrollo de una base de datos de perfiles aerodinámicos que cumplieran características de coeficiente de sustentación igual o mayor a $0,3$ a un ángulo de ataque de 0 , valores máximos de espesor del 15% respecto a la cuerda y geometrías de fácil manufactura.

Tomando en cuenta la etapa crucero como la fase de vuelo más crítica se analizaron cada uno de los perfiles en los que se realizó una matriz de selección y comparación que evalúa factores de forma geométrica —facilidad de manufactura e influencia en la generación de traza de radar—, posibilidad de *twist* aerodinámico —manipulación en espesores y adaptación a los factores limitantes generados por el cono de mach— y finalmente las principales características aerodinámicas: coeficiente de momento, coeficiente de sustentación y coeficiente de arrastre. Las evaluaciones aerodinámicas de cada uno de los perfiles se hicieron por medio del *software* XFLR5, el cual tiene una validez regular hasta un Reynolds de $3.000.000$ mediante teorías de ala infinita o de perfiles, por lo cual, para esta primera sección de evaluación y comparación es lo suficientemente aceptable, —sin embargo, será más estricta al momento de determinar valores en el ala—. Con lo anterior, se logró obtener como perfil seleccionado el NACA 63-306 con los resultados que se muestran en la figura 4.

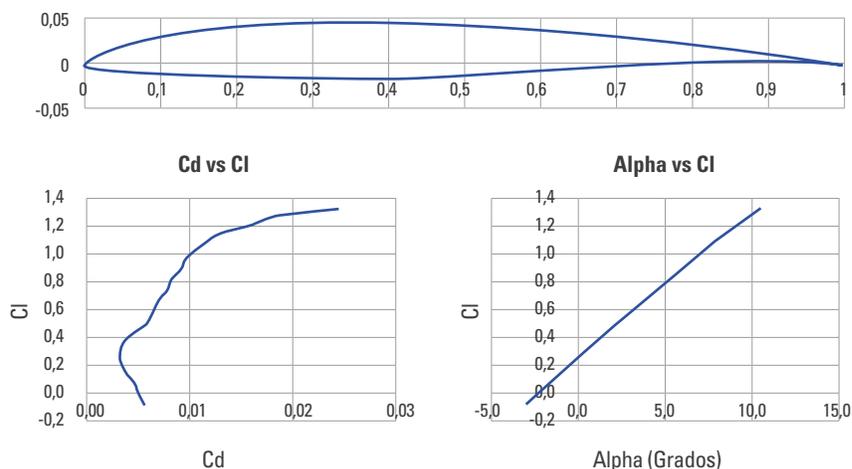


Figura 4. Representación general sobre el perfil aerodinámico NACA 63-306 (Evaluación $Re=3.000.000$)

Fuente: elaboración propia.

Como se observa en la figura 4 su máximo espesor es relativamente pequeño, lo que permite una escalabilidad superior o menor en los rangos de generación de nuevos perfiles para el *twist* aerodinámico. A la vez, efectúa cambios en este concepto entre los valores de 2 % y 10 % respecto a la cuerda unitaria del perfil. Además, la composición de la geometría se adapta apropiadamente a la posibilidad de diseño de superficies sustentadoras de forma adiamantada, aplicando esto a las bases principales de fortitud; su curvatura representativa puede ser estudiada para una manufactura eficiente y que no presente problemas en ninguno de los procesos para la obtención del producto. Posteriormente, con los resultados obtenidos en los análisis de requerimientos de máximo peso de despegue, empuje requerido y otros parámetros, se establecieron los limitantes dimensionales que se encuentran en la tabla 5.

Tabla 5
Conceptos dimensionales para el diseño de la superficie de sustentación

Variable	Valor	Unidad
Superficie alar (S)	871,8	ft ²
Relación de aspecto (AR)	3	N/A
Envergadura (b)	50,5	ft

Fuente: elaboración propia.

Teniendo en cuenta estos limitantes se definieron diferentes posiciones geométricas con variaciones en flechamiento, cuerda de raíz y cuerda de punta. Sumado a ello, se acopló un modelo simplificado sobre la primera formación de onda de choque para un mach de 1,2 sobre la superficie de sustentación, aplicando los máximos rangos de velocidad en la operación de la aeronave como se observa en la figura 5.

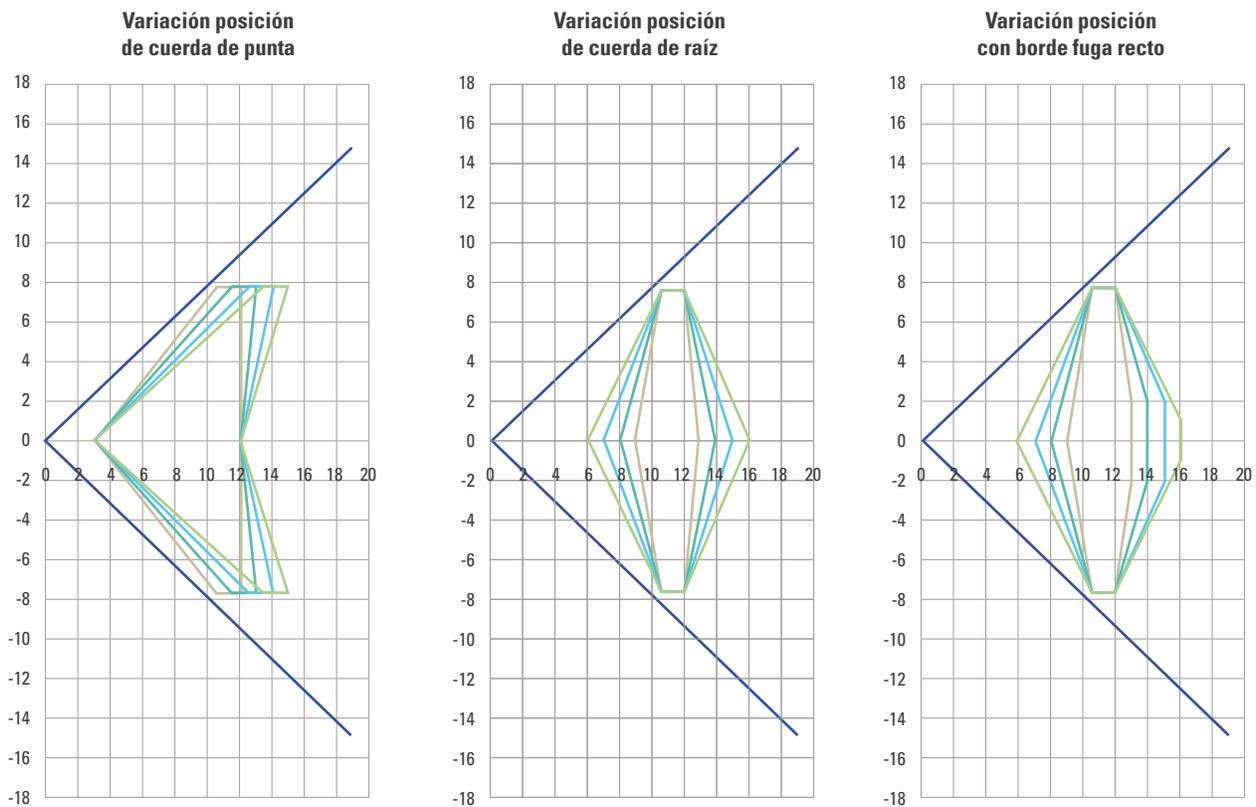


Figura 5. Posibles variaciones en geometría alar en metros, la línea azul representa el modelo de onda de choque a 1,2 mach
Fuente: elaboración propia.

Estas geometrías son acompañadas de un análisis aerodinámico en OpenVSP y un modelo de optimización en Aeolus ASP, como se especificó en la sección “Etapa 3: conclusión del diseño” que permite establecer bajo los criterios de manufactura, aerodinámica y capacidad volumétrica, una forma altamente eficiente con la capacidad de garantizar altos estándares de operabilidad en la aeronave. Además, los conceptos asociados a furtividad incluyen el desarrollo de *twist* aerodinámico, un proceso en el que por medio de modificaciones en valores de espesor, respecto al perfil principal seleccionado, se obtiene una forma adiamantada en toda la envergadura de la superficie de sustentación, lo cual incluye una disminución en RCS considerable que contempla la conceptualización final observada en la figura 6.

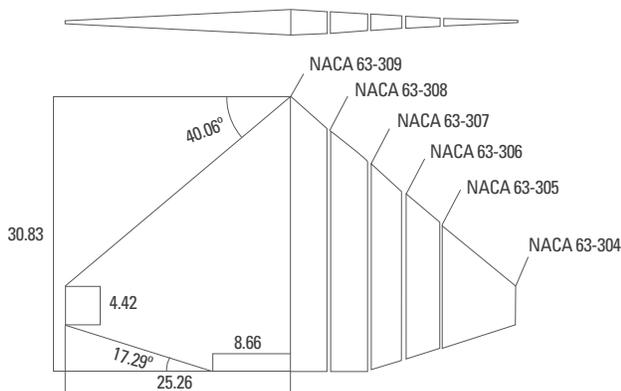


Figura 6. Dimensiones finales de la superficie de sustentación en ft y vista adiamantada por *twist* aerodinámico

Fuente: elaboración propia.

Después de verificar la noción final de la superficie de sustentación ilustrada en la figura 6, se especifica un modelo totalmente adaptado a las necesidades de operabilidad que se presentan para los próximos años, lo que incluye una capacidad volumétrica amplia para beneficios de carga interna, adaptabilidad a parámetros de furtividad por medio de formas adiamantadas, y el cumplimiento de requisitos aerodinámicos generales, como lo son sustentación para máximo peso de despegue y bajo arrastre que garantice altos rangos de vuelo.

Más adelante, como parte del trabajo con los resultados obtenidos para el diseño de las superficies de estabilidad, el cual incluye la adaptación de las ecuaciones 1-4, se estableció un diseño de cola tipo compuesto que contempla un estabilizador horizontal y un estabilizador en V, cuyos parámetros dimensionales se encuentran en la tabla 6. De igual manera, en la figura 7 se observa una posible adaptación de estos elementos en el fuselaje de la aeronave.

Tabla 6
Dimensiones finales de las superficies de estabilidad por semienvagadura

Estabilizador horizontal			Estabilizador en V		
Variable	Valor	Unidad	Variable	Valor	Unidad
Superficie	140	ft ²	Superficie	106,5	ft ²
Cuerda raíz	11,5	ft	Cuerda raíz	12,4	ft
Cuerda punta	5,0	ft	Cuerda punta	5,0	ft
Aflechamiento	40	Grados	Aflechamiento	40	Grados
Semienvagadura	17,0	ft	Semienvagadura	11,0	ft

Fuente: elaboración propia.

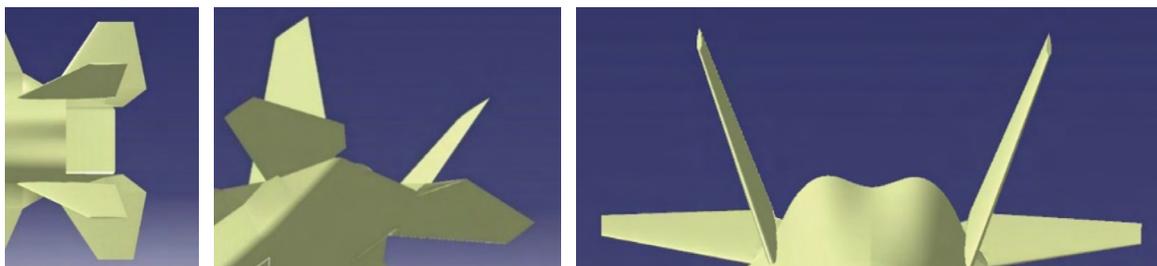


Figura 7. Ilustración sobre los estabilizadores en el fuselaje de la aeronave

Fuente: elaboración propia.

Los valores dimensionales obtenidos para estas superficies y su posicionamiento, son de fácil asimilación con los contextos evaluados en las aeronaves de quinta generación, donde la versatilidad de una cola en configuración compuesta amplifica las variables de maniobrabilidad, control y cambio de aptitud en vuelo. A su vez, estos resultados reflejan ciertas similitudes con aeronaves como el Lockheed Martin F-22 Raptor, lo que garantiza cada uno de los procesos realizados. A lo anterior, se suma que la estabilidad de la aeronave responde a la fase de vuelo crucero y específica a sobremedida la excelente aplicabilidad del diseño sobre la operabilidad misma.

Furtividad y supervivencia

Verificación pofacets

Teniendo en cuenta los modelos matemáticos observados en la tabla 2, se realizó una comparación en el *software* Pofacets con el objetivo de determinar los valores representativos de RCS. En este caso se tomó un cilindro como objeto de prueba, cuya geometría y resultados se aprecian en la tabla 7.

Tabla 7
Experimento de cilindro en Pofacets

Denominación	Valor/Referencia	Denominación	Valor/Referencia
Permitividad Relativa	PEC	RCS promedio experimental [m ²]	0,00261
Radio [m]	0,063	RCS promedio experimental dBsm	25,12
Altura [m]	5	RCS promedio experimental [m ²]	325,03
Longitud de onda [m]	0,03	RCS teórico [m ²]	329,87
RCS promedio experimental [dBsm]	-25,84	Error [%]	1,47

Fuente: elaboración propia.

Con los valores alcanzados en la tabla 7, se obtuvo un error del 1,47 % con respecto a los resultados dados por las ecuaciones de la tabla 4, lo que determina aceptabilidad entre la teoría y la simulación de

Pofacets. No obstante, la conceptualización en aeronaves involucra combinación de formas y geometrías complejas, las cuales no poseen una ecuación determinada, por este motivo, se planteó el uso del modelo por defecto de la aeronave F-16 teniendo en cuenta las mismas características de la simulación anterior. Los resultados obtenidos se encuentran en la figura 8.

Después de tomar en consideración el análisis de la figura 13, se especificó que el F-16 obtuvo un RCS promedio de -3,34 dBsm, lo cual es equivalente a una sección transversal de radar de 0,46 m². Según datos reportados, el RCS de esta aeronave se encuentra normalmente entre rangos de 0,1 y 1,2 m² de acuerdo con su versión, por lo cual se puede confirmar que el valor obtenido por Pofacets es confiable, puesto que se encuentra en estos valores (Touzopoulos *et al.*, 2018).

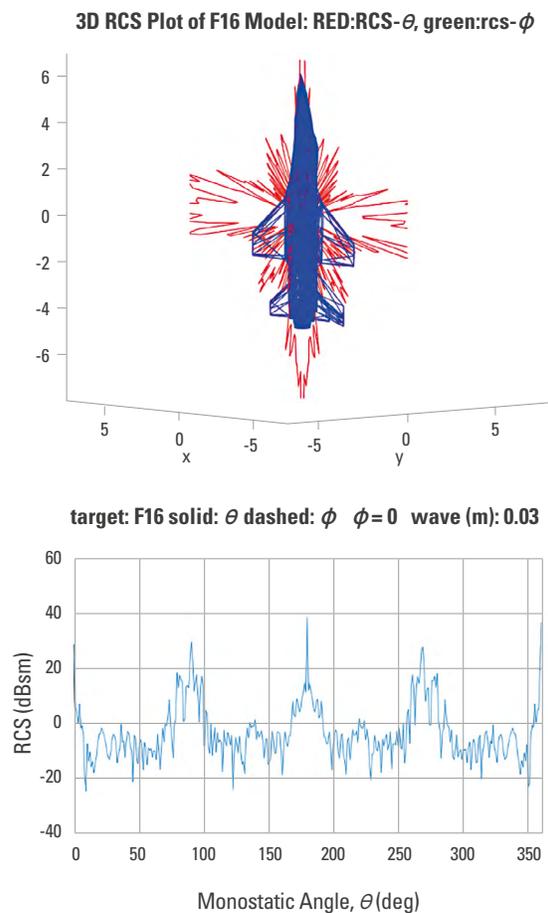


Figura 8. Arriba, Modelo del F-16 por defecto, y abajo, los resultados obtenidos en Pofacets

Fuente: elaboración propia.

Diseño de fuselaje

Para dar inicio al diseño del fuselaje se estipularon diferentes geometrías analizadas bajo su RCS, con el objetivo de encontrar los principales parámetros que guían el modelo furtivo: criterios aerodinámicos, manufactura y capacidad de carga. En la figura 9 se encuentran algunas de las formas consideradas.

Se determina que la forma seleccionada será la hexagonal, debido a que proporciona un mejor acondicionamiento sobre la ubicación de carga paga, aviónica y sistemas internos con la combinación de excelentes resultados en valores de RCS. En otras palabras, este tipo de geometría mantiene un equilibrio entre las variables de furtividad y aerodinámica. En la figura 10 se aprecia el diagrama RCS de la geometría seleccionada.

geometría en nariz encargada del almacenamiento de los núcleos de procesamiento, aviónica y otros sistemas de vital importancia, que de igual manera adapta la versatilidad para el posicionamiento de la GAU-8A. Todas estas características se encuentran en la figura 12.

Como se puede observar en la figura 12, el diseño está enfocado en mantener una configuración limpia, lo que permite llevar la carga paga en bahías internas, esto es de gran beneficio para mantener la furtividad de la aeronave SuperCAS. Con esta última conceptualización se realizó un análisis del RCS del fuselaje para determinar un diseño furtivo en este, como se muestra en la figura 13.

En la figura 13 se logró un registro promedio de área detectable con valor de $0,0016 \text{ m}^2$ igual a $-27,93 \text{ dBsm}$ de señal reflejada. Se observa en esta misma figura la

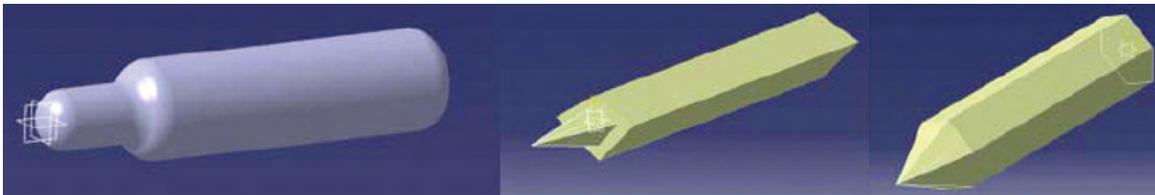


Figura 9. Principales geometrías simuladas en Pofacets para definición de un fuselaje furtivo, de izquierda a derecha cilíndrica, rombo, hexagonal
Fuente: elaboración propia.

La figura 10 tiene un valor de señal promedio por debajo de los -20 dBsm el cual se refiere a un RCS de $0,01 \text{ m}^2$, por lo que se procedió a modificar el diseño con base en esta forma. El fuselaje diseñado consiste en un cuerpo similar a un hexágono, sin embargo, se le acondicionaron aptitudes aerodinámicas que se acoplaron a los requisitos de diseño contemporáneos, por ejemplo, la parte inferior adquiere características más rectangulares para el posicionamiento de bahía de armas, mientras que la zona superior se capacita para la ubicación de la toma de aire y sus respectivos criterios. En la figura 11 se observa el fuselaje obtenido.

Es importante resaltar que los ángulos del fuselaje son cercanos a valores de 60° , para generar una superficie que no devuelva las ondas electromagnéticas directamente al receptor y poder ajustar la forma para el armamento interno. También se incluyó una

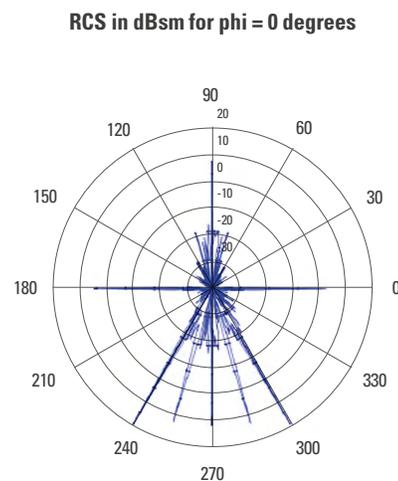


Figura 10. Diagrama RCS en dBsm lograda por el Pofacets, donde 90° es la nariz de la geometría
Fuente: elaboración propia.

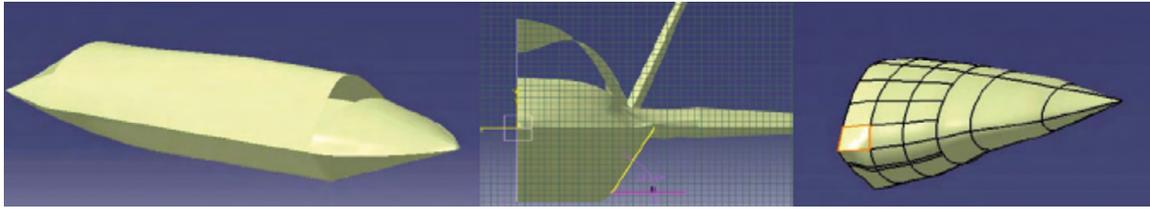


Figura 11. Fuselaje furtivo resultante de los análisis, de izquierda a derecha se presenta: isométrico, vista frontal y radomo
Fuente: elaboración propia.



Figura 12. Acercamiento a la vista interna de la aeronave donde se pueden encontrar el motor, GAU-8A, espacios habilitados para aviónica y sistemas internos, entre otros
Fuente: elaboración propia.

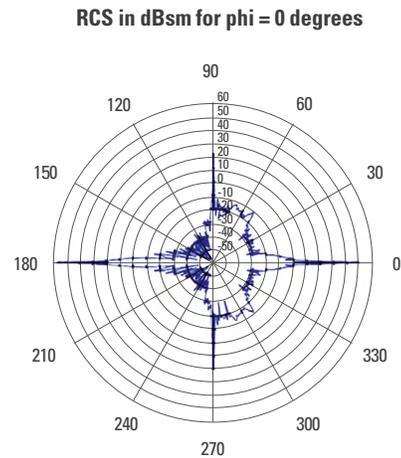


Figura 13. Diagrama RCS del fuselaje de la aeronave donde a 0° se encuentra la nariz
Fuente: elaboración propia.

existencia de puntos débiles en la parte trasera y de lantera de la aeronave (0/360° y 180°), estos pueden ser causados por la simplificación realizada que permite la conceptualización de paredes, donde las ondas electromagnéticas podrían chocar en un ángulo de incidencia de 90°. Este fenómeno mencionado también puede estar presente en las zonas laterales del fuselaje (90° y 270°), y generar un aumento considerable en la señal emitida. No obstante, el posicionamiento de estos sectores permite tener su ubicación en zonas específicas donde la posibilidad de incidencia de las ondas es muy baja, debido al tipo de operación y velocidades que contiene la aeronave.

Finalmente, se puede concluir que el diseño del fuselaje es exitoso en cuestiones de furtividad, puesto que, en ambos casos, el área transversal y la longitud son de la magnitud de centímetros y centímetros

cuadrados, en este caso 16 cm² es menor al pedido en los requerimientos de la tabla 1 que es de 0,005 m².

Diseño aeronave furtiva

Con los resultados obtenidos en el fuselaje se construyó un modelo simplificado de la aeronave que permite su análisis en Pofacets, por lo cual, las simplificaciones se encuentran enfocadas en el uso de geometrías sencillas y la eliminación de espacios internos vacíos —sólido completo—. Estos cambios generan un aumento en los valores de RCS debido a la aparición de paredes que no existirían en un modelo real, sin embargo, todas estas consideraciones se tomaron en cuenta para los resultados finales. A continuación, en la figura 14 se encuentra la representación 3D del modelo completo de la aeronave simplificada.

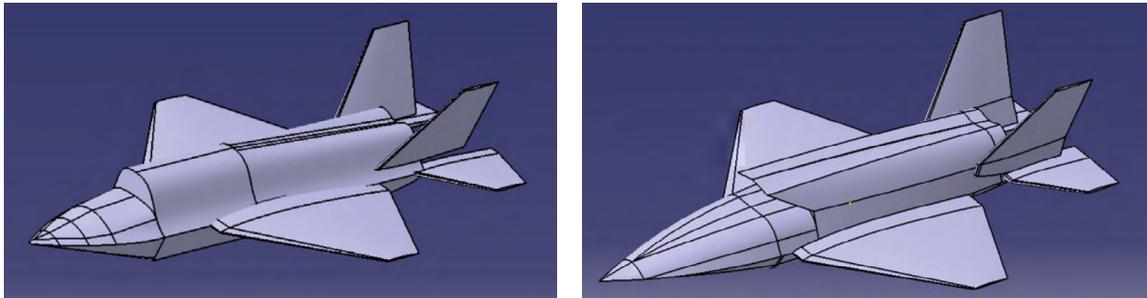


Figura 14. Modelo y evolución de la geometría de la aeronave simplificada
Fuente: elaboración propia.

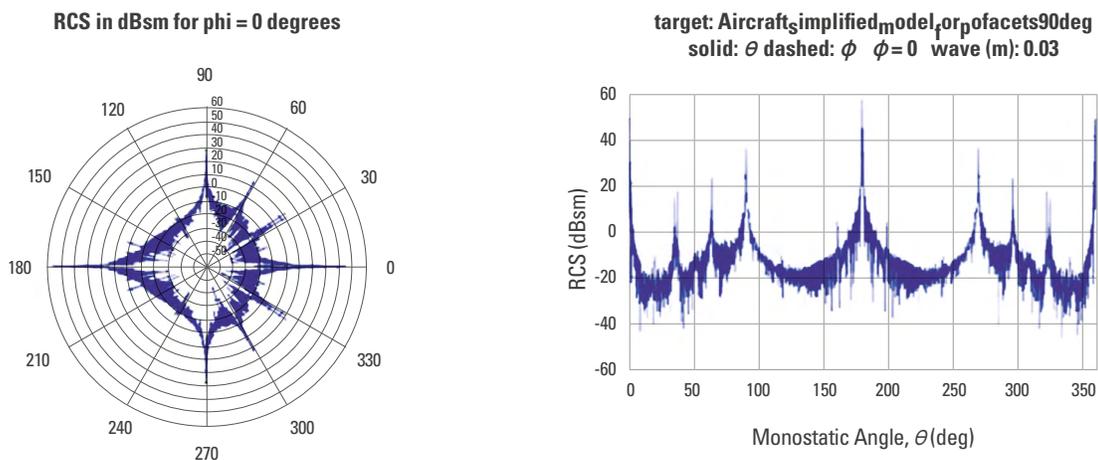


Figura 15. Análisis de RCS usando Pofacets con un paso de ángulo de 0,1. Al lado izquierdo el diagrama polar y al derecho el diagrama rectangular
Fuente: elaboración propia.

Las condiciones de simulación involucran la aeronave con una permisividad de PEC —forma ideal—, una frecuencia de 10 GHz y una longitud de onda de 0,03 m, la cual pertenece a banda X —común en aplicaciones militares—. Por último, se planteó un análisis monoestático —emisor y receptor de la señal en un mismo punto— bajo un posicionamiento de 360° alrededor de la aeronave, los resultados obtenidos se encuentran en la figura 15.

A primera vista, el modelo de la aeronave simplificado de la figura 15, ubica en sus resultados picos en los ángulos 90°, 180°, 270° y 360°, pertenecientes a las zonas alteradas geoméricamente por la simplificación, estos son interpretados como un fenómeno propio del mismo proceso. Por otra parte, el RCS promedio final es de -14,18 dBsm y hace referencia a un área de 0,038 m²; este valor puede ser comparado

con aeronaves furtivas de gran reconocimiento como el B-2 Spirit (Air Force Magazine, 2019), donde se obtienen unos valores menores a esta. De igual forma el área obtenida es proporcional a la identificación de un ser humano por medio de un radar.

Aun así, tomando en cuenta la investigación realizada por el Departamento de Ciencias de la Academia de la Fuerza Aérea Helénica, mediante el *software* Pofacets se estima que la inclusión de Material Absorbente de Radiación (RAM, por sus siglas en inglés) genera una disminución de 10 dBsm respecto a un análisis únicamente geométrico (Touzopoulos *et al.*, 2018), por lo tanto, se logra concluir que la señal promedio obtiene un valor final de -24,18 dBsm para un RCS de 0,0038 m². Con este valor final de RCS se determina que la aeronave diseñada se encuentra en los rangos representativos para la 5.^a generación, con un acercamiento

a las condiciones del F-35 (-21 dBsm para 0,0079 m²) lo que permite superar aeronaves de 4.^a generación como el F-16 (Touzopoulos *et al.*, 2018).

Detectabilidad frente a radares

Al tomar como referente la ecuación 5 se puede realizar procesos matemáticos que permitan determinar el rango de detección de un objeto respecto al RCS de este, para definirlo bajo la ecuación 9 (Wolff).

$$\text{Rango de detección} = \frac{\text{Rango de detección del radar}}{\sqrt[4]{\frac{\text{RCS mínimo del radar}}{\text{RCS del objetivo}}}} \quad (9)$$

Así mismo, al partir de un ambiente de evaluación que simula la posibilidad de encuentro con amenazas de aeronaves como los Flanker (Aeronaves Sukhoi del 27 al 35) y Fulcrum (Mig-29 y Mig-35) en todas sus versiones se logra efectuar un listado de los principales radares utilizados por este tipo de tecnologías, además, se incluye el radar estadounidense APG 71, común en aeronaves como el F-14. Con esta información y de acuerdo con la relación estipulada en la ecuación 9 se hicieron aproximaciones de rango de detectabilidad del diseño propuesto en condiciones ideales para máximo rendimiento; los resultados se encuentran en la tabla 8 y han sido ilustrados en la figura 16.

Tabla 8
Rangos de detección de la aeronave respecto a los diferentes radares

Radar	Rango de detección del objeto de RCS min para un objeto de 1 m ² [nmi]	Rango de detección de la aeronave [nmi]
N001 Myech	47,5	11,8
N001VE	76,1	19,0
N001VEP	76,1	19,0
N001VE-Pero	102,0	25,3
N011	75,0	18,64
N011M BARSV1	89,5	22,2
N011M BARSV2	117,5	29,2
Irbis-E	153,0	38,0
APG 71	256,4	63,7

Fuente: Kopp *et al.* (2008).

Detectabilidad de la aeronave ante varios radares

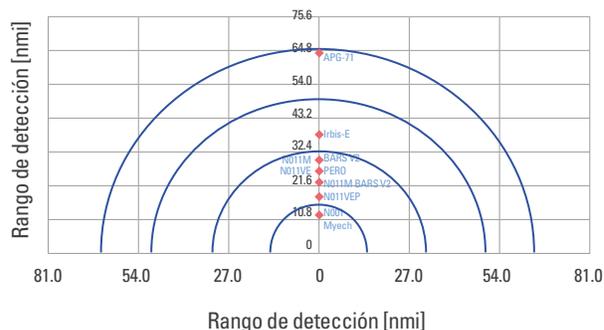


Figura 16. Ilustración de los rangos de detectabilidad de la aeronave frente a los principales radares
Fuente: elaboración propia.

Los resultados obtenidos representan un perímetro de efectividad furtiva de la aeronave frente a posibles amenazas que se involucrarían en su operación regular, un concepto de vital relevancia para la adaptación a las nuevas tecnologías que presentan las aeronaves de 5.^a generación.

Como se puede observar en la tabla 8, el 45 % de los radares estudiados requieren estar a menos de 40 km de distancia de la aeronave para efectuar una detección de esta, además, el 33 % de los radares requieren estar en un rango entre 40 y 50 km de distancia para tener una detección efectiva. A partir de estos resultados se puede estimar que la gran parte de los radares presentes en las aeronaves de superioridad aérea rusa no superan la efectividad de 50 km de distancia. Por otra parte, los dos últimos radares correspondientes al Irbis-E, presentes en aeronaves como el Sukhoi-35 y el APG-71, representan la mayor amenaza con la capacidad de superar los 70 km de distancia para la detectabilidad del diseño planteado.

No obstante, cabe recalcar que los rangos de misiles aire-aire de larga y media distancia más actuales conservan un rango máximo efectivo menor a 74 km de distancia. Además, teniendo en cuenta que la detectabilidad de la aeronave se ve representada en primera instancia bajo una señal correspondiente a un objeto de 0,0038 m², se estipulan tiempos de identificación frente a la aeronave desconocida, lo que beneficia la supervivencia de esta. Finalmente, lograr un

sistema de supervivencia completa requeriría la incorporación de un sistema AWACS, propio de aeronaves de alerta temprana efectivas contra radares de rangos mayores a 400 km y con la capacidad de detectar amenazas antes de que la aeronave se vea comprometida.

Diseño final

El diseño de la aeronave termina en la conjunción de todos los parámetros, cálculos, consideraciones y requerimientos mencionadas a lo largo de este artículo, reflejadas en una combinación entre el ala, fuselaje y estabilizadores. Finalmente, se logra obtener un modelo revolucionario y de fácil adaptación como se observa en la figura 17.

En la figura 17 se muestran las dimensiones principales de la aeronave en sus respectivas vistas e isométrico. Como se puede detallar, esta UCAV posee dimensiones similares a las de un F-22 en cuestión de

su longitud (18,8 m) y altura (5,09), según las especificaciones reportadas por la compañía diseñadora (Lockheed Martin Corporation, 2021). La envergadura de esta aeronave es mayor a la del F-22 y esto pasa principalmente por el requerimiento de la misión CAS, la cual exige a la aeronave volar a una menor velocidad que la de crucero de forma segura, por ende, es necesario tener una mayor área alar para así generar la sustentación requerida para esta tarea, y mantener el perfil aerodinámico seleccionado. Esta primicia se puede observar también en el modelo de A-10 Thunderbolt II, una aeronave que, según las especificaciones reportadas por Northrop Grumman, esta aeronave posee 17,42 m de envergadura (Northrop Grumman, 2021).

Se podría entonces calificar como una aeronave pesada, no solo caracterizada por la capacidad de armamento, sino por sus dimensiones. También es posible observar cómo todo el diseño de la aeronave está adaptado a la furtividad, lo que evidencia curvas y superficies que generan ángulos propicios para lograr esta característica.

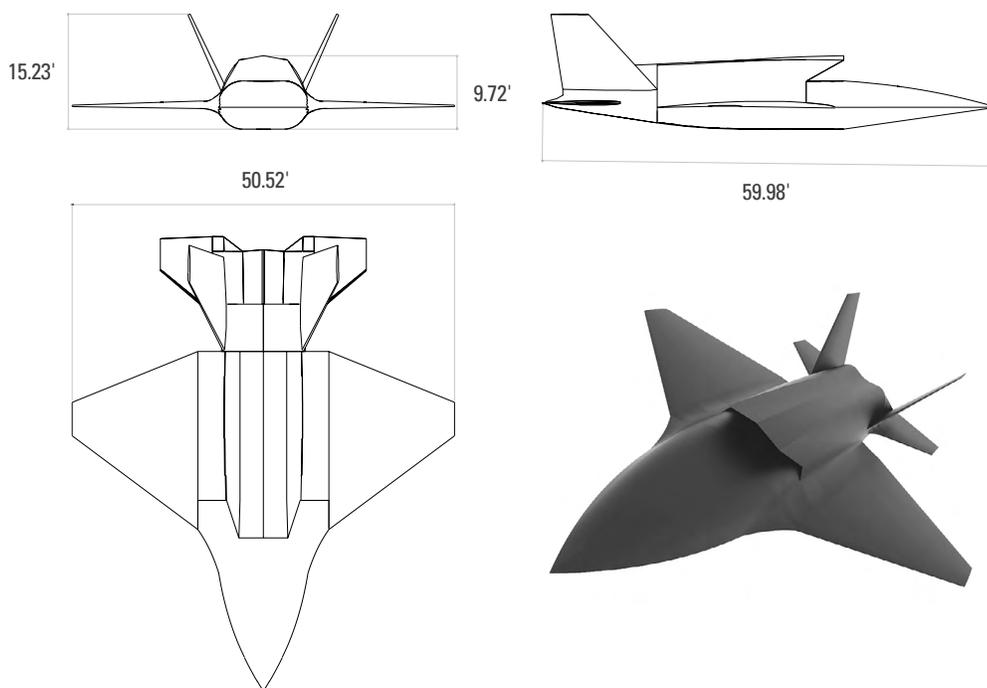


Figura 17. Diseño final de la aeronave para la nueva generación de CAS (dimensiones en ft)
Fuente: elaboración propia.

Conclusiones

El diseño planteado estipula una nueva generación de aeronaves CAS para el cumplimiento de misiones de apoyo aéreo cercano, donde por medio de las capacidades tecnológicas especificadas para las aeronaves de combate de quinta generación y no tripuladas, se plantea una visión realista acondicionada a las exigencias de los próximos 20 años de la aviación militar.

Igualmente, el énfasis de furtividad radicado en el diseño de la aeronave se aproxima a las concepciones de la guerra moderna que se plantean para los años venideros, un elemento de alta importancia para la adquisición de nuevas flotas que velen por la soberanía nacional e internacional de cada uno de los países que requieren de este tipo de instrumentos en sus instituciones. Por otra parte, la obtención de un RCS igual a 0,0038 m² permite conseguir una aeronave de quinta generación de competitividad multilateral en condiciones aerodinámicas y de supervivencia, con cumplimiento de misiones y versatilidad en la operación.

Teniendo en cuenta cada uno de los parámetros estudiados de supervivencia, es importante mencionar que el éxito de esta aeronave frente a misiones de alto riesgo donde se encuentre con múltiples amenazas la beneficia de una manera incondicional, y posibilita que cada una de las selecciones geométricas y estructurales haga parte idónea del diseño final. Además, su distribución alar y conceptualización de fuselaje le permiten adquirir configuraciones limpias manteniendo una capacidad de carga paga especial y no existente en aeronaves de su misma categoría. Cabe agregar que, gracias a su condición de aeronave no tripulada, proporciona una mejora en la toma de decisiones dentro del campo de batalla al reducir el estrés en cabina y salvaguardar la vida del personal durante su operación.

Finalmente, el diseño obtenido demuestra las posibilidades de desarrollo para las próximas generaciones de aeronaves no tripuladas, enfocadas en el comportamiento ante ondas electromagnéticas

provenientes de radares. De igual manera, se deja en claro que existen todos los medios para la obtención de aeronaves con bajo RCS, y con las herramientas utilizadas se podría formular una metodología de diseño que tome en cuenta esta área de innovación.

Declaración de conflicto de interés: Los autores no manifiestan conflictos de interés institucionales ni personales.

Referencias

- Atique, M. S. A., Barman, S., Nafi, A. S., Bellah, M., & Salam, M. A. (2016, 12 de julio). *Design of a fifth generation air superiority fighter*. AIP Conference Proceedings, 1754. <https://doi.org/10.1063/1.4958444>
- Airforce Magazine. (2019). *B-2 at 30: Improving with Age*. Air Force. https://www.airforcemag.com/PDF/MagazineArchive/Magazine%20Documents/2019/July%202019/0719_B-2%20for%20DR.pdf
- Au, T. A., Hoek, P. J., & Lo, E. H. S. (2018). *Combat Analysis of Joint Force Options using Agent-Based Simulation*. 2018 Military Communications and Information Systems Conference (MilCIS), 1-7. <https://doi.org/10.1109/milcis.2018.8574114>
- Biswas, K. (2020). *Military Aviation Principles*. *Military Engineering*, 1. <https://doi.org/10.5772/intechopen.87087>
- Bravo-Mosquera, P. D., Cerón-Muñoz, H. D., Díaz-Vázquez, G., & Martini-Catalano, F. (2018). *Conceptual design and CFD analysis of a new prototype of agricultural aircraft*. *Aerospace Science and Technology*, 80, 156-176. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2018.07.014>
- Chairman of the Joint Chiefs of Staff (CJCS). (2014). *Close Air Support* (Joint Publication 3-09.3 ed.). Defense Department Intelligence and Security. https://fas.org/irp/doddir/dod/jp3_09_3.pdf
- Chatzigeorgiadis, F., & Naval Postgraduate School Monterey CA. (2004). *Development of Code for a Physical Optics Radar Cross Section Prediction and Analysis Application*. Van Duuren Media.
- Chen, S., Yue, K., Hu, B., & Guo, R. (2015). *Numerical Simulation on the Radar Cross Section of Variable-Sweep Wing Aircraft*. *Journal of Aerospace Technology and Management*, 7(2), 170-178. <https://dx.doi.org/10.5028/jatm.v7i2.416>

- Chen, W. (2004). *The Electrical Engineering Handbook*. Elsevier Academic Press.
- Cidrás-Estévez, J. (2019). *Herramienta Informática para el Diseño Conceptual de Aeronaves de Tipo Subsónica y Estudio de las Actuaciones*. Universidad de Cádiz. <https://rodin.uca.es/xmlui/handle/10498/22567?locale-attribute=es>
- Correll, J. (2019, 5 diciembre). *The Ups and Downs of Close Air Support*. Air Force Magazine. <https://www.airforcemag.com/article/the-ups-and-downs-of-close-air-support/>
- Cummings, R. M., & Schütte, A. (2012). Integrated computational/experimental approach to unmanned combat air vehicle stability and control estimation. *Journal of Aircraft*, 49(6), 1542–1557. <https://doi.org/10.2514/1.C031430>
- Deskin, W., & Yankel, J. (2002). Development of the F-22 Propulsion System. *38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, 1-10. <https://doi.org/10.2514/6.2002-3624>
- Sathyamoorthy, D. (2015). A Review of Security Threats of Unmanned Aerial Vehicles and Mitigation Steps. *The Journal of Defence and Security*, 6(1), 81-97. https://www.researchgate.net/publication/282443666_A_Review_of_Security_Threats_of_Unmanned_Aerial_Vehicles_and_Mitigation_Steps
- Dirwan, A. (2020). The Analysis of Fighter Aircraft Requirement and Pilot Training for Indonesia's Air Area Security. *International Journal of Solid State Technology*, 63(3), 1.631-1.632. http://eprints.universitassuryadarma.ac.id/478/1/9_Dirwan.EPrint.pdf
- Fields, N. R. (2012). Advantages and challenges of unmanned aerial vehicle autonomy in the Postheroic age [Tesis doctoral. James Madison University]. <https://commons.lib.jmu.edu/master201019/205/>
- Green, J., & Zeckhauser, R. (2019). Thunder Versus Lightning: A Performance and Cost Analysis of the A-10 "Warthog" Versus the F-35 Joint Strike Fighter. *Journal of Benefit-Cost Analysis*, 10(3), 434-468. <https://doi.org/10.1017/bca.2019.27>
- Ho, O. (2018). *Future Air Force Close Air Support Aircraft*. The Faculty of the Department of Aerospace Engineering San José State University. <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/AD1104495.pdf>
- Jenn, D. (2019). Radar and laser cross section engineering (3th ed). AIAA Education Series.
- James, D. L., & Gouré, D. (2019). *The Implications of Fifth-Generation Aircraft for Transatlantic Airpower A Primer*. Atlantic Council. <https://www.atlanticcouncil.org/wp-content/uploads/2019/10/FINAL-Air-Power-Domain-Report-WEB-1.pdf>
- Kong, W., Zhou, D., Yang, Z., Zhang, K., & Zeng, L. (2020). Maneuver Strategy Generation of UCAV for within Visual Range Air Combat Based on Multi-Agent Reinforcement Learning and Target Position Prediction. *Applied Sciences*, 10(15), 5198. <https://doi.org/10.3390/app10155198>
- Liangliang, C., Kuizhi, Y., Weigang, G., & Dazhao, Y. (2016). Integration analysis of conceptual design and stealth-aerodynamic characteristics of combat aircraft. *Journal of Aerospace Technology and Management*, 8(1), 40-48. <https://doi.org/10.5028/jatm.v8i1.514>
- Lockheed Martin Corporation. (2021). *F-22 Raptor Digital, Dominant, Ready*. Lockheed Martin Corporation. <https://www.lockheedmartin.com/en-us/products/f-22.html>
- Nordhagen, L. C. (2018). *A-10 Adaptive Basing Operations and Applications in Support of SOF*. Naval Postgraduate School. <https://apps.dtic.mil/sti/citations/AD1069675>
- Northrop Grumman. (2021). *A-10 Thunderbolt II Specifications*. Northrop Grumman. <https://www.northropgrumman.com/what-we-do/air/a10-thunderbolt/>
- Rani, C., Modares, H., Sriram, R., Mikulski, D., & Lewis, F. L. (2016). Security of unmanned aerial vehicle systems against cyber-physical attacks. *Journal of Defense Modeling and Simulation*, 13(3), 331-342. <https://doi.org/10.1177/1548512915617252>
- Raymer, D. P. (2018). *Aircraft Design: A Conceptual Approach* (Sixth Edition). American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA).
- Sepúlveda-Palacios, E., & Smith, H. (2019a). *Conceptual design of a fifth generation unmanned strike fighter*. AIAA SciTech 2019 Forum. <https://doi.org/10.2514/6.2019-0811>
- Sepúlveda-Palacios, E., & Smith, H. (2019b). Impact of mission requirements on the design of low observable UCAV configurations. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 91(10), 1295-1307. <https://doi.org/10.1108/AEAT-09-2018-0249>
- Touzopoulos, P., Boviatsis, D., & Zikidis, K. C. (2018). Constructing a 3D model of a complex object from 2D images, for the purpose of estimating its Radar Cross Section (RCS). *Journal of Computations & Modelling*, 1(1), 15-28.
- Watts, B. D. (2013). *The Evolution of Precision Strike*. Center for Strategic and Budgetary Assessments. <https://csbaonline.org/uploads/documents/Evolution-of-Precision-Strike-final-v15.pdf>
- Yaacoub, J.-P., Noura, H., Salman, O., & Chehab, A. (2020). Security analysis of drones systems: Attacks, limitations, and recommendations. *Internet of Things*, 11, 100218. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2020.100218>

Picosatélite diseñado para medir concentración de gases de efecto invernadero y registrar imágenes en vuelo

| Fecha de recibido: 18 de febrero del 2021 | Fecha de aprobación: 12 de abril del 2021 |

Juan David Osorio Henao

Ingeniero civil

Estudiante de Ingeniería Aeroespacial de la Universidad de Antioquia Colombia
Grupo de investigación Aerospace Science and Technology ReseArch (ASTRA)
Semillero de investigación Voyager
Función de investigador: teórico, experimental y escritura
<https://orcid.org/0000-0003-4166-9504>
✉ juan.osorih1@udea.edu.co

Melissa Galeano Ruiz

Estudiante de Ingeniería Mecánica

Universidad de Antioquia Colombia
Grupo de investigación Aerospace Science and Technology ReseArch (ASTRA)
Semillero de investigación Voyager
Función de investigador: teórico y escritura
<https://orcid.org/0000-0003-2396-5721>
✉ melissa.galeanor@udea.edu.co

Johan Jabrini Botina Monsalve

Estudiante de Ingeniería Aeroespacial

Universidad de Antioquia Colombia
Grupo de investigación Aerospace Science and Technology ReseArch (ASTRA)
Semillero de investigación Voyager
Función de investigador: teórico y escritura
<https://orcid.org/0000-0003-0337-844X>
✉ jabrini.botina@udea.edu.co

Juan Pablo Higueta Echavarría

Estudiante de Ingeniería Mecánica

Universidad de Antioquia Colombia
Grupo de investigación Aerospace Science and Technology ReseArch (ASTRA)
Semillero de investigación Voyager
Función de investigador: teórico y escritura
<https://orcid.org/0000-0003-2545-2305>
✉ jpablo.higueta@udea.edu.co

David Andrés Díaz Álvarez

Estudiante de Ingeniería Aeroespacial

Universidad de Antioquia Colombia
Grupo de investigación Aerospace Science and Technology ReseArch (ASTRA)
Semillero de investigación Voyager
Función de investigador: teórico, experimental y escritura
<https://orcid.org/0000-0002-3487-6735>
✉ david.diaza@udea.edu.co

Luis Felipe Burbano Mosquera

Estudiante de Ingeniería Aeroespacial

Universidad de Antioquia Colombia
Grupo de investigación Aerospace Science and Technology ReseArch (ASTRA)
Semillero de investigación Voyager
Función de investigador: teórico y escritura
<https://orcid.org/0000-0003-1748-8631>
✉ felipe.burbano@udea.edu.co

Cómo citar este artículo: Osorio Henao, J. D., Botina Monsalve, J. J., Díaz Álvarez, D. A., Galeano Ruiz, M., Higueta Echavarría, J. P., & Burbano Mosquera, L. F. (2021). Picosatélite diseñado para medir concentración de gases de efecto invernadero y registrar imágenes en vuelo. *Ciencia y Poder Aéreo*, 16(1), 75-86, <https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaereo.697>



Picosatélite diseñado para medir concentración de gases de efecto invernadero y registrar imágenes en vuelo

Resumen: El equipo VoltaX, conformado por estudiantes del programa de Ingeniería Aeroespacial de la Universidad de Antioquia, desarrolló un CanSat —sistema satelital del tamaño de una lata de refresco— para la competencia Retos de Innovación CanSat Colombia 2020, evento organizado por la Sociedad de Sistemas Electrónicos y Aeroespaciales (AESS por sus siglas en inglés) del capítulo colombiano del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE). El satélite fue diseñado para cumplir con los requerimientos de misión dados por la organización, los cuales incluían la transmisión constante de los datos a la estación terrena a 1000 m de distancia, la medición de temperatura, la aceleración lineal, los campos magnéticos y la presión atmosférica para determinar la altitud. Adicionalmente, se utilizó un sensor de gas para la medición de metano y una cámara GoPro para tomar imágenes de alta calidad, con el fin de hacer un monitoreo de los gases de efecto invernadero y utilizar las imágenes aplicadas a la agricultura de precisión. En la fabricación del prototipo se emplearon la manufactura aditiva y los componentes electrónicos Commercial Off-The-Shelf (COTS por sus siglas en inglés, que traduce “productos comerciales estándar”) para minimizar los costos. Por último, se realizaron pruebas funcionales de todos los subsistemas, con las cuales se corroboró el correcto funcionamiento del CanSat. Cabe agregar que el picosatélite, identificado con las placas VOLT4201, consiguió en la competencia el segundo puesto en su categoría.

Palabras clave: CanSat; producto comercial estándar (COTS por sus siglas en inglés); gases de efecto invernadero (GEI); unidad de medición inercial (IMU por sus siglas en inglés); telemetría; sensoramiento remoto; sistema de posicionamiento global (GPS por sus siglas en inglés).

Picosatellite for Measuring Greenhouse Gas Concentrations and Recording Images during Flight

Abstract: The VoltaX team, made up of Aerospace Engineering students at the University of Antioquia, developed a CanSat —a satellite system the size of a soda can— for the CanSat Colombia 2020 Innovation Challenge, an event organized by the IEEE Aerospace and Electronic Systems Society (AESS) Colombian Chapter. The satellite was designed to meet the mission requirements established by the organization, which included the constant transmission of data to the earth station at 1,000 m distance, measuring variables such as temperature, linear acceleration, magnetic field, and atmospheric pressure. Additionally, a gas sensor and a GoPro camera were used to estimate methane concentrations and capture high-quality images, respectively, with the purpose of monitoring greenhouse gases and using the images for precision agriculture applications. Additive manufacturing and commercial-off-the-shelf (COTS) electronic components were used to build the prototype, thus minimizing costs. Finally, functional tests were carried out on all the subsystems, confirming the correct operation of the CanSat. The designed picosatellite, identified with VOLT4201 plates, took the second place within its category.

Keywords: CanSat; commercial off-the-shelf (COTS); greenhouse gas; inertial measurement unit (IMU); telemetry; remote sensing; Global Positioning System (GPS).

Picosatélite projetado para medir a concentração de gases do efeito estufa e registrar imagens em voo

Resumo: A equipe VoltaX, formada por estudantes do programa de Engenharia Aeroespacial da Universidade de Antioquia, desenvolveu um CanSat -sistema por satélite do tamanho de uma lata de refrigerante- para a competição Desafios de Inovação CanSat Colômbia 2020, evento organizado pela Sociedade de Sistemas Eletrônicos e Aeroespaciais (AESS) do capítulo colombiano do IEEE (Instituto de Engenheiros Elétricos e Eletrônicos). O satélite foi desenhado para cumprir com os requerimentos de missão dados pela organização, os quais incluíam a transmissão constante dos dados à estação terrena a 1000 m de distância, a medição da temperatura, a aceleração linear, os campos magnéticos e a pressão atmosférica para determinar a altitude. Além disso, um sensor de gás para a medição de metano e uma câmera GoPro foram usados para tirar imagens de alta qualidade, a fim de monitorar os gases do efeito estufa e usar as imagens aplicadas à agricultura de precisão. Na fabricação do protótipo foram empregados a manufatura aditiva e os componentes eletrônicos Commercial Off-The-Shelf (COTS por suas siglas em inglês, que traduz "produtos comerciais padrão") para minimizar os custos. Por último, foram realizados testes funcionais a todos os subsistemas, com os quais se corroborou o bom funcionamento do CanSat. Deve-se acrescentar que o picosatélite, identificado com as placas VOLT4201, conseguiu na competição o segundo lugar na sua categoria.

Palavras-chave: CanSat; produto comercial padrão (COTS por sua sigla em inglês); Gases do Efeito Estufa (GEE); Unidade de Medição Inercial (IMU por sua sigla em inglês); Telemetria; Sensoriamento remoto; Sistema de Posicionamento Global (GPS por sua sigla em inglês)

En la actualidad, acercarse al desarrollo espacial es un gran reto para los países en crecimiento, debido a que suele ser costoso; sin embargo, con la evolución de la electrónica muchos componentes han presentado una disminución en su costo en las últimas décadas (Fernández & Medel, 2019). Gracias a esto han nacido varias propuestas educativas que utilizan la tecnología de bajo costo conocida como producto comercial estándar (COTS), y que pretende desarrollar picosatélites como los CanSat (Paulo Silva Neto *et al.*, 2019). El CanSat es un dispositivo electromecánico que trata de simular los subsistemas de un satélite real en las dimensiones aproximadas de una lata de refresco (Anchino, 2019). El nacimiento de este tipo de propuestas ha hecho que países como México, Brasil y Colombia comiencen a implementar este modelo educativo para estimular el desarrollo de tecnología aeroespacial en sus territorios. Un ejemplo de ello es el Cube-design, una competencia latinoamericana de distintas universidades realizada en Brasil y que ha tenido una gran divulgación y crecimiento en los últimos años (INPE, 2020).

En Colombia existe el concurso de diseño de CanSat, Reto Innovación CanSat, organizado por el capítulo colombiano de la AESS para grupos de estudiantes. En esta competencia se desarrolló el CanSat VOLT4201 del equipo Voltax de la Universidad de Antioquia. Este grupo compitió en la categoría Cóndores, compuesta por estudiantes de primero a séptimo semestre de diferentes universidades colombianas, y logró ser finalista con el segundo puesto (AESS, 2020). En los lineamientos del concurso se asignaron las misiones Sabio Caldas y Nicola Tesla, las cuales determinaron los requerimientos para el diseño y construcción del CanSat; el proceso de diseño, pruebas, integración, manufactura y resultados se describen a continuación.

Objetivo de la misión

Actualmente es necesario medir el impacto de algunas actividades en el cambio climático, por lo que es

importante medir los gases de efecto invernadero que producen y tienen mayor repercusión en la atmósfera; teniendo esto en cuenta, el primer objetivo del CanSat es servir como plataforma que provea información de la concentración de gases de efecto invernadero, en específico el metano, en donde se desea realizar el lanzamiento (Chaudhry & Mishra, 2015; Faroukh *et al.*, 2019). Por este motivo, se usa un sensor de gas MQ2 para medir la concentración de metano en la atmósfera.

Cabe aclarar que el equipo está ubicado en el oriente antioqueño, por lo cual desde el principio se planteó tener un monitoreo de los gases producto de las actividades de esta zona. Según un estudio realizado por la Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare (Cornare) la ganadería representa el 40 % de la actividad económica de la zona (Cornare, 2016); por lo anterior, es importante saber cómo esta actividad contribuye al cambio climático (Constantini *et al.*, 2018). Además, el CanSat posee una cámara GoPro mediante la cual se obtienen imágenes a lo largo del vuelo, que pueden ser utilizadas para aplicaciones agrícolas, territoriales o topográficas; por esta razón, el CanSat está orientado a ser una herramienta en el sector agrícola e incursionar en lo que se conoce como agricultura de precisión.

Además, utilizar la cámara permite detectar ciertos índices vegetales “como el Triangular Greenness Index (TGI)” para medir la cobertura foliar de un cultivo (Hunt *et al.*, 2012) y determinar su salud. En resumen, los objetivos de la misión son medir la concentración de gases de efecto invernadero, capturar imágenes que puedan ser usadas en la agricultura de precisión y, por último, transmitir los datos a una estación terrena (Fretes & Gómez, 2018).

Requerimientos de la misión

Los requerimientos dados por el concurso se resumen en la tabla 1. El diseño fue trabajado a partir de estos y se logró alcanzar satisfactoriamente las exigencias en cada etapa.

Tabla 1.
Requerimientos de la misión dados
por la organización del concurso

Requerimientos	
Funcionales	Medir temperatura, presión atmosférica y altitud.
	Añadir sensores de aceleración, geolocalización, giroscopio, altímetro, telecomandos, la medición de gases y la toma de imágenes.
Operacionales	Transmisión de datos una vez por segundo a la estación terrena.
	Almacenamiento a bordo.
	Mostrar evidencias de captura y recepción de datos mediante gráficos de tiempo-altitud, temperatura-altitud, presión atmosférica-altitud y otros.
	Alcance mayor a 1 km, entre el CanSat y la estación terrena.
Restricciones	Peso máximo de 500 g.
	Todos los componentes deben estar contenidos en la lata, los únicos componentes externos permitidos son el paracaídas y la antena.
	Dimensiones de una lata de 350 ml (geometría cilíndrica).

Fuente: AESS (2020).

Subsistemas

Computadora de vuelo

La computadora de vuelo se encarga de la medición de variables físicas, control de componentes, almacenamiento y comunicación de los datos, además, envía señales a diversos componentes que posee el CanSat, regula los intervalos de tiempo en los que se realizarán las actividades y controla tareas de los demás subsistemas. Por lo tanto, controla los sensores de la Unidad de Medición Inercial (IMU, por sus siglas en inglés), con la que se puede obtener información directamente relacionada con el vuelo, como la posición, orientación, aceleración, velocidad y presión; así mismo, es responsable de suministrar energía a otros componentes como el LoRa Ra-02, utilizado en el subsistema de telemetría.

Para la selección de la computadora de vuelo, se analizaron diferentes alternativas como Arduino Uno, Arduino Nano, Raspberry Pi, Arduino Mega Pro Mini, entre otras. Se eligió el Arduino Mega Pro debido a

aspectos como el precio, el tamaño, la compatibilidad de protocolos de comunicación que posee I2C y SPI, número de pines digitales (54), entradas analógicas (16), salida de voltaje a 5 V y a 3,3 V, velocidad de reloj (16 MHz), facilidad de programación y compatibilidad con múltiples componentes electrónicos.

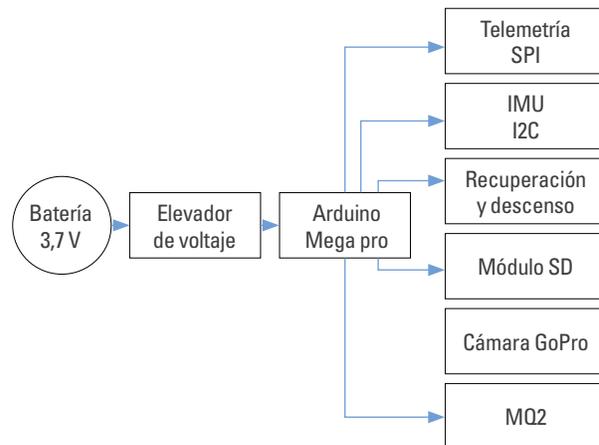


Figura 1. Diagrama de los componentes electrónicos usados en el CanSat y su suministro de voltaje.

Fuente: elaboración propia.

En la selección de la IMU se contemplaron diversas posibilidades, entre estas GY-89, GY-52 y GY-802; sin embargo, se notó que todas las alternativas tenían similitud en cuanto al voltaje de funcionamiento, los protocolos de comunicación (I2C y SPI), la sensibilidad y demás parámetros, así que se optó por elegir la opción más económica, en este caso la IMU GY-89, que es una combinación de los sensores BMP180 (barómetro), L3GD320 (giroscopio) y LSM303D (magnetómetro). El diagrama de la computadora de vuelo se puede ver en la figura 1.

También se decidió emplear un módulo SD para el almacenamiento de datos durante el vuelo. Este no es el sistema principal de almacenamiento de datos, ya que se generó el envío de datos cada segundo a la estación terrena, por lo que el módulo SD es un sistema de respaldo a la transmisión de datos; en este caso, la misma información que se envía a la estación terrena es almacenada en una SD de 8 GB, un componente redundante para garantizar la recopilación de los datos durante el vuelo.

Adicional a los sensores mencionados, se empleó un sensor MQ2, que es electroquímico, el cual genera una resistencia de acuerdo con la concentración de gases que hay en el exterior. Para utilizar este sensor, se requiere realizar un calentamiento previo de diez minutos, el rango que puede medir este sensor es de 300 a 10.000 ppm de metano, propano, butano, alcohol, hidrógeno y otros, y el voltaje que requiere es de 5 V —revisar la figura 2— (Heyasa & Galarpe, 2017).

Para la programación del subsistema, se usaron diferentes librerías de Arduino que permiten interactuar con los sensores instalados en el CanSat. Así mismo, como se mencionó, para la medición del gas metano se utilizó un sensor MQ2, y para la IMU GY-89 se usaron librerías de tres sensores: LSM303D (Herrada, 2020b), L3GD20 (Herrada, 2020a) y BMP180 (Ladyada, 2020).



Figura 2. Sensor MQ2.
Fuente: imagen tomada de Seed (2015).

Estructura

La estructura es la encargada de albergar todos los componentes electrónicos del CanSat, la cual brinda soporte y protección, además de desempeñar un papel fundamental para la organización y distribución de los demás subsistemas, por lo que es un punto clave para el éxito de la misión. Asimismo, la estructura se ve sometida a diferentes fuerzas producidas por las múltiples aceleraciones y vibraciones sufridas durante el

vuelo (Colin, 2016). Por lo anterior, el equipo se enfocó en presentar una alternativa que minimizara estas adversidades, para garantizar un buen comportamiento frente a estos esfuerzos presentes en la estructura. La propuesta se centró en un diseño de geometría cilíndrica similar a una lata de refresco de 350 ml, con un armazón interior, de acuerdo con una distribución modular de tipo estante (Méndez, 2017), donde se organizan los diferentes componentes electrónicos de cada subsistema en distintas placas horizontales dispuestas a lo largo del CanSat; estas placas son sostenidas y acopladas entre sí por una serie de columnas verticales que se encargan de soportar la mayoría de los esfuerzos provenientes del vuelo y aterrizaje.

La estructura descrita, así como su distribución, se presentan en la figura 3, en esta se pueden observar los componentes estructurales principales:

1. Una carcasa exterior que sigue un patrón de lámina delgada formando una sección tubular con dos tapas en sus extremos, adicionalmente cuenta con diferentes aberturas necesarias para los dispositivos encargados del análisis de gases en la atmósfera y de la captura de imágenes del terreno. Su función principal es proteger los dispositivos electrónicos y la estructura interna de impactos, además de aislarlos del medio externo. A su vez, se decidió fabricar esta carcasa en Ácido Poliláctico (PLA), que permite ser manufacturado por impresión 3D, además posee buenas propiedades mecánicas, baja densidad y es fácil de adquirir.
2. Tres placas horizontales que siguen un patrón circular conforman la base para alojar los dispositivos electrónicos y sirven como punto de anclaje a otros componentes estructurales, como las tres columnas ubicadas entre las dos placas superiores y el sistema de cuatro columnas inferiores diseñado exclusivamente para soportar el módulo de captura de imágenes. Ambos sistemas están contruidos en nailon 6,6 y se encargan de reducir las vibraciones y la mayoría de los esfuerzos provenientes del vuelo y aterrizaje.

Figura 3. Estructura y dispositivos electrónicos
Fuente: elaboración propia.

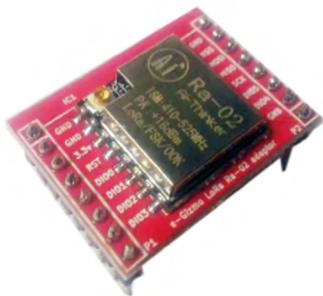
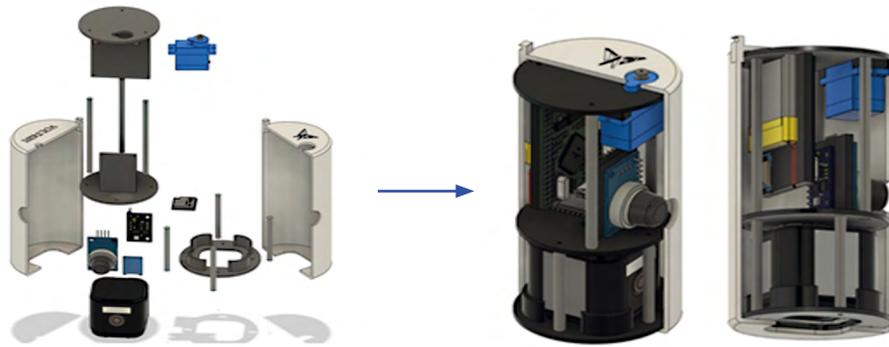


Figura 4. Módulo Lo-Ra 02, imagen tomada de e-Gizmo
Fuente: elaboración propia.

Comunicaciones y telemetría

El subsistema de telemetría se encarga de recolectar y transmitir datos en tiempo real durante todas las fases de vuelo desde el picosatélite hasta la estación terrena, la cual es capaz de almacenar esta información de manera ordenada para ser analizada posteriormente, según la misión especificada. La interacción entre el CanSat y el usuario se da a partir de este subsistema

que posee dos partes primordiales: un módulo transmisor que toma la información obtenida por la carga útil durante el vuelo y la transmite en forma de ondas de radio, y un módulo receptor en tierra conectado a un computador a través de un módulo Arduino, en donde se almacena y procesa la información.

En el sistema de comunicación se emplearon dos módulos LoRa Ra-02 —figura 4— debido a su alto rango de transmisión, el cual es de 10 km, suficiente para la misión que exige un rango de 1 km. Además, tiene una tasa de transmisión de datos (300 kb/s) y su precio es asequible (e-Gizmo, 2017).

En la figura 5 se muestra el esquema del proceso de comunicación desde el CanSat hacia la estación terrena, allí el Arduino recibe los datos enviados por el módulo transmisor. Este módulo los envía a la estación terrena, en donde son recibidos por el módulo receptor, después se transmiten al microcontrolador que a su vez está conectado a una computadora en donde los datos son visualizados usando un código escrito en Python.

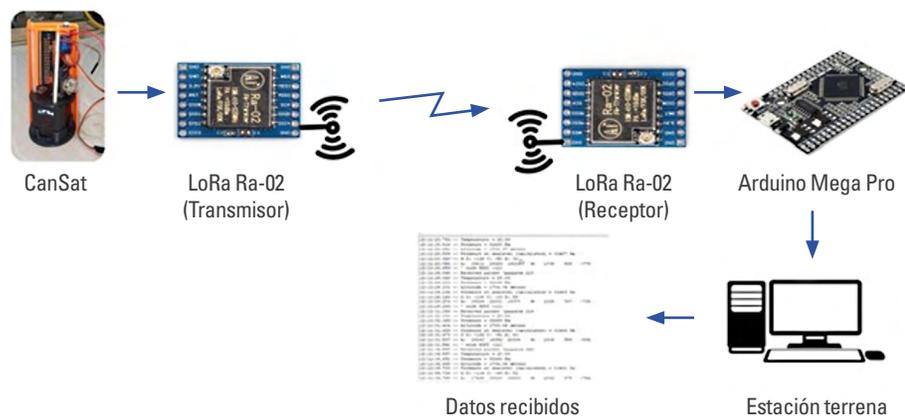


Figura 5. Proceso de la comunicación y la información
Fuente: elaboración propia.

Descenso y recuperación

Es fundamental que el CanSat llegue a tierra sin ningún daño, conservando sus componentes intactos, y que transmita señales que permitan ubicar su lugar de aterrizaje; de esta forma se posibilita una futura reutilización del picosatélite y un cumplimiento idóneo de la misión, de lo cual se encarga el subsistema de recuperación.

El componente principal del subsistema de recuperación es un paracaídas hecho en ripstop nailon, este material es confiable por su alta resistencia a la tracción. A partir del artículo de Ferraz *et al.* (2017), en donde se explica el diseño de un CanSat y los requerimientos básicos de la competencia de picosatélites (CanSat Competition, 2020), se desarrollaron los cálculos necesarios para el descenso y se encontró que lo ideal sería una velocidad de descenso de 5 m/s, para que los instrumentos del CanSat no sufran ningún daño durante el aterrizaje. En ese sentido, la geometría elegida para el paracaídas fue de tipo hexagonal, con un diámetro de 60 cm y con seis cuerdas sujetas al CanSat, una en cada esquina del hexágono; con esta configuración se esperó tener un tiempo de descenso aproximado de 200 s desde una altura de 1000 m. En la tabla 2 se pueden ver las velocidades de llegada del CanSat desde tres alturas distintas, estas fueron simuladas en el programa Open Rocket (ESA, n. d; Mohd *et al.*, 2020).

Para la activación del paracaídas se realizó un algoritmo que determina la variación de su posición cada segundo con respecto a la medición anterior; en caso de que aumentara su altitud, el subsistema permanecía sin activarse. No obstante, tan pronto este empieza a obtener cambios de altitud negativos, el Arduino envía una señal eléctrica al servomotor, lo cual activa el subsistema de recuperación. El accionamiento del paracaídas se hace con la ayuda de un servomotor que al actuar suelta una banda elástica que está sujeta al paracaídas. Además, el picosatélite tiene integrado un módulo Sistema de Posicionamiento Global (GPS, por sus siglas en inglés), que transmite su posición a la estación terrena y facilita la recuperación del CanSat.

Tabla 2.
Simulaciones de descenso

	Velocidad del viento (m/s)	Altura en que se abre el paracaídas (m)	Velocidad de llegada al suelo (m/s)
Simulación 1	0	480	5,6
Simulación 1	30	338	5,5
Simulación 2	0	557	4,9
Simulación 2	30	497	6,5
Simulación 3	0	1061	4,3
Simulación 3	30	1042	5,3

Fuente: elaboración propia.

Por último, se usó el software Open Rocket para calcular la altura con relación al tiempo —figura 6— usando los datos de la simulación 3 con la velocidad del viento de 0 m/s —tabla 2—. El eje vertical es la altitud dada en metros, el eje horizontal es el tiempo dado en segundos, y la línea azul es la altitud que varía con respecto al tiempo, desde el momento en que se activa el paracaídas (1061 m) hasta que el CanSat aterriza.



Figura 6. Gráfica de la simulación del descenso altura vs. tiempo realizada en Open Rocket

Fuente: elaboración propia.

Potencia eléctrica

Es el subsistema que provee la energía a los componentes electrónicos presentes en el CanSat a excepción de la cámara, porque esta posee su batería propia. Está compuesto esencialmente por una

batería que suministra la energía necesaria para los demás subsistemas y componentes. En este caso, el Arduino requiere una alimentación entre 7 V y 9 V, los demás componentes del CanSat se comunican mediante los puertos I/O que posee el Arduino; además, este tiene pines a tierra de 3,3 V y 5 V que permiten la adecuada conexión de los otros componentes, de acuerdo con sus especificaciones técnicas. De este modo, el Arduino actúa como un sistema de distribución de energía y sirve como controlador de todos los componentes.

Al contar con una batería propia, la cámara no necesita alimentación de la batería que provee energía al Arduino. Ahora bien, los criterios de selección para la batería son el voltaje que posee, la capacidad de carga y descarga, la facilidad de ensamblaje, el tamaño, peso y la facilidad de carga. Teniendo en cuenta lo anterior se optó por el uso de una batería de LiPo de 3,7 V de 1200 mAh —figura 7—. Este tipo de batería fue seleccionada debido a su gran capacidad de descarga, necesaria para alimentar eficazmente el circuito de activación del sistema de descenso, ya que suele requerir alta corriente en un intervalo de tiempo muy corto, además, la energía que almacena es suficiente para la alimentación de los demás componentes electrónicos por el tiempo que se requiere. No obstante, debido a su voltaje limitado, requiere de un elevador de voltaje para

entregar los valores requeridos por otros componentes. Su bajo voltaje se debe a que las baterías tipo LiPo, por lo general, son usadas en drones y cuentan con un voltaje de salida de 3,7 V, baterías de mayor voltaje suelen ser de mayor tamaño y peso, por lo que se descarta esta opción; estas baterías tienen una tecnología de mayor duración que permite aumentar los ciclos de carga y descarga, por lo que ambientalmente tiene un menor impacto. Adicionalmente, se requiere de un elevador de voltaje para llegar al voltaje que necesita el Arduino, cuyo rango de operación está entre 7 V y 9 V.

Integración y manufactura

Es necesario integrar todos los subsistemas y lograr que trabajen en armonía para un correcto desarrollo de la misión, lo cual se realiza al momento de hacer la manufactura del prototipo. La manufactura está caracterizada por la implementación de tecnologías de prototipado, un ejemplo de ello es la impresión 3D por medio de software especializado que le permitió al equipo afrontar de forma remota todas las dificultades de construcción y diseño que se pudieran presentar durante el periodo de contingencia debido al virus SARS-CoV-2 (Ministerio de Salud de Colombia, 2020).

La estructura fue fabricada en impresión 3D usando solamente PLA, con una forma cilíndrica hueca. A su

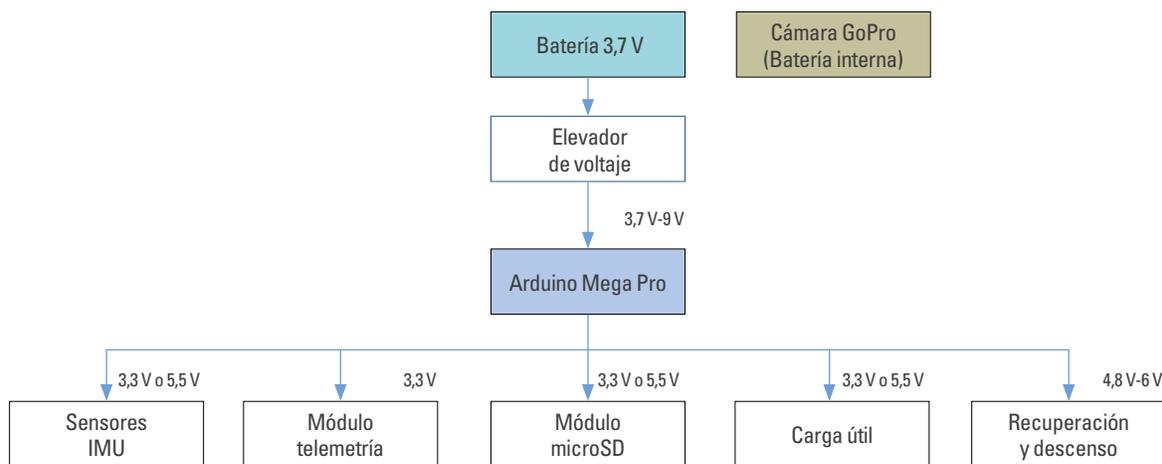


Figura 7. Esquema de distribución de voltaje

Fuente: elaboración propia.

vez, posee dos tapas en sus extremos, las cuales se apoyan en tres columnas verticales de nailon y tienen tres niveles horizontales, también impresos en 3D, en los cuales se soporta la electrónica del CanSat. La electrónica se dispone en los tres niveles —como ya se describió—, los subsistemas de telemetría, potencia y computadora de vuelo se prueban conjuntamente a medida que se ensamblan, para corroborar el correcto funcionamiento de sus instrumentos, dado que todos dependen entre sí.

Después de verificar la correcta sujeción de cada elemento, se procedió a colocar las cubiertas —en la figura 3 se puede observar la integración y distribución de componentes en el CanSat—, el paracaídas se sujetó con sus seis cuerdas al soporte colocado en la parte superior de la estructura; por último, se plegó y se ubicó encima de la tapa superior del CanSat, donde se colocó la banda elástica tanto en el paracaídas como en el servomotor, de esta manera se completó la integración y ensamblaje del CanSat VOLT4201.

Resultados



Figura 8. Prototipo CanSat VOLT4201
Fuente: elaboración propia.

En suma, se diseñó y prototipó un CanSat —figura 8— capaz de medir variables físicas relacionadas directamente con el vuelo, tales como velocidad, aceleración, posición, temperatura, presión, altitud (Heyasa & Galarpe, 2017) y transmisión de la información en tiempo real a una estación terrena, que podría

estar ubicada a una distancia mayor a 1000 m. El sistema tiene, además, la capacidad de hacer captura de imágenes mediante una cámara GoPro. Por otra parte, el subsistema de recuperación es accionado en el apogeo mediante un servomotor, y libera el paracaídas que permite preservar los diversos componentes y aumentar el tiempo de vuelo logrando obtener una mayor cantidad de datos ambientales y de imágenes. El CanSat VOLT4201 es una herramienta de bajo costo, el valor de sus componentes fue de unos 330 USD —ver tabla 3 de peso y costo de los componentes—; es importante resaltar que el CanSat puede ser utilizado varias veces sin tener que comprar material extra.

Tabla 3.
Peso y costo de los componentes

Componentes	Peso (gramos)	Costo (COP)
Arduino Mega Pro	37	60,400
Cámara GoPro	73	800,000
Servomotor	9	5,399
Módulo LoRa Ra-02	2	28,000
Unidad de Medición Inercial (UMI)	2	44,030
Batería	30	75,000
Sensor de Metano MQ2	16	9,500
Paracaídas	22	50,000
Módulo SD	6	4,500
GPS	14	30,000
Elevador de voltaje	12	3,500
Antena LoRa	20	13,200
Cables	35	3,000
Estructura	150	50,000
Peso total / Costo total	429	1.176.529

Fuente: elaboración propia.

También se hicieron pruebas de toma de datos y telemetría para validar la programación, el diseño y el correcto funcionamiento de la electrónica presente en el CanSat; con ese objetivo se realizó el lanzamiento de varios cohetes fabricados por estudiantes de la Universidad de Antioquia y la Universidad Pontificia Bolivariana, en un ejercicio conjunto con la FAC desarrollado en el municipio de Puerto Boyacá (Fuerza Aérea Colombiana, 2019).

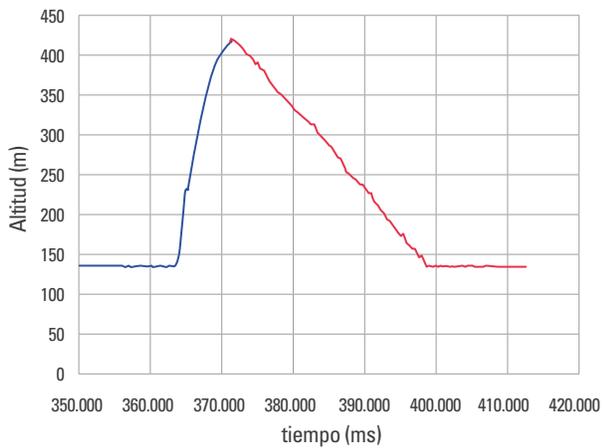


Figura 9. Perfil de vuelo obtenido en el lanzamiento en Puerto Boyacá
Fuente: elaboración propia.

En el vuelo realizado se buscó obtener datos directamente relacionados con el vuelo, como altitud, aceleraciones, velocidades y presión —figura 9—; además, se obtuvo información de la concentración de gases en toda la trayectoria usando el sensor de gases MQ2. De esta manera fue posible elaborar la figura 11, donde se presenta la variación del voltaje. Es necesario tener en cuenta que el análisis de la variación de voltaje se asocia directamente con la cantidad de metano detectado, de acuerdo con su *datasheet*; sin embargo, hace falta realizar una calibración previa del sensor. Este resultado evidenció que el sensor funcionó correctamente durante el vuelo. Para realizar la calibración e interpretar los datos se debe calcular el R_0 —resistencia inicial— en un ambiente donde se conozca la concentración de metano, y el R_s que es la resistencia del sensor asociada con la concentración de determinado gas (Heyasa & Galarpe, 2017). Para este proceso se deben utilizar las curvas que se aprecian en la figura 10. Sin embargo, no se obtuvieron los valores de concentración por la falta de un instrumento de referencia que permitiera calibrar el sensor y conseguir un dato más preciso de la concentración del metano en ppm.

Con el fin de probar el sistema de potencia antes de su integración en el CanSat se realizaron varias transmisiones de datos para analizar el tiempo de duración de batería y determinar la autonomía del CanSat. Los resultados mostraron que se podría tener

una duración de hasta 23 minutos desde el encendido de la electrónica; después de ese momento empezó a fallar el envío de datos. Si se quisiera aumentar el tiempo de duración de la misión, se tendría que utilizar una batería diferente, sin embargo, el tiempo de vuelo que se planeó fue inferior a 4 minutos —de acuerdo con las simulaciones descritas—, por lo cual se considera que la batería de 1.200 mAh tiene una capacidad de almacenamiento suficiente.

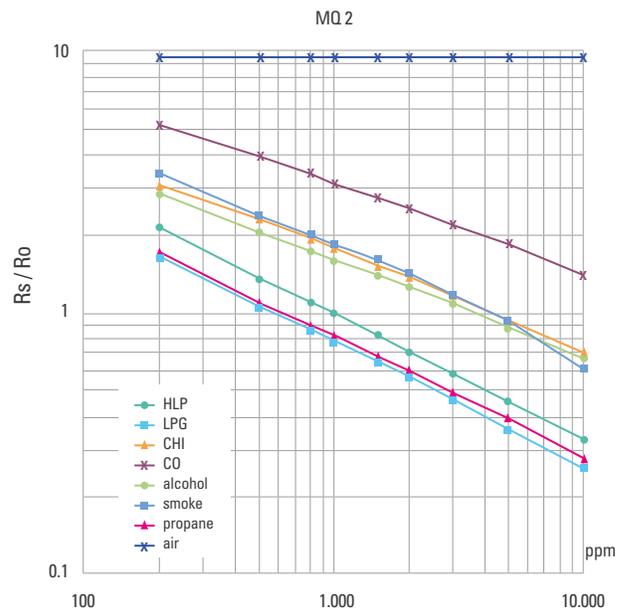


Figura 10. Relación $\frac{R_0}{R_s}$ para cada concentración de gas, obtenida a partir del *datasheet* del sensor MQ2
Fuente: elaboración propia.

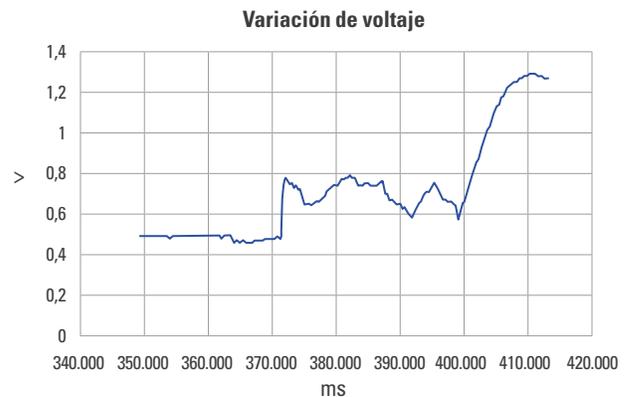


Figura 11. Variación de voltaje sensor MQ2 obtenido en el lanzamiento en Puerto Boyacá
Fuente: elaboración propia.

Conclusiones

Se diseñó y prototipó un dispositivo CanSat de bajo costo que permite realizar mediciones relacionadas con el vuelo, como las aceleraciones y velocidades y, además, mide la concentración de gases en múltiples zonas de estudio. Asimismo, a partir de los datos obtenidos se puede comparar cómo cambia la concentración de gases a medida que varía la altitud y el uso del suelo, por lo que se podrían cuantificar los impactos que tienen diversas actividades económicas, transporte, industria, agricultura, entre otras.

El diseño y la construcción de un dispositivo de estas características en condiciones de aislamiento por las medidas de contingencia del virus SARS-CoV-2 implicaron un reto significativo para el equipo involucrado. No obstante, la utilización de tecnologías de trabajo remoto, el uso de software especializado para el diseño y las herramientas relacionadas con la transmisión, procesamiento y almacenamiento digitalizado de la información supuso una gran ventaja para el desarrollo de este proyecto, pues gracias a ello se alcanzaron los objetivos propuestos por el concurso y la misión, por lo cual cabe destacar la importancia de la implementación de este tipo de tecnologías en los futuros proyectos que enfrente el equipo.

Igualmente, la implementación de la cámara Go-Pro en el CanSat es una ventaja por su versatilidad al facilitar su programación e instalación; sus opciones de ángulo de visión permiten tener una alta calidad de imágenes o videos, adicionalmente, su capacidad de almacenamiento y batería es de buen rendimiento —aunque es el componente que tiene el mayor costo—, a largo plazo se vuelve una buena inversión.

La batería LiPo de 3,7 V de 1200 mAh funcionó correctamente como fuente de potencia, al igual que el Arduino Mega Pro, el cual trabajó adecuadamente como distribuidor de esta. Así mismo, el elevador de potencia fue completamente necesario para suministrar la energía suficiente al Arduino y cada componente.

Es necesario realizar pruebas de telemetría a mayores distancias, aunque los componentes usados en telemetría tienen una ficha técnica que en teoría

funciona, es preciso evaluar el desempeño a grandes distancias, analizar el envío de datos y la calidad de la señal que se recibe. Así mismo, hay que tener en cuenta las vibraciones y posibles aceleraciones bruscas que se pueden generar en vuelo, para garantizar el suministro de información a la estación terrena de forma constante, luego se debe asegurar que los componentes no sean afectados por alguna perturbación del CanSat en su movimiento y que reciban energía constantemente.

Por último, el CanSat no ha sido probado en un ambiente real de trabajo, por lo que se espera realizar una misión en globo aerostático en la cual se prueben todos los subsistemas del CanSat para así demostrar su funcionalidad. El CanSat servirá como base para futuros proyectos no solo del equipo, sino también de la población estudiantil de la Universidad de Antioquia en general. Es necesario mencionar que para realizar pruebas en el espacio aéreo se contó con la autorización de la Aerocivil y la FAC para evitar posibles percances o accidentes.

Agradecimientos

Agradecemos a la Universidad de Antioquia y al Semillero de investigación Voyager, por su apoyo y aprobación para el desarrollo de este proyecto; al grupo de investigación ASTRA y Cipsela, por su acompañamiento; a los profesores Elías Montoya y Jorge Zamora, por brindarnos sus asesorías y conocimientos. Finalmente, se agradece la colaboración de Andrés Nieto y Walter Agudelo en la fabricación, el ensamblaje y pruebas del CanSat.

Declaración de conflicto de interés: Los autores no manifiestan conflictos de interés institucionales ni personales.

Referencias

AESS, A. & E. S. S. (2020). *Innovación CanSat Colombia 2020*. <http://ieee.udistrital.edu.co/cansat/index.html>

- CanSat Competition. (2020). CanSat Competition Guide 2021. http://www.cansatcompetition.com/docs/CanSat_Mission_Guide_2021.pdf
- Carrero Urbina, J. (2017). El espacio, futuro de la Fuerza Aérea Colombiana. *Ciencia y Poder Aéreo*, 12(1), 202-208.
- Chaudhry, V., & Mishra, I. (2015). Zenith: A Nano-Satellite for Atmospheric Monitoring. *SAE Technical Papers, 2015-September* (September). <https://doi.org/10.4271/2015-01-2395>
- Constantini, A., Pérez, G., Busto, M., González, F., Cosentino, V., Romaniuk, R., & Taboada, Mi. (2018). *Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en la Producción Ganadera*. https://repositorio.inta.gob.ar/bitstream/handle/20.500.12123/4389/INTA_CIRN_InstitutodeSuelos_Costanteini_A_Emisiones_gases_efecto_invernadero_produccion_ganadera.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Colín, Á., Bermúdez Reyes, B., Encarnación Morrobel, G., Lira Ibarra, G., Rosales, Z., Ávalos De La Cruz, L., Villarreal Méndez, M., Mendoza Martínez, J., & Álvarez, B. (2016). Construcción de un picosatélite cansat. *Ciencia UANL*, 81, 34-38. <http://eprints.uanl.mx/11599/1/Documento6.pdf>
- Cornare. (2016). *Actividad económica actual en el Oriente Antioqueño y perspectivas de crecimiento verde y desarrollo compatible con el clima*.
- e-Gizmo. (2017). *LORA Module RA-02*. https://www.e-gizmo.net/oc/kits_documents/LORA_Module_RA-02_V.1/LORA_rev2.pdf
- ESA, E. S. A. (n.d.). *ESA - Design your parachute - A Guide to Landing Your CanSat Safely | Teach with Space T10*. https://www.esa.int/Education/CanSat/Design_your_parachute_A_Guide_to_Landing_Your_CanSat_Safely_Teach_with_Space_T10
- Faroukh, Y. M., Mohamed Abdelkarim AL-Ali, A. A., Adwan, A. O., Alhammadi, A., Shaikh, M. M., Faroukh, A. M., & Femini, I. (2019). Environmental Monitoring using CanSat. *2019 6th International Conference on Space Science and Communication (IconSpace)*. <https://doi.org/10.1109/IconSpace.2019.8905942>
- Fernández, A., & Medel, R. H. (2019). *Estudio bibliográfico del estado del arte del desarrollo y aplicaciones educativas de cansats* <https://www.researchgate.net/publication/332973924>
- Ferraz, M. C., Pereira, M. C., Greco, M., & Peiró, E. (2017). Design of a Generic Platform for an Educational CanSat. In *Proc. of the 1st IAA Latin American Symp. on Small Satellites*.
- Fretes, H., & Gómez, R. (2018). *Análisis e implementación de fotogrametría digital aplicada a imágenes aéreas | Fretes | Revista Científica de la Juventud*. <https://www.juventud.gov.py/ojs/index.php/snj1/article/view/17/16>
- Fuerza Aérea Colombiana. (2019). *Fuerza Aérea trabaja en sinergia con Universidades de Antioquia para Lanzamiento de Cohetes*. <https://www.fac.mil.co/fuerza-aerea-trabaja-en-sinergia-con-universidades-de-antioquia-para-lanzamiento-de-cohetes>
- Herrada, D. (2020). *L3gd20lib*. Available at https://github.com/dafruit/Adafruit_L3GD20_U. Herrada, D. *Lsm303lib*.
- Heyasa, B. L., & Galarpe R. K., V. R. (2017). *Initial Development and Testing of Microcontroller-MQ2 Gas Sensor for University Air Quality Monitoring*, 12(3), 47-53. <https://doi.org/10.9790/1676-1203024753>
- Hunt, E. R., Doraiswamy, P. C., McMurtrey, J. E., Daughtry, C. S. T., Perry, E. M., & Akhmedov, B. (2012). A visible band index for remote sensing leaf chlorophyll content at the Canopy scale. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 21(1), 103-112. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.07.020>
- INPE. (2020). *Cubedesign*. www.inpe.br/cubedesign/2020/es/
- Ladyada. (2020). *Bmp180lib*. <https://github.com/adafruit/Adafruit-BMP085-Library>
- Méndez, B. E. (2017). *Diseño y construcción de un microsatélite (CanSat)*. España.
- Mohd, R., Shariff, J., Kaushil, H., Likhita, S., Bhoopur Nikhil, & Mohan Sreejith. (2020). *Innovative Design, Analysis and Development Practices in Aerospace and Automotive Engineering (I-DAD 2018)*. Springer.
- Ogata V., Contieri D., Silva L., Piñeroa, J., (2019). *The CanSat project using Commercial-Off-The-Shelf components*. <https://www.researchgate.net/publication/340789283>
- Paulo Silva Neto, L., Victor, O. O., Danielle, C. P., Neto Lauro, S. P., & Jhonathan, P. M. (2019). *The CanSat project using Commercial-Off-The-Shelf components*. <https://www.researchgate.net/publication/340789283>
- Seed. (2015). *Grove-Gas Sensor (MQ2) User Manual*.

Fuerza Aérea Colombiana: motor propulsor hacia el espacio ultraterrestre del país hacia un triple desarrollo*

| Fecha de recibido: 9 de marzo del 2021 | Fecha de aprobación: 12 de abril del 2021 |

David Barrero Barrero

Master of Science in Interamerican Defense and Security

Escuela Superior de Guerra
Colombia

Grupo de investigación: Masa Crítica

Rol de investigador: teórico y escritura

<https://orcid.org/0000-0003-0412-1371>

✉ davidbarrerob@gmail.com

* Este artículo es parte del proyecto de investigación denominado "Proyección del empleo de las capacidades estratégicas aeroespaciales de Colombia para la seguridad y defensa nacional", a cargo del Departamento de Fuerza Aérea de la Escuela Superior de Guerra, inscrito en el grupo de investigación Masa Crítica.

Cómo citar este artículo: Barrero-Barrero, D. (2021). Fuerza Aérea Colombiana: motor propulsor hacia el espacio ultraterrestre del país hacia un tripe desarrollo. *Ciencia y Poder Aéreo*, 16(1), 87-101, <https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaereo.707>



Fuerza Aérea Colombiana: motor propulsor hacia el espacio ultraterrestre del país hacia un triple desarrollo

Colombian Air Force: Powering the Country Toward Outer Space within a Triple Development Approach

Força Aérea Colombiana: motor propulsor para o espaço exterior do país em direção a um triplo desenvolvimento

Resumen: El presente artículo tiene como objetivo reflexionar sobre el enfoque cualitativo a partir del análisis documental, con el fin de demostrar la oportunidad que tiene un país como Colombia, al participar con su Fuerza Aérea en una estructura estatal llamada Comisión Colombiana del Espacio (cCE), y que ha buscado por años alcanzar y consolidar el espacio ultraterrestre para los nacionales. Esa oportunidad se denominó triple desarrollo, debido a los beneficios que tiene actualmente incluir otro escenario como el espacial para aumentar las posibilidades de desarrollo humano. A partir de un análisis documental cualitativo, la pregunta por responder es ¿existen beneficios para Colombia con el uso del espacio ultraterrestre? En ese sentido, los hallazgos del triple desarrollo encontrados fueron: en primer lugar, el factor sostenible, pues organizaciones como Naciones Unidas (UN, por sus siglas en inglés) promueven las posibilidades de reducir las brechas de desigualdad y pobreza con el uso del espacio como fuente de logro; en segundo lugar, la oportunidad económica y social, ya que el espacio genera fuentes de ingreso y eliminación de gastos para Colombia al pagar a otros países el suministro de servicios espaciales; y la tercera oportunidad es el desarrollo tecnológico y la industria. Si Colombia logra consolidar capacidades en estos sentidos, el salto cualitativo hacia la solución de la problemática nacional permitirá hacer un cambio en la historia del país, una nueva hoja de ruta donde el desarrollo y la supervivencia puedan ser moldeables. Lo anterior es parte de la principal conclusión a la cual se espera llegar.

Palabras clave: desarrollo sostenible; economía; economía de la ciencia; espacio; fuerza aérea colombiana; tecnología.

Abstract: This work reflects on the participation of Colombia —through the Colombian Air Force— in the Colombian Space Commission (csc) and its importance for the country, considering the efforts made during several years for reaching outer space and consolidating aerospace initiatives. This opportunity has been named "triple development" due to the benefits of including a third scenario, such as space, in the search for new possibilities for human development. Based on a qualitative documentary analysis, the question to be answered is: Does the use of outer space bring any benefits for Colombia? From this, the benefits extracted from the triple development model were: (i) the sustainable factor, since organizations such as the United Nations (UN) promote the possibilities of reducing inequality and poverty gaps through the use of space as a source of development; (ii), economic and social opportunities, considering that space projects generate sources of income and the elimination of expenses for Colombia by paying other countries for the provision of space services; (iii) various technological and industrial development opportunities for the country. If Colombia manages to consolidate capacities in these dimensions, the qualitative leap toward solving certain national problems will allow a change in the country's history, a new roadmap where development and survival can be molded. The above is part of the main conclusion expected to be reached through this study.

Keywords: Sustainable development; economy; economics of science; space; Colombian Air Force; technology.

Resumo: O presente artigo tem como objetivo refletir sobre a abordagem qualitativa a partir da análise documental, a fim de demonstrar a oportunidade que tem um país como a Colômbia, ao participar com sua Força Aérea em uma estrutura estatal chamada Comissão Colombiana do Espaço (cCE), e que procurou por anos alcançar e consolidar o espaço ultraterrestre para os nacionais. Essa oportunidade se denominou triplo desenvolvimento, devido aos benefícios que tem atualmente incluir outro cenário como o espacial para aumentar as possibilidades de desenvolvimento humano. A partir de uma análise documental qualitativa, a pergunta a ser respondida é, existem benefícios para a Colômbia com o uso do espaço exterior? Nesse sentido, os achados do triplo desenvolvimento foram: em primeiro lugar, o fator sustentável, pois organizações como as Nações Unidas (NU por sua sigla em inglês) promover as possibilidades de reduzir as brechas das desigualdades e a pobreza através da utilização do espaço como fonte de realização; em segundo lugar, a oportunidade econômica e social, já que o espaço gera fontes de receita e eliminação de despesas para a Colômbia ao pagar a outros países o fornecimento de serviços espaciais; e a terceira oportunidade é o desenvolvimento tecnológico e a indústria. Se a Colômbia conseguir consolidar capacidades neste sentido, o salto qualitativo para a solução da problemática nacional permitirá fazer uma mudança na história do país, um novo guia onde o desenvolvimento e a sobrevivência possam ser moldáveis. Isto faz parte da principal conclusão a que se espera chegar.

Palavras-chave: desenvolvimento sustentável; economia; economia da ciência; espaço; força aérea colombiana; tecnologia.

*Creo y espero sinceramente que, además de aprovechar los beneficios económicos de democratizar el acceso al espacio para muchos más que los pocos privilegiados que lo hemos explorado hasta ahora, aumentarán en la humanidad, en medida todavía más notable, la buena voluntad y la hermandad que resultan de esa experiencia.*¹

Michael López-Alegría²

Colombia ha buscado durante décadas alcanzar el espacio ultraterrestre, conforme a los lineamientos y condiciones de igualdad y soberanía que las Naciones Unidas (UN, por sus siglas en inglés) promueve para todos los Estados miembros del organismo. Actualmente, la Comisión Colombiana del Espacio (CCE) se encuentra en un momento fundamental para generar un cambio y lanzar a Colombia al espacio ultraterrestre, en pro de concretar una hoja de ruta mejor estructurada, bien concebida y respaldada por el Gobierno nacional. La Fuerza Aérea Colombiana (FAC), como miembro de la CCE, contempla en su misión constitucional, además del aire, el espacio como escenario de dominio, en donde ya tiene en órbita un satélite desde el 2018 y avanza en el lanzamiento del segundo.

A pesar de que lo anterior lo materializó de manera autónoma y gracias al valioso recurso humano, su nueva experiencia fortalecerá su doctrina y sus capacidades, las cuales podrán estar a disposición del país, incluyendo seguridad y defensa. Por lo anterior, y mirando más allá, la nueva misión espacial de la FAC será un cohete propulsor que es esencial para que todo el país alcance el espacio, y en el que, en un principio, existe una triple oportunidad de desarrollo para Colombia, como se plantea en este artículo.

¹ Traducido de: "It is my belief sincere hope that, in addition to reaping the economic benefits of democratizing access to space to so many more than just the privileged few of us that have gone there thus far, there will be an even more important increase in the goodwill of the brotherhood of man that is a result of the very experience".

² Astronauta estadounidense de las misiones espaciales Discovery STS-92, Endeavour STS-113 y Soyuz TMA-9/ISS XIV (UNOOSA, 2020).

Acceder al espacio ultraterrestre en el momento contemporáneo que vive la humanidad tiene efectos favorables en todos los sentidos. En el caso específico colombiano, este artículo busca demostrar que el Estado tiene en frente una triple oportunidad de desarrollo que se ha privado de alcanzar, por una multiplicidad de hechos históricos muy poco justificables, y que en esta nueva hoja de ruta la FAC, con los avances que ha realizado en materia espacial, será clave para lograr este objetivo estratégico nacional.

La prioridad para un país en desarrollo como Colombia es reducir las brechas nacionales en términos de tecnología y capacidad industrial, por lo que es necesario hacer alianzas con países estratégicos teniendo en cuenta esas intenciones y procurando el desarrollo, para consolidar y alcanzar una gran variedad de objetivos necesarios para que crezcan la economía y el desarrollo humano, a través del nuevo recurso espacial. Además, sobre la base de los avances tecnológicos a los que se puede acceder, son múltiples los beneficios que trae para el país incorporar el espacio para el logro de los fines esenciales y de los objetivos estratégicos nacionales.

Con el fin de abordar este tema, se proponen tres argumentos en los que se evidencia cómo la FAC debe ser el motor de impulso para la consolidación del espacio ultraterrestre, con el propósito de alcanzar un triple desarrollo. En el primero se aborda la importancia del espacio ultraterrestre para lograr los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) planteados por las UN, para el beneficio común del planeta. En el segundo se analiza el desarrollo social y económico a partir de las capacidades que tiene trazada la CCE, en la que estos dos aspectos y logros alcanzados hasta el momento por parte de la FAC desempeñan un papel estratégico. En el tercero se examinan las posibilidades de desarrollo tecnológico e industrial que traen como consecuencia cumplir la aspiración colombiana de cara al espacio, en la que se conjugan las nuevas operaciones espaciales de la FAC. Al final, se presentan unas conclusiones alineadas con los argumentos del triple desarrollo que el espacio puede brindarle al país.

El espacio y el desarrollo sostenible para todos en el planeta

En el presente apartado se analiza la relación entre el espacio ultraterrestre y el desarrollo sostenible. Ambos se entienden sobre la base de la importancia y la trascendencia que tiene el empleo del escenario espacial con fines pacíficos (Naciones Unidas, 2019, p. 6), en el beneficio común de los seres humanos, como es el caso de los ODS; el fin de estos objetivos es que se logre la igualdad y la equidad para todos los seres humanos, además de buscar el entendimiento de todos para la conservación de la especie humana.

Relación entre espacio ultraterrestre y desarrollo sostenible

La correspondencia entre estos dos aspectos ha sido un tema de primer orden a lo largo de los años, cuya agenda global la maneja la Comisión sobre la Utilización del Espacio con Fines Pacíficos (UNOOSA por sus siglas en inglés). El eje fundamental para UNOOSA es el de la cooperación internacional en el uso e interés de los Estados por el empleo del espacio respecto a sus propias necesidades, y a partir de la definición anterior, estos fijan sus oportunidades de desarrollo económico, social, científico o tecnológico (Naciones Unidas, 2002, p. 61).

Por otra parte, y en relación con el desarrollo sostenible, entre el 10 y el 17 de junio de 2015, UNOOSA, en su 58.º periodo de sesiones, consideró importante la inclusión del espacio exterior en la nueva agenda en esta materia, además de discutir la sustentabilidad que este asunto debería tener a largo plazo (Naciones Unidas, 2015a). En la mencionada reunión se determinó lo siguiente:

La sostenibilidad a largo plazo debía entenderse como requisito necesario para realizar actividades espaciales, a fin de prevenir toda actividad que pudiera afectar, perjudicar, dañar o destruir los objetos espaciales colocados en órbita o que se dirigieran hacia

una órbita; debía impedirse que el espacio se convirtiera en una zona de conflictos entre países o con organizaciones privadas o públicas; debía reconocerse claramente que la colocación de armas en el espacio ultraterrestre, así como todo acto de hostilidad en ese medio, serían incompatibles con la utilización sostenible del espacio ultraterrestre; al adoptarse medidas de mitigación y eliminación de los desechos espaciales se debían tener en cuenta las responsabilidades históricas de los países que realizan actividades espaciales, y en ningún caso debía obligarse a los países con capacidad espacial incipiente a soportar la carga de la eliminación de desechos espaciales ni a contribuir a sufragar los gastos relacionados con las tareas de eliminación (Naciones Unidas, 2015b, p. 30).

De igual forma, en su 62.º periodo de sesiones, celebrado entre el 12 y el 21 de junio del 2019, UNOOSA hizo “reconocimiento del importante papel de la ciencia y la tecnología espaciales y sus aplicaciones para la implementación de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, en particular los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)” (Naciones Unidas, 2019, p. 37).

Ahora, el nuevo planteamiento de fortalecer los ODS se soporta en la utilización de las tecnologías espaciales, lo que ya es posible mediante el uso de herramientas que contribuyen notoriamente a la detección de áreas propicias para la pesca, la ganadería y la agricultura, al igual que al monitoreo del deshielo glaciar o el de las fuentes de agua dulce en riesgo de contaminación o desaparición, entre muchas otras. Esto permitirá anticipar y tomar las medidas necesarias frente a las adversidades climáticas y los desastres naturales (United Nations Office for Outer Space Affairs).

Los ODS desde el espacio y el plan del gobierno colombiano

En la tabla 1 se resumen las capacidades espaciales aplicadas a cada uno de los ODS según UN, de acuerdo con la Resolución 70/1 “Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible” (2015c). Lo anterior se fundamenta en las capacidades

y operaciones espaciales como la Teleobservación de la Tierra (EO, por sus siglas en inglés) y la Geolocalización mediante el uso del Sistema Global de Navegación Satelital (GNSS, por sus siglas en inglés); dos de las

estrategias fundamentales que apoyan el cumplimiento de los 17 ODS y sus 169 metas. Se espera dar cobertura a todos los países que conforman las UN (United Nations Office for Outer Space Affairs, s.f.-a).

Tabla 1
Uso del espacio ultraterrestre en apoyo a la Agenda 2030

ODS		Capacidades espaciales aplicadas a los ODS según UNODC ³
1	Fin de la pobreza	<ul style="list-style-type: none"> - Anticipar los desastres naturales y coordinar la provisión de ayuda posterior. - Óptimo empleo del uso sostenible de los recursos naturales. - Facilitar el soporte eficiente a las poblaciones vulnerables. - Mapeo de áreas pobladas y su acceso a servicios básicos.
2	Hambre cero	<ul style="list-style-type: none"> - Mejoras en optimización productiva de cultivos a través de un proceso de gestión informado y una mayor eficiencia con los recursos existentes, incluida la tierra, semillas, fertilizantes, agentes fitosanitarios y agua. - Mejoras en la gestión del ganado mediante un mejor seguimiento y la identificación de pastos adecuados.
3	Buena salud y bienestar	<ul style="list-style-type: none"> - Estudiar la epidemiología de las enfermedades, al permitir un mayor uso del análisis espacial para identificar los factores ecológicos, ambientales y de otro tipo que contribuyen a la propagación de enfermedades transmitidas por vectores. Monitorear los patrones de enfermedades y definir áreas que requieren planificación de control de enfermedades. - Abordar problemas relacionados con la asistencia para la visión, la cognición y la discapacidad. - Monitorear los factores que afectan la salud, así como el bienestar de los seres humanos, como la calidad del aire y el tráfico. - Promocionar la salud y, de igual forma, prevenir enfermedades mediante el uso de dispositivos de monitoreo portátiles. - Habilitación de la atención médica remota.
4	Educación de calidad	<ul style="list-style-type: none"> - Conectividad a internet de alta velocidad y contenido educativo en línea personalizado y entregado por satélite. - Monitoreo electrónico de asistencia y provisión de incentivos para que los padres reduzcan las tasas de deserción. - Oportunidades de aprendizaje a distancia, aprendizaje electrónico y aprendizaje permanente para comunidades remotas y aisladas.
5	Igualdad de género	<ul style="list-style-type: none"> - Acceso a una educación de calidad incluso en comunidades remotas y aisladas. - Apoyo al emprendimiento femenino, a través del acceso a capacitación, infraestructura blanda, información y seguridad en el ambiente laboral. - Oportunidades de desarrollo profesional, a menudo dentro de STEM⁴.
6	Agua potable y saneamiento	<ul style="list-style-type: none"> - Monitoreo de la calidad del agua. - Pronóstico meteorológico. - Acceso a soporte de infraestructura y conocimientos técnicos.
7	Energía limpia y asequible	<ul style="list-style-type: none"> - Monitoreo de infraestructura crítica, particularmente en las redes de energía. - Sincronización de la red eléctrica. - Levantamiento sísmico. - Identificación de sitios óptimos para la producción de energía renovable. - Previsión para producir energía solar y eólica para estimar la cantidad de energía necesaria de otras fuentes.
8	Trabajo decente y crecimiento económico	<ul style="list-style-type: none"> - Las economías mundiales y el crecimiento del PIB, que contribuyen a una variedad de sectores, en particular la prestación de servicios públicos, la banca y las finanzas, la agricultura y las comunicaciones. - Monitoreo de trabajadores solitarios, estableciendo entornos de trabajo seguros y protegidos.
9	Industria, innovación e infraestructura	<ul style="list-style-type: none"> - Mapeo y monitoreo de la infraestructura, incluido el mantenimiento de la infraestructura vial en entornos rurales, donde la tecnología más confiable es la basada en satélites. - Topografía de la construcción mediante la automatización de máquinas. - Movilidad inteligente, por ejemplo, menor consumo de combustible mediante una planificación y un seguimiento más inteligente del comportamiento de conducción.

³ Oficina de Naciones Unidas contra la Droga y el Delito.

⁴ Sigla para citar las disciplinas: "Science, Technology, Engineering and Mathematics" (ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas).

10	Reducir las desigualdades	<ul style="list-style-type: none"> - Conectividad en áreas remotas y aisladas. - Participación remota en procesos democráticos. - Acceso confiable a la información.
11	Ciudades y comunidades sostenibles	<ul style="list-style-type: none"> - Planificación urbana para identificar estructuras y puntos de referencia con fines catastrales y urbanísticos. - <i>Smart cities</i>, mediante la aplicación de sistemas globales de navegación por satélite, observación de la tierra y telecomunicaciones por satélite. - Mejorar los servicios de la ciudad, como los sistemas inteligentes de gestión de residuos. - Monitoreo de la calidad del aire. - Gestión de desastres. - Monitoreo de infraestructura. - Operaciones de búsqueda y salvamento.
12	Producción y consumo responsables	<ul style="list-style-type: none"> - Manejo de recursos naturales. - Trazabilidad de alimentos y mercancías peligrosas. - Monitoreo del tráfico de especies en peligro y productos de la esclavitud humana. - Agricultura inteligente mediante la combinación de observación terrestre, telecomunicaciones por satélite y sistemas de navegación global satelital. - Los productos derivados de la utilización de recursos in situ (ISRU), como las tecnologías de impresión 3D para crear estructuras en órbita podrían tener aplicaciones en la Tierra.
13	Acción climática	<ul style="list-style-type: none"> - Monitoreo del cambio climático. - Predicción del tiempo. - Gestión de desastres. - Operaciones de búsqueda y salvamento.
14	Vida submarina	<ul style="list-style-type: none"> - Mapeo y monitoreo de áreas naturales y protegidas. - Seguimiento y navegación de buques pesqueros. - Seguimiento de la pesca ilegal no reglamentada y no declarada. - Trazabilidad de productos pesqueros —especies en peligro de extinción, explotación de recursos pesqueros—. - Evaluación y seguimiento de los recursos marinos y costeros. - Monitoreo del cambio climático, particularmente la temperatura del agua. - Identificación de floraciones de algas.
15	Vida en la Tierra	<ul style="list-style-type: none"> - Monitoreo biogeofísico de la superficie terrestre. - Monitoreo de la biodiversidad terrestre. - Seguimiento de la caza furtiva e identificación de rutas de contrabando.
16	Paz, justicia e instituciones sólidas	<ul style="list-style-type: none"> - Monitoreo de conflictos. - Permitir la participación de comunidades remotas y aisladas en procesos democráticos. - Cumplimiento de la legislación. - Acceso a información confiable.
17	Alianzas para los Objetivos	<ul style="list-style-type: none"> - Iniciativas de cooperación internacional. - Intercambio de datos e información. - Bases de datos de código abierto. - Intercambio de infraestructura e intercambio de conocimientos técnicos.

Fuente: elaboración propia a partir de la Resolución de las Naciones Unidas 70/1 “Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible” (2015).

Esta nueva hoja de ruta que integra espacio y desarrollo se centra en la solidaridad y compromiso de las naciones para dar cumplimiento no solo a la agenda, sino a la inclusión de las capacidades espaciales de los países que han desarrollado estas últimas, al servicio y beneficio de los países que trabajan por alcanzar algún desarrollo espacial, y en general, para el beneficio de la humanidad. Por lo tanto, uno de los aspectos importantes para el logro de los ODS son las tecnologías espaciales inclusivas, las cuales deberán, entre otras, “contribuir a prevenir que las personas caigan por

debajo del umbral de la pobreza y ayudar a orientar el apoyo específico a quienes lo necesitan” (United Nations Office for Outer Space Affairs, s. f. -b).

Tras el análisis del horizonte trazado por UN, al incluir el uso de las capacidades espaciales en el cumplimiento de la Agenda 2030, y teniendo en cuenta que resulta viable e incluyente para todos los países del mundo, en Colombia se decidió integrar a los ops en el actual plan de Gobierno. En el denominado “Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022. Pacto por Colombia, pacto por la equidad” (Congreso de Colombia, 2018),

se encuentran las estrategias y programas que impulsan la transformación digital y tecnológica, así como la implementación de “una política nacional para desarrollar el sector espacial” (Congreso de Colombia, 2018, p. 727), la cual incluye como oportunidad el acceso y uso de las tecnologías espaciales y satelitales. Además, se planteó el combate contra las amenazas transnacionales, en cooperación con otros países, en diferentes escenarios que incluyen el espacial (Congreso de Colombia, 2018, p. 73).

Lo anterior implica llevar a Colombia a ubicarse en todos los escenarios: terrestre, marítimo, aéreo, ciberespacial y espacial; en el caso de este último, se busca incluir al país en esas oportunidades que le permitan generar un triple desarrollo. La CCE trabaja en este tema con el fin de delinear un mejor y próspero escenario para Colombia. Es así como, dentro de su estructura organizacional, la FAC se ha constituido como uno de los motores para el logro de las aspiraciones por alcanzar el objetivo espacial, acudiendo a sus adelantos en esta materia, dándole una base firme a la CCE para que cumplan con sus objetivos.

La necesidad de una economía espacial para Colombia

La globalización abrió las puertas de una nueva economía mundial, con lo que logró la integración de las economías nacionales, así como la apertura de mercados, la interdependencia económica, la reducción de barreras comerciales y la rapidez de las negociaciones, hechos que permiten dar solución a muchas necesidades locales en materia económica. En este sentido, la inclusión de una economía espacial es contundente y necesaria en el logro de objetivos nacionales con miras al cumplimiento de los ODS.

De hecho, el crecimiento económico moderno durante los últimos doscientos cincuenta años se ha modelado y modificado debido a la multiplicidad e importancia de factores que intervienen en la economía global, a causa de la evolución y desarrollo de la tecnología (Sachs, 2015, p. 158-159). Por ello, al hablar de un triple desarrollo, no se aísla a cada uno de los desarrollos planteados. En este caso, la tecnología requiere de

la economía para el desarrollo, pero la economía necesita a la tecnología para obtener mayores ganancias en menor tiempo y esfuerzo.

Respecto al uso del espacio con fines económicos, en el libro *Mirando hacia las estrellas: una constante necesidad humana*, se afirma lo siguiente:

Las actividades espaciales comerciales más rentables son aquellas que proporcionan comunicaciones rápidas en todo el mundo. Ya sea que se trate de servicios de navegación y temporización de los satélites GPS, transmisiones directas de TV, enlaces de terminales de muy pequeña apertura de las compañías de tarjetas de crédito, o comercio financiero electrónico, el sistema económico global ahora está vinculado a través de satélites y capacidades espaciales. (Álvarez, Jaimes & Paredes, 2019, p. 335)

Para entender mejor este tema en cifras, según el “Yearbook on Space Policy 2017” (Burger, 2017), en el 2017, ya había 50 países con al menos una organización dedicada a las actividades espaciales, de los cuales nueve estados tenían un presupuesto superior a un billón de dólares (p. 54); de hecho, la actividad espacial global en el mismo año fue de 383,51 mil millones USD siendo el 80,1 % correspondiente a los ingresos totales del sector espacial comercial (307, 32 mil millones USD), incluidos los sectores público y privado, lo cual revela las oportunidades económicas que deja la actividad espacial en términos de economía (Burger, 2017, p. 54). Estos datos evidencian el hecho de que “el Gobierno tiene un papel absolutamente crucial en el desarrollo económico de un país” (Sachs, 2015, p. 196) y, en consecuencia, debe buscar las alternativas que permitan lograrlo. El espacio ultraterrestre es quizá la mejor opción a futuro.

Adicionalmente, en 2018 la infraestructura comercial y la industrial generaron 95,87 mil millones USD gracias a actividades como la fabricación de satélites comerciales, la provisión de servicios de lanzamiento y la provisión de seguros de activos espaciales para el lanzamiento de satélites, además de las empresas de explotación de satélites (Burger, 2017, p. 54). En ese

sentido, hay un crecimiento sincronizado en todas las principales economías desarrolladas (p. 3).

Ahora bien, una vez analizado el plan del Gobierno colombiano para integrar el uso del espacio ultraterrestre y la Agenda Global para el 2030, también es importante hacer una revisión de la estrategia nacional. El punto de partida son los documentos elaborados por el Consejo Nacional de Política Económica y Social (CONPES), pues a partir de estos se establece la hoja de ruta hacia un próspero desarrollo en Colombia, tanto en lo económico como en lo social, a través de la explotación de las capacidades y beneficios que puede brindar el espacio.

De acuerdo con la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OECD, por sus siglas en inglés) (citado en Álvarez *et al.*, 2019), la economía espacial es:

La gama completa de actividades y el uso de recursos que crean y proporcionan valor y beneficios a los seres humanos en el curso de la exploración, comprensión, gestión y utilización del espacio. Por tanto, incluye a todos los actores públicos y privados involucrados en el desarrollo, la provisión y el uso de productos y servicios relacionados con el espacio, que van desde la investigación y el desarrollo, la fabricación y el uso de infraestructura espacial (estaciones terrestres, vehículos de lanzamiento y satélites), hasta aplicaciones habilitadas para el espacio (equipos de navegación, teléfonos satelitales, servicios meteorológicos, etc.), y la ciencia conocimiento generada por tales actividades. De ello se deduce que la economía espacial va mucho más allá del sector espacial en sí mismo, ya que también comprende los impactos cada vez más penetrantes y continuamente cambiantes tanto cuantitativos como cualitativos de los productos, servicios y conocimientos derivados del espacio sobre la economía y la sociedad (p. 339).

En este sentido, los adelantos ya desarrollados por la FAC, específicamente la puesta en órbita del FACSAT-1 —su primer satélite espacial instalado el 28 de noviembre del 2018—, no constituyen simples hechos aislados y desapercibidos para la sociedad

colombiana (Fuerza Área Colombiana, 2019). El hecho de que el país haya logrado colocar un satélite en órbita, por medio de uno de sus organismos que conforma la CCE, es un paso firme que requiere la participación de la Nación alrededor del éxito y de sus beneficios.

Si se analiza lo económico, la información que en el futuro suministre la FAC a la CCE, la academia y demás órganos que la requieran, será el primer inicio de reducción en gastos por efecto de pago de servicios espaciales y, a su vez, el inicio de actividades espaciales con beneficio económico para Colombia.

Así mismo, el FACSAT-1 se unió al primer pico satélite colombiano en el espacio ultraterrestre, denominado LIBERTAD-1 de la Universidad Sergio Arboleda, puesto en órbita el 17 de abril del 2007 (Joya, s.f.). Estos dos registros demuestran la capacidad de las instituciones y la iniciativa de su gente, lo cual debe ser apoyado para lograr los resultados ya mencionados. Según la “Estrategia para el desarrollo aéreo y espacial de la Fuerza Aérea Colombiana 2042” (2020), la FAC tiene previsto para el 2022 la adquisición de su segundo satélite FACSAT-2, este hecho fue analizado, en términos de lo tecnológico y lo económico, por el doctor Raúl Andrés Joya Olarte, director del Observatorio Astronómico de la Universidad Sergio Arboleda, quien afirmó:

Esta segunda experiencia tiene que ir ya más apalancada y deberá fundamentarse en los servicios que prestaría un satélite de observación de la Tierra. En este orden de ideas, recoger las necesidades que no solamente tenga la Fuerza, porque seguramente las prestaciones que se requerirían para servicios de inteligencia, seguridad y defensa son bastante altas y los recursos desconozco si estarán a esa altura.

[...] el nuevo satélite debe tener las prestaciones [...] a nivel académico y a nivel de algunas instituciones del Estado, que serían como: el Servicio Meteorológico (IDEAM), el Instituto Geográfico Agustín Codazzi que complementarían tareas muy importantes como la del catastro multipropósito, la agricultura de precisión, la minería ilegal o la prevención de desastres naturales (R. Joya, entrevista virtual, 30 de junio del 2020).

Es importante aclarar que la estrategia FACSAT es mucho más que contar la historia de un lanzamiento y el trabajo que se adelanta para un segundo. Por el contrario, el objetivo de la FAC es consolidar seis de estos nanosatélites en órbita. Todos ellos a "disposición de la nación" (Urbina Carrero, 2020. p. 207), lo que debe motivar más aún a un país lleno de necesidades, buscar en su interior, el motor de lanzamiento al triple desarrollo espacial que formula el presente documento.

En suma, es importante y necesario fortalecer el proceso y el modelo adoptado por el cual Colombia, a través de la Universidad Sergio Arboleda y la FAC, ha alcanzado el espacio. De hecho, en el actual CONPES 3.983 se evidencian obligaciones para cada miembro de la CCE, por ejemplo, las "Líneas de Acción" trazadas para la FAC, que incluyen un trabajo orientado hacia el desarrollo económico, social y tecnológico nacional; en esa medida, van más allá de los compromisos propios de seguridad y defensa, sin desconocer su misión de contribuir a los fines del Estado (Fuerza Aérea Colombiana, s.f.).

Estrategia nacional en materia espacial

De acuerdo con lo que ha establecido el Gobierno nacional, el objetivo de la política espacial colombiana es "generar las condiciones habilitantes y el entorno institucional adecuado para que, con una visión de largo plazo", se active el ecosistema espacial contribuyendo a la productividad y competitividad de Colombia (C. Corredor, comunicación personal, 30 de junio del 2020; Comisión Colombiana del Espacio, 2020). En este sentido, en el CONPES se crearon las "líneas estratégicas para el desarrollo del sector [...] estableciendo una agenda de cooperación internacional, así como la adaptación del marco normativo del país" (2020, p. 4).

Después de varias décadas sin mayores avances al respecto, el 13 de enero de 2020 el Gobierno nacional aprobó el CONPES 3.983, denominado "Política de Desarrollo Espacial: condiciones habilitantes para el impulso de la competitividad nacional" (2020). En dicho documento fueron consideradas "las condiciones [...] para que las tecnologías espaciales sean un impulsor de la productividad, la diversificación y la

sofisticación de la economía colombiana" (p. 3). Para lograrlo, la CCE consideró que la "iniciativa pública tiene como fin último promover el crecimiento económico y el desarrollo social del país" (p. 3). Precisamente el objetivo de la política es:

Plantear una política pública desde la cual se generen las condiciones habilitantes para que el país pueda explotar el sector espacial para mejorar la productividad, la diversificación y la sofisticación del aparato productivo colombiano, en línea con el Documento CONPES 3.866 Política Nacional de Desarrollo Productivo (CONPES 3.983, 2020, p. 3).

¿Qué esperar entonces de esta política de gobierno? La Vicepresidencia de la República, a cargo de Marta Lucía Ramírez, es la responsable de los asuntos espaciales para Colombia, así como de la reactivación de la CCE. Durante su intervención en la Semana Mundial del Espacio 2020 (wsw), la vicepresidenta afirmó que el Gobierno nacional y la CCE se dieron:

A la tarea de diseñar una política pública para el sector espacial, que contribuya al crecimiento sostenible del país en dos vías: impulsando el desarrollo de industrias nacionales para la generación de una economía intensiva en conocimiento, la creación de empleo calificado, y la diversificación del aparato productivo del país; y promoviendo el cierre de brechas socioeconómicas, con una mayor cobertura de servicios públicos estratégicos (Vicepresidencia Colombia, 2020).

El modelo espacial norteamericano

Una vez visto el horizonte que está trazando Colombia con miras al espacio, y para adecuar una estrategia espacial que contribuya a este propósito, la FAC ha revisado algunos modelos regionales y experiencias de países amigos para ajustar su propio plan; el ejemplo norteamericano es un interesante referente. La misión de la recientemente creada Fuerza Aérea Espacial de los Estados Unidos (AFSPC, por sus siglas en inglés) es la de "proporcionar capacidades espaciales

resistentes, defendibles y asequibles para la Fuerza Aérea, la Fuerza Conjunta y la Nación”⁵.

La transición del aire al espacio ha sido un tema sencillo y creativo para la Fuerza Aérea de los Estados Unidos (USAF, por sus siglas en inglés). Corresponde a la decimocuarta fuerza aérea americana la tarea de “proporcionar capacidades espaciales para la lucha conjunta a través de las misiones operativas de elevación espacial; posición, navegación y cronometraje; comunicaciones por satélite; alerta de misiles y control espacial”⁶ (Air Space Force Command, 2020).

En el documento “America’s Air Force: A Call to the Future” (United States Air Force, 2014), la USAF determinó que para los próximos años, “el espacio continuará como un dominio⁷ vital para la economía global, ya que proporciona comunicaciones críticas; datos de posición, navegación y sincronización; e imágenes que han abierto la puerta a avances notables”⁸ (United States Air Force, 2014, p. 7), precisamente donde las nuevas tecnologías deberán lograr las oportunidades que alterarán favorablemente la economía (United States Air Force, 2014, p. 7).

A pesar de lo anterior, el dominio del aire sigue siendo indispensable para las actividades de defensa y seguridad, así como para el aporte a la economía mundial. Además, está claro que el ciberespacio ha venido creciendo y lo seguirá haciendo como un dominio crítico en el cual fluye un considerado volumen de información en velocidades cada vez mayores. Respecto al dominio espacial, con mayor razón, este será vital para la economía global (United States Air Force, 2014, p. 7), gracias a su rápida capacidad de alterar la economía de las naciones.

Cabe agregar que para la participación en las operaciones espaciales norteamericanas la ASPFC ha generado un desarrollo integral y estructural al interior de la organización, además de la generación de nuevas capacidades. Un trabajo que se ha venido ejecutando desde el 1.º de septiembre de 1982 (Air Space Force Command, s.f.).

Ahora bien, algunas de las capacidades que contribuyen a las misiones y operaciones espaciales para el triple desarrollo son: el empleo de radares terrestres; el monitoreo del lanzamiento de misiles balísticos en todo el mundo, con el fin de proteger al territorio estadounidense de agresiones (Air Spcae Force Command, s.f.); las instalaciones para las bases de lanzamiento con los servicios necesarios; el control para la seguridad de las misiones en coordinación con el Departamento de Defensa y la Nasa; y la cobertura global para las misiones y enlaces de comunicaciones. Lo anterior permite integrar una infraestructura a la seguridad, monitoreo, soporte necesario para comando y control, seguridad en los lanzamientos e infraestructura para las misiones espaciales (Air Space Force Command, s. f.).

La revisión del modelo de la USAF en su camino hacia el espacio permite comparar y afirmar que Colombia, a través de su CCE y de la FAC, tiene el reto y la oportunidad de transformar la Fuerza Aérea desde un servicio centrado en la plataforma aérea, donde el espacio y el cibernético no tienen protagonismo, a una organización verdaderamente centrada en el conocimiento y con multidominio⁹ (Zacharias, 2019, p. XVIII). Este concepto de multidominio hace referencia a los escenarios terrestres, marítimos, aéreos, espaciales —analizados en el presente documento— y ciberespaciales. Este último es más complejo, debido a su composición de sistemas electrónicos y en red que utilizan energía electromagnética, y que pueden relacionarse

5 Traducido de: “Provide resilient, defendable and affordable space capabilities for the Air Force, Joint Force and the Nation”.

6 Traducido de: “provides space capabilities for the joint fight through the operational missions of spacelift; position, navigation and timing; satellite communications; missile warning and space control”.

7 En el sentido simple, dominio hace referencia, entre otros, al acceso a la información y a un bien público mundial (Tesauro de la Unesco, 2020).

8 Traducido de: “Space will continue as a vital domain for the global economy, as it provides critical communications; position, navigation, and timing data; and imagery that have opened the door to remarkable advancements”.

9 Adaptado del texto original: “We have a unique opportunity to transform the Air Force from an air platform – centric service, where space and cyber often take a back seat, to a truly multidomain and knowledge-centric organization. By delivering autonomous systems to the warfighter by way of a Knowledge”.

directamente con cada uno de los anteriores y explotar mayores capacidades (Parkinson, 2019).

Desarrollo tecnológico e industrial espacial

Las primeras imágenes del planeta fueron tomadas a 100 kilómetros de altitud en 1947, desde un cohete alemán V-2 confiscado por los americanos desde la Segunda Guerra Mundial y acondicionado para esta labor. Las mencionadas fotografías corresponden a la zona de Nuevo México, California, y, aunque fueron reveladas hasta 1984 (Rodríguez, 2020), son un hecho histórico, no solo por el desarrollo tecnológico, sino porque satisficieron la inmensa necesidad que, desde la época de Nicolás Copérnico, ha tenido la humanidad de estudiar en dónde vivimos y qué nos hace, hasta ahora, únicos; un planeta que nos proporciona todo para vivir, pero igualmente complejo, por lo que es necesario evaluarlo cada día y sacar el mejor beneficio para toda la naturaleza.

Quienes han logrado acceder al espacio ultraterrestre han alcanzado conocimiento y desarrollo en ciencia y tecnología, y posteriormente, han explotado estas capacidades y generado una economía productiva, a partir de la venta de servicios espaciales a otros países. Invertir en este proceso implica generar mayores conocimientos, lo que promueve el desarrollo y la integración de la tecnología y la industria espacial a sus activos sociales y económicos, incluyendo la educación del futuro.

En este contexto, la Innovación, el Desarrollo y la Iniciativa (I+D+I) son una combinación determinante para una Colombia que necesita oportunidades de triple desarrollo, con la inclusión del espacio a sus activos. Las oportunidades de tecnología e industria previstas en el CONPES 3.983 le permitirían a Colombia aspirar a una mejor calidad de vida para todos en el país, con el aumento de academia, trabajo, salud y productividad, no solo local, sino con proyección global.

De acuerdo con lo anterior, se puede afirmar que sin la tecnología es casi imposible lograr el desarrollo sostenible y los desarrollos económicos y sociales mencionados, ya que esta constituye el elemento gestor de la realidad espacial de largo plazo para el

país; un camino que han seguido algunas naciones del mundo y con el que han conseguido resultados de primer orden.

Tecnología en el espacio para el uso y beneficio común

El 13 de diciembre de 1958, las UN determinaron que el espacio sería de uso común para todos y que tendría fines pacíficos bajo el principio de “igualdad soberana [...] [estimulando] enérgicamente la más completa exploración y explotación del espacio ultraterrestre en beneficio de la humanidad” (p. 5). Desde entonces, le solicitó al primer grupo de 18 países presentar un informe que, entre otras actividades, debía mostrar “la esfera en que se podría emprender adecuadamente, bajo los auspicios de las Naciones Unidas, una cooperación y programas internacionales [...] cual fuere su grado de desarrollo económico o científico” (p. 6). Por ese motivo, UNOOSA ha buscado trabajar con el fin de ayudar a todos, pero “especialmente [a] los países en desarrollo, a acceder y valerse como beneficiarios de lo que el espacio puede proporcionar para alcanzar el desarrollo sostenible (United Nations Office for Outer Space Affairs, s. f. -a).

Es así como en materia de cooperación y desarrollo, la tecnología que se envía al espacio genera aportes fundamentales —algunos de valor estratégico—, puesto que esta tecnología contribuye a comprender problemas complejos como el calentamiento global y, a partir de allí, se les facilita a las sociedades la posibilidad de mitigar y anticipar consecuencias (Naciones Unidas, 2015a); quizás es esa la principal misión de nuestro futuro inmediato, a fin de determinar los cambios y los daños que el mismo ser humano le está ocasionando a la Tierra. Asimismo, se puede obtener información para prevenir riesgos, desastres naturales y de origen humano, rastreo al deshielo, preservación de especies animales en riesgo e incluso anticipación de enfermedades.

Estas tecnologías, de aplicación civil y militar o de uso dual, representan para los países exploradores del espacio una oferta amplia de conocimientos: recursos naturales, territorio, clima, soberanía,

medicina, prevención de desastres, desarrollo sostenible, desarrollo humano, seguimiento de actividades del terrorismo y crimen transnacional. A su vez, el desarrollo espacial hoy en día es una actividad en la que la inversión público-privada produce un beneficio mayormente amplio y próspero para los países. Por lo tanto, permite convertir al espacio en una *empresa global* en la que la participación mixta de estos capitales ayuda de manera rápida a un crecimiento favorable y seguro (Álvarez *et al.*, p. 331). Esta es la denominada *economía espacial* de la OCDE, definida anteriormente, cuyo fin se ha planteado a largo plazo e implica la formalización de una alianza entre el Estado y empresa privada (OCDE, 2014b; OCDE, 2016; Congreso de Colombia, 2018, p. 727).

De acuerdo con lo expresado por Clayton Chung en 2001 en su libro *Aerospace Power in the Twenty-First Century. A Basic Primer*, en donde trató de hacer énfasis en las ya relacionadas bondades de las tecnologías espaciales, el empleo de las siguientes capacidades:

Los programas de alerta temprana, meteorológicos y otros programas de apoyo [ha] demostrado el valor y la necesidad de incorporar capacidades basadas en el espacio para operaciones aéreas, así como para acciones terrestres y marítimas. Los avances tecnológicos en propulsión, materiales, electrónica, computadoras, comunicaciones y otros descubrimientos han ayudado a despertar el interés en los sistemas espaciales. La dependencia de la constelación de satélites del Sistema de Posicionamiento Global (GPS) para la navegación y la entrega de armas por parte de todos los servicios ha aumentado la necesidad de operar y mejorar continuamente el sistema. Sin embargo, una limitación del poder espacial es el proceso costoso y sensible al tiempo de enviar un sistema espacial a la órbita¹⁰ (Chung, 2001, p. 298).

¹⁰ Traducido de: “Early warning, weather, and other support programs have illustrated the value and necessity of incorporating space-based capabilities for aerial operations as well as ground and maritime actions. Technological advances in propulsion, materials, electronics, computers, communications, and other discoveries have helped ignite interest in space systems. Reliance upon the Global Positioning System (GPS) satellite constellation for navigation and weapons delivery by all services has increased the need to continually operate and improve the system. One

Por lo tanto, acceder a este nuevo poder espacial para un país como Colombia permitirá la evolución de su desarrollo tecnológico flexible, base de un triple desarrollo, a pesar de que persisten algunas preguntas sobre el uso de armas en el espacio y todo lo que rodea una eventual capacidad bélica por parte de países como Estados Unidos, Francia y China. Puede que ese momento esté cerca o por lo menos que sea probable, sin embargo, UNOOSA trabaja en reducir estos riesgos y en mantener al espacio libre de ser empleado contra el ser humano. Afortunadamente, el uso del espacio, por ahora, se ajusta a los propósitos de uso terrestre y beneficio común (Chung, 2001, p. 299).

A propósito de lo anterior, y retomando el Informe de la Comisión sobre UNOOSA, expedido en su 62.º periodo de sesiones, queda claro el uso común del espacio para la humanidad, del cual se excluye su empleo para temas diferentes al beneficio que representa. Al respecto, la Comisión:

Tomó nota de la contribución que hacían la tecnología espacial y sus aplicaciones, así como la información y los datos obtenidos desde el espacio, al desarrollo sostenible, en particular en cuanto a mejorar la formulación y la posterior aplicación de las políticas y los programas de acción relacionados con la protección del medio ambiente, la gestión de tierras y recursos hídricos, el desarrollo urbano y rural, los ecosistemas marinos y costeros, la atención de la salud, el cambio climático, la reducción de los riesgos de desastre y la respuesta de emergencia, la energía, la infraestructura, la navegación, la vigilancia sísmica, la gestión de los recursos naturales, las nieves y los glaciares, la biodiversidad, la agricultura y la seguridad alimentaria (Naciones Unidas, 2019, p. 37).

Tecnoestrategia colombiana

Las condiciones habilitantes mencionadas en el CONPES 3.983 (2020, p. 3) para el desarrollo productivo de la Nación parten de una base tecnológica espacial

limitation of space power, however, is the time-sensitive and costly process of sending a space system into orbit”.

como motor gestor del triple desarrollo tratado en este documento. Al referirse al tema de los lineamientos referentes para la observación de la Tierra a nivel nacional, los cuales deben ser viables e incluir la realización del diseño de un Programa Satelital para Colombia (2020), el Gobierno se alinea con lo planteado por UNOOSA anteriormente, y propone utilizar en Colombia:

Las tecnologías espaciales para la educación, la salud, la vigilancia ambiental, la exploración y gestión de recursos naturales, la atención de desastres, el monitoreo de los usos del suelo, las previsiones meteorológicas, el cambio climático, el transporte terrestre, la navegación marítima, fluvial y aérea y las telecomunicaciones, entre otras temáticas, orientadas al desarrollo económico, cultural y social sostenible (2020, p. 5).

En este sentido, el triple desarrollo incorpora también a la educación como materia prima para el fomento de temas espaciales, gracias a los avances tecnológicos. Para determinar y alcanzar el tamaño de fuerza de la CCE y especialmente el de la FAC, Raúl Joya (comunicación personal, 30 de junio del 2020) hizo referencia a la necesidad de incorporar personal administrativo y abogados especializados en el derecho operacional. Esto se sumaría a la integración de personas con diferentes especialidades y carreras profesionales afines a la ingeniería espacial, como la mecatrónica, la electrónica, las telecomunicaciones, el área eléctrica y la física, por citar tan solo unas pocas. Todas ellas se mantienen alrededor de la construcción de la tecnología base para lanzar a Colombia al espacio, no sin dejar de citar a aquellas que se relacionan con la difusión a través de los medios de comunicación, así como el convencimiento de las actividades que desarrolla la CCE al pueblo colombiano.

El concepto estratégico que tiene la FAC respecto al “acceso y uso de las tecnologías satelitales como una capacidad inherente y distintiva de la institución” (Quiroga, 2019, p. 24) brinda la garantía de forjar un futuro espacial, soportado en la tecnología y la industrialización espacial al interior colombiano.

Finalmente, las capacidades tecnológicas abren camino en todas las direcciones para el desarrollo. Colombia ha iniciado un camino muy interesante y, sobre todo, ha decidido cumplir la estrategia que permite adquirir la tecnología espacial necesaria para gestionar la transformación política, social y económica que fomente este nuevo camino de éxito hacia el espacio, lo que permite asegurar un mejor futuro para todos los colombianos.

Conclusiones

Desde el principio, este documento demostró de qué manera un país como Colombia puede alcanzar el espacio ultraterrestre y servirse de sus capacidades de desarrollo, con la participación activa de la FAC como miembro de la CCE, y como motor de propulsión que impulsa el logro de este objetivo tan necesario e importante para mejorar el desarrollo del país en tres aspectos llamados triple desarrollo: el sostenible, el económico y social y, finalmente, el tecnológico e industrial. Con el fin de argumentar esta idea, se desarrolló individualmente un apartado sobre cada uno de ellos para visibilizar oportunidades y capacidades en las que la FAC se constituye como el motor de propulsión del país.

Las UN ya han establecido un escenario global de inclusión, en el que el espacio ultraterrestre se pone al servicio de la humanidad y contribuye al cumplimiento de los ODS. Aun en el siglo XXI hay países rezagados que no tienen la oportunidad de este beneficio. Sin embargo, UNOOSA ha hecho posible este acceso al proponer que los países que han logrado llegar al espacio ayuden a los demás Estados a lograr este mismo objetivo; por consiguiente, la hoja de ruta trazada permitirá que poco a poco, la humanidad amplíe las expectativas de alcanzar la Agenda 2030.

En este sentido, y con la participación de un capital mixto que posibilite el alcance de una economía espacial, las posibilidades de un segundo desarrollo, de tipo económico y social, serán tangibles gracias al aporte de las capacidades de cada institución de la CCE, y dentro de ella, la FAC, una entidad que ha avanzado en estudios espaciales y en la puesta en órbita de

un satélite. En el futuro será la teleobservación una de las primeras capacidades por alcanzar, pues esta beneficiará desde el primer momento a todos los sectores públicos y privados, cuya inversión en conjunto genera la sinergia del éxito.

Cabe aclarar que el logro de las capacidades tecnológicas necesarias para llevar a Colombia al espacio ultraterrestre será el tercer desarrollo estratégico para la Nación. Las tecnologías espaciales abrirán las puertas del triple desarrollo colombiano a partir de su acceso a este escenario tan imprescindible para forjar el futuro que Colombia requiere y merece. Con su misión, la FAC aporta capacidades que van más allá de la defensa y la seguridad. Los fines esenciales del Estado se encuentran inscritos en su misión, y además determinan que el aire, el espacio y el ciberespacio son el teatro de operaciones en el que la FAC traza su dominio para Colombia.

En suma, el presente documento resalta la riqueza teórica y las capacidades de la FAC en su condición de miembro de la CCE, como cohete propulsor de Colombia hacia el espacio. Más allá de los beneficios en seguridad y defensa, su aporte es el compromiso con los fines esenciales del Estado en pro de un triple desarrollo.

El aporte teórico de este escrito resalta las cualidades y capacidades de la FAC, la cual ha hecho una gran transformación con miras hacia el futuro, donde ha ampliado su espectro de acción al espacio y el ciberespacio. Ante este suceso, es oportuno valerse de este nuevo horizonte y de la experiencia de tener en órbita un satélite propio, lo que se constituye en la base y columna vertebral para que, a través de la CCE, se consolide esa necesidad de triple desarrollo para el país.

Se recomienda que el Gobierno respalde el lanzamiento del próximo satélite de la FAC, en el que deben participar todos los miembros de la Comisión, y cuyo aporte será compatible con las aspiraciones de triple desarrollo para Colombia. Finalmente, en un escenario indefinible como el espacio no debe haber limitaciones para que Colombia logre esa aspiración espacial.

Declaración de conflicto de interés: El autor no manifiesta conflictos de interés institucionales ni personales.

Referencias

- Air Space Force Command. (s.f.). *Welcome to Air Force Space Command* [Bienvenido al comando espacial de la Fuerza Aérea]. Air Space Force Command. <https://www.afspc.af.mil/Home/AFSPC-Mission/>
- Álvarez, C., Corzo, M., Jaimes, G. & Paredes, R. (2019). La nueva economía del siglo XXI: el sector privado en el espacio. En C. Corredor & C. Álvarez (Eds.), *El espacio exterior: Una oportunidad infinita para Colombia*. Escuela Superior de Guerra “General Rafael Reyes Prieto” y Fuerza Aérea Colombiana.
- Burger, E. & Bordacchini, G. (2017). *Yearbook on space policy 2017. Security in outer space: rising for civilian space programmes*. Springer.
- Chung, C. K. (2001). *Aerospace power in the twenty-first century: A basic primer*. United States Air Force Academy; Air University Press.
- Congreso de Colombia. (2018). *Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022 Pacto por Colombia, pacto por la equidad*. Gobierno de Colombia.
- CONPES. (2010). 3.683. *Lineamientos para la formulación del programa nacional de observación de la tierra que incluya el diseño de un programa satelital colombiano*. República de Colombia - Departamento Nacional de Planeación. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3683.pdf>
- CONPES. (2016). 3.866. *Política nacional de desarrollo productivo*. República de Colombia - Departamento Nacional de Planeación. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3866.pdf>
- CONPES. (2020). 3.983. *Política de desarrollo espacial: condiciones habilitantes para el impulso de la competitividad nacional*. República de Colombia - Departamento Nacional de Planeación. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3983.pdf>
- Fuerza Aérea Colombiana. (2020). *Estrategia para el desarrollo aéreo y espacial de la Fuerza Aérea Colombiana 2042*.
- Fuerza Aérea Colombiana. (2019, 28 de noviembre). *FACSAT-1: Un año en el espacio*. <https://www.fac.mil.co/facsat-1-un-a%C3%B1o-en-el-espacio>
- Fuerza Aérea Colombiana. (s.f.). *Misión y visión Fuerza Aérea Colombiana*. <https://www.fac.mil.co/transparencia-y-acceso-informacion-publica/3-estructura-organica-y-talento-humano/mision-vision#:~:text=Volar%2C%20en>

- trenar%20y%20combatir%20para,a%20los%20fines%20del%20Estado
- Joya, R. A. (s.f.). *Libertad 1: Primer satélite colombiano en el espacio*. Universidad Sergio Arboleda. <https://www.usergioarboleda.edu.co/satelite-libertad-1/>
- Naciones Unidas. (1958, 13 de diciembre). *Resolución 1348 (XIII). Cuestión del uso del espacio ultraterrestre con fines pacíficos*. United Nations Office for Outer Space Affairs. https://www.unoosa.org/pdf/gares/ARES_13_1348S.pdf
- Naciones Unidas. (2002). *Tratados y principios de las Naciones Unidas sobre el espacio ultraterrestre*. Oficina de Naciones Unidas para Asuntos del Espacio Exterior y Organización de las Naciones Unidas. <https://www.unoosa.org/pdf/publications/STSPACE11S.pdf>
- Naciones Unidas. (2015a, 10 de junio). *La ONU debate sobre la inclusión del espacio exterior en la agenda de desarrollo sostenible*. Centro de noticias de la ONU; Objetivos de Desarrollo Sostenible. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/06/la-onu-debate-sobre-la-inclusion-del-espacio-exterior-en-la-agenda-de-desarrollo-sostenible/>
- Naciones Unidas. (2015b, 19 de junio). *Informe de la comisión sobre la utilización del espacio ultraterrestre con fines pacíficos*. 58.º periodo de sesiones. https://www.unoosa.org/res/oosadoc/data/documents/2015/a/a7020_0_html/A_70_20S.pdf
- Naciones Unidas. (2015c, 25 de septiembre). *Transformar nuestro mundo: La agenda 2030 para el desarrollo sostenible*. 70.º periodo de sesiones. Asamblea General. https://unctad.org/system/files/official-document/ares70d1_es.pdf
- Naciones Unidas. (2019, 21 de junio). *Informe de la Comisión sobre la Utilización del Espacio Ultraterrestre con Fines Pacíficos*. 62.º periodo de sesiones. https://www.unoosa.org/res/oosadoc/data/documents/2019/a/a7420_0_html/V1906080.pdf
- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OECD) (2014). *The Space Economy at a Glance 2014*: OECD Publishing.
- Parkinson, J. (2019, octubre 8 y 10). Is fluidity the key to effective multi-domain operations? [Conference Read Ahead]. Joint air power competence centre 2019 - Shaping NATO for multi-domain operations of the future, 39-46.
- Quiroga, R. G. (2019). Análisis de la política espacial colombiana: una perspectiva de defensa y seguridad. En C. Álvarez. *El espacio exterior: una oportunidad infinita para Colombia, (volumen 2)*. (Ed.), Escuela Superior de Guerra “General Rafael Reyes Prieto” y Fuerza Aérea Colombiana.
- Rodríguez, H. (2020, 16 de septiembre). Las mejores fotos históricas de la Tierra desde el espacio. *National Geographic-Astronomía*. https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/grandes-reportajes/las-mejores-fotos-historicas-de-la-tierra-desde-el-espacio_10297
- Sachs, J. (2015). *La era del desarrollo sostenible. Nuestro futuro está en juego: incorporemos el desarrollo sostenible a la agenda política mundial* (R. V. Vernis, Trad.). Deusto.
- Tesaurus de la Unesco. (2020, 3 de julio). *Dominio*. <http://vocabulary.unesco.org/browser/thesaurus/es/search?clang=es&q=dominio&vocabs=>
- United Nations Office for Outer Space Affairs. (s.f.-a). *Rolls and responsibilities* [Funciones y responsabilidades]. <https://www.unoosa.org/oosa/en/aboutus/roles-responsibilities.html>
- United Nations Office for Outer Space Affairs. (s.f.-b). *Space supporting the sustainable development goals* [Espacio que apoya los objetivos de desarrollo sostenible]. <https://www.unoosa.org/oosa/en/ourwork/space4s/dgs/index.html>
- United States Air Force. (2014). *America's Air Force: a call to the future* [Fuerza Aérea de América: un llamado al futuro]. United States Air Force. airman.dodlive.mil/files/2014/07/AF_30_Year_Strategy_2.pdf
- UNOOSA. (2020, 7 de diciembre). *Mensajes de los exploradores del espacio a las generaciones futuras*. UNOOSA/documents. <https://www.unoosa.org/documents/pdf/outreach/astromessages/mseS.pdf>
- Urbina Carrero, J., C. (2017). El espacio, Futuro de la Fuerza Aérea Colombiana. *Ciencia y Poder Aéreo*, 12, 202-208. <http://dx.doi.org/10.18667/cienciaypoderaereo.572>
- Vicepresidencia Colombia. (2020, 15 de octubre). Palabras de la vicepresidenta en la Semana Mundial del Espacio 2020 ‘WSW’ [Video]. *YouTube*. <https://www.youtube.com/watch?v=pLtGYbbRB3Y&t=593s>
- Zacharias, G. (2019). *Horizons autonomous: The way forward*. Air University Press; Curtis E. LeMay Center for Doctrine Development and Education.

La frontera Colombia-Perú vista a través de la Operación de Apoyo al Desarrollo Binacional*

| Fecha de recibido: 17 de marzo del 2021 | Fecha de aprobación: 8 de abril del 2021 |

David González-Cuenca

Magíster en Relaciones y Negocios Internacionales

Universidad Militar Nueva Granada
Colombia

Grupo de investigación: Procesos de Integración, Regionalización y Estructuras Organizacionales
Rol de investigador: teórico, experimental y escritura
<https://orcid.org/0000-0002-6563-9193>
✉ david.gonzalez@unimilitar.edu.co

Héctor Mauricio Cano Rodríguez

Especialidad tecnológica en Control Naval de Tráfico Marítimo

Universidad Militar Nueva Granada
Colombia

Grupo de investigación: Semillero PIREO
Rol de investigador: recolección de información experimental y escritura
<https://orcid.org/0000-0002-8614-5985>
✉ d6903741@unimilitar.edu.co

* Este artículo de investigación científica es resultado del Proyecto de Iniciación Científica PIC-DIS-3306, financiado por la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad Militar Nueva Granada durante el periodo 2020-2021, denominado “Seguridad y Desarrollo en la Frontera Colombia-Perú a través de la Operación de Apoyo al Desarrollo Binacional, en el periodo 2007-2019”.

Cómo citar este artículo: González-Cuenca, D., & Cano Rodríguez, H. M. (2021). La frontera Colombia-Perú vista a través de la Operación de Apoyo al Desarrollo Binacional. *Ciencia y Poder Aéreo*, 16(1), 102-115, <https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaereo.711>



La frontera Colombia-Perú vista a través de la Operación de Apoyo al Desarrollo Binacional

The Colombia-Peru Border through the Binational Development Support Operation

Fronteira Colômbia-Peru vista através da Operação de Apoio ao Desenvolvimento Binacional

Resumen: Este artículo hace un estudio cualitativo, con enfoque analítico e inductivo, sobre las implicaciones, en materia de seguridad y desarrollo, de la implementación de la Operación de Apoyo al Desarrollo Binacional en la frontera colombo-peruana, durante el periodo 2007-2019. Para ello, se especificaron las acciones más representativas de la ejecución de la operación; se determinó la evolución de la calidad de vida, a partir de la conceptualización del desarrollo derivada de la operación, y, finalmente, se estableció el alcance y el cumplimiento de las metas y objetivos propuestos por la Operación de Apoyo al Desarrollo Binacional Colombia-Perú. Este análisis permitió establecer, por un lado, la importancia de fortalecer operaciones como la de Apoyo al Desarrollo Binacional en esta zona de frontera y en otras de similares características, con el fin de impulsar el desarrollo territorial de la mano de los pobladores de la región, así como, por otro lado, la necesidad de vincular a más instituciones públicas, privadas y gobiernos extranjeros en la construcción de escenarios de cooperación internacional, en beneficio del desarrollo y la seguridad, en este caso particular, de la zona ribereña de los ríos Putumayo y Amazonas, territorios fronterizos entre Colombia y Perú.

Palabras clave: Colombia; Perú; cooperación internacional; desarrollo; frontera; seguridad.

Abstract: This paper presents a qualitative study, under an analytical and inductive approach, of the implications, in terms of security and development, of the Binational Development Support Operation on the Colombia-Peru border during 2007-2019. To do this, the most representative actions in the execution of said operation were specified, in addition to determining the evolution of the quality of life in this area, based on the concept of the development derived from the operation. The scope and fulfillment of the goals and objectives proposed by the Colombia-Peru Binational Development Support Operation were also addressed in this study. This analysis established, on the one hand, the importance of strengthening this kind of operations in the border area studied, and others with similar characteristics, in order to promote territorial development together with local inhabitants. On the other hand, findings point to the need of engaging more public and private institutions and foreign governments in the construction of international cooperation scenarios for the benefit of development and security, in this particular case, of the riparian zone of rivers Putumayo and Amazonas, bordering territories between Colombia and Peru.

Keywords: Colombia; Peru; international cooperation; development; border; security.

Resumo: Este artigo faz um estudo qualitativo, com enfoque analítico e indutivo, sobre as implicações, em matéria de segurança e desenvolvimento, da implementação da Operação de Apoio ao Desenvolvimento Binacional na fronteira colombo-peruana, durante o período 2007-2019. Para o efeito, foram especificadas as ações mais representativas da execução da operação; a evolução da qualidade de vida foi determinada com base na conceitualização do desenvolvimento resultante da operação e, por último, foram estabelecidos o propósito e o cumprimento das metas e objetivos propostos pela Operação de Apoio ao Desenvolvimento Binacional Colômbia-Peru. Esta análise permitiu estabelecer, por um lado, a importância de fortalecer operações como a de Apoio ao Desenvolvimento Binacional nesta zona de fronteira e em outras de características semelhantes, a fim de promover o desenvolvimento territorial da mão dos habitantes da região, bem como a necessidade de associar mais instituições públicas, privados e governos estrangeiros na construção de cenários de cooperação internacional, em benefício do desenvolvimento e da segurança, neste caso específico, da zona ribeirinha dos rios Putumayo e Amazonas, territórios fronteiriços entre a Colômbia e o Peru.

Palavras-chave: Colômbia, Peru, cooperação internacional, desenvolvimento, fronteira, segurança.

La frontera colombo-peruana tiene una extensión de 1.626 kilómetros (Cancillería de Colombia, 2021), a través de la cual Colombia y Perú mantienen relaciones diplomáticas desde el 16 de julio de 1822, siempre con el objetivo de estrechar y mantener los lazos históricos de amistad y cooperación, sobre la base del desarrollo de interacciones dentro del marco del diálogo directo, franco y cordial. A su vez, se han mantenido como principios fundamentales de la relación el respeto mutuo y la utilización de la diplomacia para la resolución de controversias, así como la no injerencia en los asuntos internos, para garantizar la estabilidad y la seguridad (Novak & Namihas, 2011).

No obstante, la relación bilateral ha atravesado situaciones complejas, entre las que se puede mencionar la Guerra colombo-peruana, desarrollada entre septiembre de 1932 y mayo de 1933, catalogada como un conflicto limítrofe por la posesión de Leticia, ahora capital del departamento del Amazonas (Ávila Sánchez, 2017). Como antecedente en relación con la disposición limítrofe, es necesario mencionar el Tratado Lozano-Salomón, del 24 de marzo de 1922, que buscó acordar entre Colombia y Perú una frontera para delimitar, de una vez para siempre, el territorio de ambas naciones. Con el desarrollo del Tratado, se profundizó en el denominado Tratado de Navegación y Límites, en el que se establece que

Perú recibe los espacios comprendidos entre la margen derecha del Río Putumayo, hacia el oriente de la boca del Cuhimbé, y la línea establecida y amojonada como frontera entre Colombia y el Ecuador en las hoyas del Putumayo y del Napo. Por su parte Colombia recibe los territorios comprendidos entre el amojonamiento banda derecha del río Yaguas (desembocadura en el Putumayo), banda izquierda del río Atacuarí (desembocadura en el Amazonas) y de este punto a la frontera con el Brasil (Tabatinga-río Putumayo) (Ávila Sánchez, 2017, p. 159).

Con el incremento del conflicto fronterizo, la búsqueda de una salida diplomática se presentó desde el lado peruano con la solicitud de una Comisión Conciliadora; sin embargo, el Gobierno de Colombia, que se

caracterizaba por su tendencia nacionalista, se negaba a finalizar la disputa mediante un arbitraje internacional, incentivando, en contravía diplomática, el recrudecimiento de las acciones militares. Para ello fue determinante el rápido desarrollo de la Fuerza Aérea Colombiana, que, a partir de su participación en este conflicto, estableció un hito en su configuración (Ávila Sánchez, 2017; Fuerza Aérea Colombiana, 2021).

Tras el fin de la guerra, las relaciones entre los dos países se afianzaron. El origen común por cuenta de la campaña libertadora de Simón Bolívar, las semejanzas culturales y sociales acercaron a Colombia y a Perú en torno a la búsqueda de un crecimiento económico para sus ciudadanos y la construcción de países industrializados. Por supuesto, la proximidad territorial coadyuvó a acercar a las poblaciones ubicadas en zonas de frontera y a que cooperaran para conseguir unas condiciones de seguridad local adecuadas (González-Cuenca & Rodríguez, 2018), factores que fueron fundamentales en el establecimiento de escenarios políticos y comerciales más amplios, integradores y centralizados, como la Comunidad Andina (CAN), la Unión de Naciones Suramericanas (Unasur) y la asociación bilateral para negociar el Tratado de Libre Comercio (TLC) con la Unión Europea (Álvarez & Guerra-Barón, 2013).

Aquí hay, entonces, una demostración de ambos Estados por mantener unas relaciones diplomáticas estables, determinadas por el vínculo territorial y las condiciones bilaterales que se han creado. La estrategia que estos países han consolidado con la puesta en marcha de la Operación de Apoyo al Desarrollo Binacional (OADB) es parte de ese proceso de relaciones bilaterales.

Pasando por el establecimiento de la Comisión de Vecindad e Integración Peruano-Colombiana (CVIPC), en el 1994, y la Comisión Binacional de Seguridad Fronteriza (Combifron), instalada en 2007, la OADB se presenta como un hito diplomático multidimensional de largo aliento, que busca seguir fortaleciendo y ampliando las áreas en las que pueden trabajar juntos, dentro del mantenimiento de una buena cooperación internacional que les permita reafirmar las acciones conjuntas para superar las dificultades de seguridad que vive la región compartida.

Por lo anterior, este artículo se centrará en analizar las implicaciones, en materia de seguridad y desarrollo, de la implementación de la OADB en la frontera colombo-peruana, durante el periodo 2007-2019, basado en los conceptos de *seguridad multidimensional* y de *desarrollo sostenible*.

Es importante resaltar que la zona de frontera colombo-peruana presenta un problema de seguridad y desarrollo importante, producto de las organizaciones al margen de la ley y el narcotráfico, tradicionalmente originario del lado colombiano y que el escenario de posconflicto propuesto por la finalización del conflicto armado de Colombia con la guerrilla de las FARC solo recrudesció al desplazar la violencia y trasladar nuevos factores de conflicto hacia las zonas de frontera (González-Cuenca & Rodríguez, 2018).

Es común destacar, también, la baja presencia estatal en los territorios más alejados del centro decisorio, tanto de Colombia como de Perú. No obstante, para el territorio estudiado, desde el lado colombiano, se ha producido, en los últimos 15 años, el auge de posiciones estatales de importancia relativa para garantizar mínimos en torno a la seguridad. Así, la Armada de Colombia, a través de la Fuerza Naval y la Marina de Guerra del Perú, ha mantenido la continuidad en el desarrollo de la Campaña Binacional Colombia-Perú desde el 2007 (Cancillería de Colombia, 2019).

Método

Metodología aplicada

Este artículo es un análisis cualitativo de corte analítico, que, según Roberto Hernández Sampieri (2014), “se fundamenta en una perspectiva interpretativa centrada en el entendimiento del significado de las acciones de seres vivos, sobre todo de los humanos y sus instituciones (busca interpretar lo que va captando activamente)” (p. 9). El estudio se ha fundamentado en la recolección de fuentes primarias, en las que, por medio de conversaciones extraoficiales de integrantes del equipo investigador, se pudo conocer la percepción de algunos habitantes de la región fronteriza y miembros

de la Armada Nacional de Colombia que participaron en la Operación; y secundarias, integradas por información proveniente de las agencias, organismos e instituciones estatales de Colombia relacionadas con la OADB, como la Cancillería colombiana, la Armada Nacional de Colombia y el Departamento de Acción Integral de la Fuerza Naval del Sur, principalmente. También se basa en libros resultados de investigación y artículos académicos de bases virtuales de alto reconocimiento internacional, como Dialnet, Jstor, Latindex, Proquest, Scopus y Springer.

En algunos espacios, esta investigación se apoya en experiencias de los pobladores de la zona fronteriza que han sido beneficiarios de la OADB, las cuales han sido recolectadas por el equipo investigadores de manera informal, a partir de conversaciones, pero de las que se pudieron obtener percepciones generales sobre la Operación, dada la negativa de las personas a figurar por miedo a represalias de grupos ilegales que aún existen en la zona. También se ha reunido una serie de comentarios extraoficiales, brindados de manera espontánea por algunos miembros de las instituciones que participan en la Operación, como miembros activos de la Armada Nacional de Colombia, que sirven de apoyo a los análisis realizados. La información personal ha sido contrastada con los informes de instituciones oficiales, presentados por la Cancillería de Colombia y el Departamento de Acción Integral de la Fuerza Naval del Sur, para ser incluidos en el estudio y se ha desarrollado el tratamiento de la información personal de manera adecuada, bajo los parámetros éticos institucionales y nacionales.

Fases metodológicas

De manera paralela a la implementación de las nueve fases metodológicas que se describen más adelante, se desarrolló un marco teórico a partir del método de mapeo (Hernández Sampieri, 2014), para profundizar en la revisión de documentos teóricos relacionados con la seguridad multidimensional y el desarrollo sostenible. Con ello, se establecieron las principales definiciones, las dimensiones que integran los conceptos teóricos y las implicaciones analíticas que pueden

desarrollarse en función del objeto de estudio propuesto, por lo que se descartaron aproximaciones relacionadas con la seguridad y el desarrollo que no abordaban aspectos prácticos o idóneos para el tratamiento de las condiciones resultantes de la implementación de la OADB. Tal es el caso de la seguridad vista de manera tradicional por el paradigma realista de las relaciones internacionales, o, en el caso del desarrollo, la concepción ligada al crecimiento económico. Como resultado, se consideraron la seguridad multidimensional y el desarrollo sostenible como enfoques teóricos para aplicar en el proceso investigativo y analítico.

De la recolección de información institucional, es importante destacar la aportada por la Armada Colombiana sobre el desarrollo de la OADB, desde el 2007 hasta el 2019, que se presenta como una fuente cualitativa y cuantitativa de alta importancia para el estudio, ya que identifica las acciones puestas en marcha de manera conjunta por los dos países, los resultados obtenidos de la operación y la evaluación del impacto de aquellas en función de las variables conceptuales de la seguridad multidimensional y el desarrollo sostenible en la población ribereña de los ríos Putumayo y Amazonas, tanto del lado peruano como colombiano.

Este artículo se enmarca en un proceso de investigación formativa denominado Proyectos de Iniciación Científica, que busca integrar de manera directa un investigador profesional con un estudiante para desarrollar un proyecto que busque respuestas a problemas nacionales e internacionales. Por lo cual, el proyecto presentó nueve fases metodológicas, de las cuales la primera era la definición de la idea específica que se requería trabajar, en donde la experiencia de los investigadores, desde el aspecto investigativo y aplicado, dio como resultado la determinación de una aproximación analítica de la OADB, que se presentó como un aspecto relevante desde la estructura de la fuerza naval de Colombia y de alta importancia para identificar los factores de cooperación en escenarios diplomáticos y militares entre los países fronterizos, para así mejorar las condiciones de las poblaciones que habitan en esos territorios.

Para el desarrollo de la segunda fase metodológica, los investigadores abordaron el planteamiento

del problema, que se caracterizó por la necesidad de identificar los resultados que, en materia de seguridad multidimensional y de desarrollo sostenible, se han obtenido luego de 12 años de ejecución de la operación en territorio fronterizo, conduciendo así a la tercera parte del método, la cual consistió en la inmersión inicial en el campo, caracterizada por la búsqueda de información oficial relacionada con los objetivos, implementación y resultados obtenidos tras la operación año tras año.

Como cuarta fase, los investigadores elaboraron el diseño del estudio, que constaba, por un lado, de la presentación de aspectos históricos relacionados con las situaciones vividas entre Colombia y Perú para demostrar la evolución de estas, lo que permitió la consolidación de procesos de cooperación como la OADB; y, por otro, de la revelación de los resultados obtenidos en las estrategias más cercanas para validar un progreso en términos de seguridad multidimensional y desarrollo sostenible. A partir de ello, en la quinta fase se procedió a definir el periodo del estudio, el cual se determinó de acuerdo con los años de realización de la OADB, implicando, así, la recolección de datos específicos y su correspondiente análisis en la sexta y séptima etapa de la investigación, respectivamente.

Mediante una metodología de tipo cualitativa de corte analítico-descriptivo, se procesaron los resultados arrojados por la revisión de la información de fuentes académicas e institucionales, aplicada en todas las fases. Se desarrolló la octava fase, determinada por la interpretación de los resultados, lo que dio paso, como novena fase, a la conclusión del proceso metodológico diseñado, caracterizada por la elaboración del reporte de resultados, que se presenta en este artículo.

Resultados

La operación de apoyo al desarrollo binacional Colombia-Perú

La OADB surgió en el 2007 con el objetivo de incentivar las estructuras de las comunidades en relación con el desarrollo sostenible y el mejoramiento de las condiciones sociales multidimensionales de los habitantes

de la zona fronteriza (Cancillería de Colombia, 2019), como una acción que se da entre las dos naciones y varias agencias estatales, que, mediante el fortalecimiento de la presencia del Estado, procuraba

[...] el mejoramiento de la calidad de vida de los pobladores en ambas riberas de los ríos Putumayo y Amazonas, que sirven de límite entre los dos países. Durante las jornadas, los pobladores recibieron atenciones en salud, servicios de medicina general y especializada, odontología, laboratorio clínico, valoración nutricional, cedulação, registro, charlas de prevención y promoción, así como la entrega en calidad de donación de paquetes alimentarios por parte del ICBF y elementos de aseo, ropa y vestuario (Cancillería de Colombia, 2019).

Durante los 13 años de la OADB, se han beneficiado 173.513 personas con 427.204 servicios de salud, según el informe presentado por la Armada de Colombia (2019). Este importante evento que busca reafirmar la soberanía nacional y estrechar lazos de hermandad entre ambos países, realiza su recorrido por los ríos Putumayo y Amazonas. Tripulantes de ambas fuerzas navales navegan más de 2.000 kilómetros, durante más de 90 días, llevando atención médica en diferentes especialidades, actividades lúdico-recreativas y más de 180 toneladas de ayudas humanitarias a los habitantes de este territorio fronterizo (Armada de Colombia, 2019).

Esta operación involucra a más de 80 hombres y mujeres de la Armada de Colombia y personal civil; de igual manera, la Marina de Guerra del Perú involucra a más de 70 personas, entre militares y civiles, que forman parte de estas travesías, durante las cuales han recorrido la ribera de los ríos Putumayo y Amazonas, llegando a más de 60 puntos, entre veredas y corregimientos, de diversos municipios de Colombia y Perú, en su primera edición en 2007; y de 117 —59 de esas poblaciones son colombianas y 58, peruanas—, en sus últimas versiones, para beneficiar a más de 19.000 personas (Cancillería de Colombia, 2019).

Esta operación ha buscado integrar a más instituciones cada año, entre ellas la representación diplomática de Estados Unidos, particularmente apoyada por

Colombia, varios ministerios y agencias gubernamentales que atienden asuntos de salud, seguridad social y protección de infancia y desarrollo sostenible, al igual que instituciones de educación, como el SENA, lideradas por la Fuerza Naval del Sur, apuntando al establecimiento de acciones en pro de la paz, las relaciones internacionales y la consolidación de escenarios de seguridad. Con Perú, ocurre lo mismo con el liderazgo de la Marina de Guerra y organizaciones gubernamentales de apoyo multidimensional (Cancillería de Colombia, 2019).

Desde el 2007, el esfuerzo es mayor y con más instituciones involucradas en esta operación de gran magnitud, como el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, la Agencia Nacional para la Superación de la Pobreza Extrema (ANSPE), Artesanías de Colombia, Bancoldex, Invías, Migración Colombia y otras descritas en el Conpes 3.805 del 2014. Mediante el desarrollo de las campañas de sensibilización para contrarrestar los factores de inestabilidad en temas de seguridad multidimensional, se sigue buscando negarle el apoyo de los pobladores a las organizaciones al margen de la ley y al narcotráfico. Se ha procurado la mejora continua en cada versión, con lo cual, según el Departamento de Acción Integral de la Fuerza Naval del Sur, en el 2007, lograron un total de 10.000 servicios prestados y 4.794 personas beneficiadas, y, terminado el 2019, con 24.600 servicios prestados y 10.561 personas beneficiadas, lo que incrementa así, para cada edición, los servicios prestados y la cantidad de personas atendidas.

Tabla 1
Resultados obtenidos por la OADB del 2007 al 2019

Año	Total servicios prestados	Total personas beneficiadas
2007	10.000	4.794
2008	22.215	10.405
2009	27.595	16.000
2010	26.484	12.890
2011	26.767	9.579
2012	25.175	9.816
2013	27.989	11.726
2014	26.989	16.016
2015	45.346	19.135
2016	53.188	19.156
2017	52.236	19.032
2018	58.621	14.403
2019	24.600	14.403
Total	427.204	173.513

Fuente: Departamento de Acción Integral Fuerza Naval del Sur (2019)

Mediante las estrategias establecidas por la Operación para identificar directamente las condiciones de la población se han impulsado de manera sostenible los proyectos productivos que sean acordes a la región, para que los pobladores puedan ser autosuficientes y manejar dichos proyectos de manera autónoma, valor que permitirá continuidad en los proyectos y la sostenibilidad en función del desarrollo de la región, evitando así que recaigan en procesos ilícitos.

Seguridad multidimensional y desarrollo sostenible a partir de la OADB

La OADB tiene el compromiso de trabajar en campañas productivas e impulsar el desarrollo sostenible para garantizar resultados en los ámbitos económico, ambiental y social como beneficio para las comunidades. Con el progreso en la frontera colombo-peruana se garantizará una vida sana para los pobladores, la educación inclusiva como aporte a la generación de trabajo en la frontera, con lo cual se promueve la colaboración de nuevas instituciones que se han ido involucrando a lo largo de las trece versiones de la Operación.

Para la representación de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) en el territorio, es necesario que los estamentos gubernamentales puedan fomentar alternativas de mejoramiento compartidas con las comunidades indígenas. Las acciones aisladas y parcializadas no pueden ser una constante y la desarticulación interinstitucional y social se presenta como una debilidad en la estrategia que se ha presentado, afectando el uso de los recursos destinados para la atención de los problemas. Según la ONU (2020, p. 6), los canales de comunicación deben ser mejorados, pues son la causa fundamental de la desarticulación mencionada. Se hace imperativo establecer, entonces, una comunicación efectiva para llevar lo que producen estas comunidades a los mercados del país.

Además, la OADB se ha enfocado en actividades relativas a la paz y las relaciones internacionales, así como a la defensa y la seguridad de las naciones en áreas de frontera, por lo cual lo más satisfactorio ha sido escuchar de parte de los mismos pobladores, según relatos de los integrantes de la Operación, que su

calidad de vida les está cambiando, que se sienten más seguros, que los proyectos productivos que los gobiernos han impulsado en sus territorios les están dando un gran impulso para progresar económicamente y desarrollarse de manera sostenible. Los pobladores dicen sentirse felices de estar del lado de la legalidad, con proyectos inclusivos y que le están aportando al crecimiento de la región y a la eliminación de estigmas. Pero quizá la satisfacción más grande de las personas es reconocer que se volvió un hábito positivo el que, año tras año, el Estado llegue a su territorio con las instituciones necesarias para ayudar en su crecimiento personal, familiar y comunitario, como una atención más fuerte del ICBF, del Ministerio de Educación Nacional, del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, por mencionar algunas, y así poder acceder a programas de los que no habían escuchado antes. Esto les muestra una posibilidad de construir un nuevo futuro.

De las 13 versiones de la OADB, se ha identificado que la decisión de los gobiernos de ambos países ha sido la de aumentar su presencia estatal en esta región tan alejada de las ciudades capitales y, a la vez, fomentar la vinculación institucional, tanto pública como privada, en esta gran labor, con el propósito de lograr articular proyectos sostenibles que permitan el fortalecimiento social y les brinden a las comunidades un crecimiento económico que expulse de sus territorios los cultivos ilícitos y disminuya el atractivo de participar en el narcotráfico, lo cual conduce a mejorar la seguridad.

La percepción del avance en materia de seguridad y desarrollo, desde la perspectiva de los pobladores de la región, es bastante alentadora. Según la poca información suministrada por los mismos pobladores a los integrantes de la Operación, aquello que identifican como el factor más difícil de asumir en las poblaciones que han estado bajo la presión y zozobra de las amenazas de los grupos al margen de la ley y del narcotráfico es tener contacto con personal de las instituciones del Estado y la Fuerza Pública por miedo a las represalias que puedan tomar estas organizaciones criminales, por lo cual, en un alto porcentaje, deciden guardar silencio y, en ocasiones, no recibir ninguna

ayuda proveniente de los estados. Sin embargo, gracias a la periodicidad de la OADB, que les ha ido brindando mayor respaldo, alineada con la misión de la Armada Nacional de Colombia, la Fuerza Naval del Sur, con su puesto de mando en Puerto Leguízamo, Putumayo, quienes han enfocado sus esfuerzos para prestar sus servicios, entre los cuales se destaca la actividad de seguridad en los ríos Putumayo, Caquetá y Amazonas, han podido construir escenarios de confianza recíproca, ofreciéndole tranquilidad a los habitantes de esta región del país.

La recurrencia de la OADB se muestra como una de sus grandes virtudes. Debido a esto, se ha logrado transformar la percepción de seguridad y desarrollo de los pobladores de la zona ribereña de los ríos Putumayo y Amazonas y ha aumentado la presencia estatal, principalmente en programas como la sustitución de cultivos ilícitos, con lo cual los pobladores han encontrado una nueva oportunidad laboral, produciéndose un incremento en la motivación para seguir trabajando y para erradicar totalmente de sus territorios estos cultivos.

A pesar de esto, los mismos pobladores, de manera extraoficial, reconocen que falta mucho trabajo, y, más aún, por parte del Estado colombiano, en lo referente a las vías de comunicación, terrestres y fluviales, dado que les es muy poco rentable cultivar productos que deben ser comercializados en mercados de municipios fronterizos del departamento de Putumayo y ciudades como Leticia, en el departamento de Amazonas, desde donde son transportados al resto del país y fuera de este, ocasionando sobrecostos por los precios de los fletes y la intermediación. En contraparte, los pobladores perciben el cultivo y venta de la hoja de coca como una opción importante, ya que las organizaciones ilegales se las compran directamente en sus casas, y pagan muy bien el producto.

Sin embargo, los pobladores reconocen que el terreno que la Armada de Colombia y la Marina de Guerra del Perú le han negado a los grupos al margen de la ley y al narcotráfico les produce tranquilidad y seguridad, así como la posibilidad de ver crecer a sus hijos felices a su lado, sin ser arrebatados por los grupos armados, a causa del reclutamiento forzado, que ha

sido considerado como un factor de alta importancia en estos territorios.

En términos generales, los pobladores de la región fronteriza han encontrado en la OADB la oportunidad, a partir de la llegada del Estado, para potencializar el desarrollo de sus territorios, lo cual les ha traído mejor calidad de vida y progreso en varias dimensiones de la seguridad. La Operación se convirtió en el primer peldaño para recuperar el territorio históricamente dominado por los grupos al margen de la ley y el narcotráfico, siendo, a la vez, impulsora de los proyectos productivos que deben conducir a la consolidación de la soberanía por cuenta de la institucionalidad estatal. De esta manera, se ha convertido en el programa de cooperación e integración más importante en términos de seguridad y desarrollo sostenible que se ha desarrollado entre Colombia y Perú, así como el que más y mejores resultados, en términos multidimensionales, ha arrojado en beneficio de la población fronteriza de ambos países.

Discusión

Seguridad multidimensional en la frontera colombo-peruana

La frontera compartida entre Colombia y Perú se ha caracterizado por momentos de incertidumbre, como la guerra librada a inicios del siglo xx por cuestiones territoriales sobre Leticia. Las condiciones geográficas y la falta de comunicación tradicional con las ciudades capitales se suman al recuerdo de la guerra vivida. La imagen de ser retaguardia de grupos armados ilegales de Colombia y un territorio geoestratégico para el narcotráfico es permanente, no solo en los habitantes de la zona, sino en todos los ciudadanos de ambos países (López & Tuesta, 2015).

Lo anterior puede ser corolario de las dificultades estructurales que afrontan las poblaciones de estos territorios, que se conforman en su mayoría por comunidades indígenas. La denominada Triple Frontera Amazónica, configurada por territorios colindantes

de Brasil, Colombia y Perú, es un territorio donde se ubican más de 400 comunidades indígenas, albergando, según cifras de la ONU (2020), cerca de 6 millones de personas. El territorio de la Triple Frontera que incluye territorio brasileño abarca una población de 208.699 personas, de la cual el 57 % es caracterizado como indígena.

En Colombia, en el Amazonas, las cifras de inseguridad alimentaria presentadas por la ONU (2020) dan cuenta de un 59 % de la población en condición moderada o grave, mientras que en Perú se informa de un 49 % de la población en estas mismas condiciones. Es claro que el fenómeno de desabastecimiento y parálisis de los medios de transporte fluviales y aéreos provocado por la pandemia por la COVID-19 ha influido en el incremento de las cifras; sin embargo, la condición en estas poblaciones se asume de manera estructural, pues el mismo informe presenta un desabastecimiento previo a la pandemia de un 28 %, recalando, también, la desnutrición infantil, toda vez que casi la mitad sufren de anemia.

Algo similar sucede con la prestación de servicios de salud: el acceso es de baja calidad y la cantidad de lugares es insuficiente para atender condiciones de emergencia; tanto equipos como personal e insumos se han vuelto escasos y de difícil consecución (ONU, 2020, p. 5). Es decir, el problema del territorio fronterizo se presenta de manera multidimensional, impactando contundentemente el factor de seguridad, incluyendo condiciones ligadas a la salubridad y al agua potable, así como los elementos dispuestos para la higiene; no hay garantías para las familias de poder suplir las necesidades alimentarias básicas, a causa de una baja en los ingresos y las dificultades para acceder a productos comercializables.

Asimismo, las variables relacionadas con la seguridad multidimensional (la violencia de género, la trata de personas, el trabajo infantil, la deforestación por el comercio de madera y la expansión de la frontera agrícola) han sido impactadas negativamente de manera constante (Equipo de Modelación y Niveles de Referencia Sistema de Monitoreo de Bosques y Carbono, 2018).

En el aspecto tradicional de la seguridad, se pueden destacar el narcotráfico, que, a partir de la movilización

poco regulada que existe por los ríos Amazonas y Putumayo, puede transportar narcóticos hacia ambos lados de la frontera, para ser enviados a Norteamérica, Europa y Asia, principalmente (García Pinzón, 2018). Además, es necesario vincular el desarrollo acelerado que han tenido en este territorio las organizaciones de crimen organizado transnacional, que representan una nueva amenaza para la seguridad de ambos países (Trejos & Puente, 2016).

Desarrollo sostenible en la frontera colombo-peruana

El desarrollo sostenible debe darse de manera que sea equitativo, debe buscar el bienestar de las personas como principal prioridad, por lo cual la OADB encaja a la perfección con estas pretensiones que, desde el Gobierno nacional, se articulan a la agenda emanada de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, como apoyo al desarrollo en esta zona.

Para el caso fronterizo colombo-peruano, se entiende que la gestión ambiental es una herramienta clave para avanzar en materia de desarrollo. La biodiversidad alojada en esta área, los bienes hídricos y la caracterización de la Amazonía en su conjunto como un bien supremo de la humanidad dejan ver que, para las dos naciones, el desarrollo sostenible debe ser considerado un pilar dentro de cualquier marco de entendimiento binacional o plan de acción unilateral.

En este sentido, las comunidades indígenas, por su cosmovisión ligada con la protección ambiental y el aprovechamiento sostenible de los bienes naturales, pueden aportar un valor agregado, en función del desarrollo sostenible y la interacción de las poblaciones fronterizas. En perjuicio de lo anterior, Ladino y Rey (2010) concluyen que:

[...] la gestión ambiental ocurre solo en el marco de cada municipio fronterizo, pero no es un tema que haya unido a los actores y entidades del ámbito fronterizo, además persisten problemas como contaminación de aguas, basuras, destrucción de recursos naturales, tráfico de recursos naturales, falta de educación ambiental,

entre otros, a pesar del esfuerzo realizado por las entidades ambientales de Leticia (p.47).

En consonancia con el sentido del desarrollo sostenible de la frontera, se puede destacar el Proyecto Putumayo Tres Fronteras - Colombia, Ecuador y Perú, financiado, desde el 2011, por la Unión Europea y la Organización WWF Alemania, que tiene por objetivo:

[...] contribuir a la conservación de la biodiversidad y al desarrollo sostenible de la cuenca media del río Putumayo en el marco de los acuerdos y compromisos ambientales multilaterales adquiridos por Colombia, Ecuador y Perú... tener incidencia en políticas ambientales, públicas y sectoriales de ámbito nacional y regional, mediante el desarrollo herramientas y mecanismos operativos, técnicos y financieros (WWF, 2011).

Relaciones bilaterales con enfoque fronterizo entre Colombia y Perú

Los procesos de integración y las acciones conjuntas entre los Gobiernos de Colombia y de Perú se han desarrollado desde la misma fundación de la CAN en 1969; no obstante, los enfoques en esta zona fronteriza se dan tan solo hasta 1988, cuando, a partir del funcionamiento de la Comisión Mixta del Tratado de Cooperación Amazónica Peruano-Colombiano, se inicia un proceso que redundaría en la configuración del Plan Peruano-Colombiano para el Desarrollo Integral de la Cuenca del Río Putumayo, aprobado diez años más tarde, demostrando las complicaciones diplomáticas para concretar acciones reales para la zona de frontera (Novak & Namihás, 2011).

Dado el desarrollo de las relaciones en el interior de la CAN, en 1999 se presenta el Plan de Desarrollo de la Zona de Integración Fronteriza (ZIF), que formó parte de la Política de Integración y Desarrollo Fronterizo de la organización multilateral, con el respaldo de la antigua CAF, hoy Banco de Desarrollo de América Latina y el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) (Novak & Namihás, 2011).

El Plan cuenta con siete objetivos estratégicos, líneas de acción y sus correspondientes metas e indicadores, debidamente formulados; resultado de investigaciones en los propios territorios y en consulta con las comunidades locales. Como resultado el Plan de Desarrollo está conformado por seis grandes Programas que coinciden con los Objetivos Estratégicos planteados en el marco del Plan de Desarrollo de la ZIF peruano colombiana. Dentro de los proyectos prioritarios se incluyen también intervenciones encaminadas al suministro de energía proveniente de fuentes alternativas, manejo de bosques, y aspectos relacionados con la logística de comercialización o intercambio de bienes utilizando el transporte fluvial; los cuales están asociados también a las necesidades más apremiantes de las poblaciones que integran los [Núcleos de Desarrollo e Integración] NDIS de las [Unidades Geoeconómicas] UGE del Putumayo. El trabajo así mismo incluye los mecanismos de gestión del Plan, la Institucionalidad Política y Operativa, y la propuesta de la creación de un Fondo Binacional para el Desarrollo de la ZIF con aportes provenientes de los gobiernos de Perú y Colombia, de instituciones multilaterales, países pertenecientes a la OCDE y otros. Además propone los mecanismos de Gestión del Plan desde la visión institucional, política y operativa y propone una Comisión Binacional Autónoma de Gestión de la ZIF y reglamentos en diferentes materias, como el sistema de monitoreo del Plan (sistematización, seguimiento y evaluación). Es de destacar que si bien el territorio de la ZIF es demasiado grande y poco poblado, dada su homogeneidad en las características físicas-ambientales y económico-sociales, ha sido acertado trabajar en su totalidad la región para la elaboración y ejecución del Plan (Arciniegas, 2018, p. 31).

Más adelante, a inicios de los 2000, se da origen a la Comisión de Transición del Plan Peruano-Colombiano para el Desarrollo Integral de la Cuenca del río Putumayo, con un componente sostenible hacia el manejo y la gestión de los bosques de la Amazonía, incluyendo una visión de comercialización de productos nativos, con la administración adecuada de los recursos naturales, teniendo presente factores como el cambio climático, considerado ya como una amenaza

para la seguridad, y los aspectos relacionados con el uso de maderas y productos artesanales. Así se vinculan los valores de la seguridad multidimensional y el desarrollo sostenible por primera vez en los planes de cooperación e integración binacional (Novak & Namihas, 2011).

Para realizar seguimientos, actualizaciones y modificaciones previas a este plan, en el 2003, se creó el Comité Técnico Binacional de Desarrollo e Integración Fronteriza de la Comisión de Vecindad e Integración Peruano-Colombiana, que funcionó hasta 2010, cuando el plan ya estaba en ejecución (Novak & Namihas, 2011).

En concordancia con el proceso regional de integración y cooperación, desde el 2007, se desarrollaron negociaciones por cuenta de Perú y Colombia, en el marco de la CAN, para acordar un Tratado de Libre Comercio con la Unión Europea, en el entendido de la negociación entre bloques. Los acercamientos de alto nivel entre los países andinos no solo dieron un nuevo aire a la organización multilateral, que, luego, por dificultades con Bolivia y Venezuela, se complicaron, sino que afianzó las relaciones bilaterales, promoviendo un objetivo común. Finalizó en el 2010 con el hecho de que los líderes de ambas partes firmaron las bases comerciales del acuerdo (Álvarez & Guerra-Barón, 2013, p. 128).

Todos estos esfuerzos por propiciar acercamientos bilaterales, procesos de integración y puntos de acuerdo demuestran que, para el 2007, el lanzamiento de la OABD se configura como la punta de lanza de un proyecto direccionado a mejorar radicalmente las condiciones de seguridad multidimensional de la zona fronteriza de Colombia y Perú, a la par que se configuran y consolidan escenarios de desarrollo sostenible para la población ribereña de los ríos Amazonas y Putumayo.

Para el 2011, los presidentes de ambos países acordaron instaurar el Mecanismo de Consulta y Coordinación (MCC2+2) —la instancia más alta para definir aspectos relacionados con la lucha conjunta contra el terrorismo y el narcotráfico, con un énfasis específico en la zona fronteriza—, estableciendo que la seguridad es una prioridad y la base del desarrollo integral de este territorio (Cancillería de Colombia, 2021).

En el mismo sentido, con el MCC2+2 se presenta una importante relación entre la seguridad multidimensional y el desarrollo sostenible, por ejemplo, al

[...] coordinar entre las Fuerzas Armadas y la Policía Nacional de ambos países, y a través de ellas con otras entidades nacionales, el diseño y ejecución de acciones para preservar y proteger el medio ambiente y la biodiversidad amazónica, ante las diferentes amenazas y riesgos de seguridad: a) Minería ilegal. Desarrollar operaciones conjuntas, coordinadas y sincronizadas con el fin de identificar, combatir y erradicar la explotación ilegal, especialmente, en los dos Putumayo, Amazonas y sus afluentes. b) Explotación y comercio ilegal de maderas. Coordinar acciones e intercambiar información para proteger los recursos maderables de la Amazonía y desarrollar actividades de interdicción, especialmente, sobre los dos Putumayo, Amazonas y sus afluentes. c) Tráfico de especies de fauna y flora silvestre. En el marco de su competencia, adoptar medidas para proteger y preservar las especies de fauna y flora silvestre, y combatir su tráfico. d) Depredación de la selva amazónica. Fortalecer las capacidades de prevención y respuesta, en el ámbito de sus competencias, contra las actividades de depredación de la selva amazónica (Cancillería de Colombia, 2021).

Este mecanismo se ha establecido dentro de la Combifron, que integra reuniones de alto nivel de las instituciones militares, las organizaciones regionales que tienen lugar en la zona de frontera y los niveles relacionados con seguridad y defensa nacional de ambos países, y así también se incluye el Plan Operativo Anual Binacional (POAB) (Cancillería de Colombia, 2021).

Uno de los grandes valores para que la Operación sea una realidad ha sido la configuración de la ZIF, que se enfoca principalmente en atender áreas económica y socialmente deprimidas y articularlas con zonas de alto potencial de recursos. La ZIF Colombia-Perú ha impulsado estrategias que buscan sacar este territorio del sometimiento y aprovechamiento por parte de los grupos al margen de la ley y el narcotráfico (Moreno Urigüen, 2006); la OADB ha estado trabajando para

impulsar el desarrollo, llevar las instituciones del Estado a estas zonas alejadas y crear un ambiente de seguridad en la zona fronteriza.

También, entre la ZIF y la OADB existe una interacción para asesorar e impulsar proyectos productivos que sustituyan los cultivos ilícitos, con el propósito de promover oportunidades para miles de colombianos que soportaron más de medio siglo de conflicto armado en lugares recónditos del país y aportar al desarrollo del lado peruano. Sin embargo, han encontrado grandes dificultades para la implementación de estos proyectos, debido a la mala infraestructura vial y el pésimo transporte fluvial en los ríos Putumayo y Amazonas.

Así, para el 2007, se desarrolló la Campaña de Apoyo al Desarrollo Colombia-Perú en el marco de la OADB, que:

[...] se trata de un esfuerzo binacional e interinstitucional, que tiene como objeto fortalecer la presencia Estatal y propender por el mejoramiento de la calidad de vida de los pobladores en ambas riberas de los ríos Putumayo y Amazonas, que sirven de límite entre los dos países (Cancillería de Colombia, 2019).

No obstante el impacto de la OADB, la pandemia por la COVID-19 ocasionó una transformación radical en los esfuerzos presentes hasta el año de su aparición. Para la región, el contexto fue definido como *crítico*, lo que condujo a que las autoridades locales, nacionales e internacionales diseñaran una estrategia multidimensional con acciones necesarias para la región (ONU, 2020, p. 7).

Para el desarrollo de este plan, Colombia y Perú, junto con Brasil, han logrado construir estrategias de cooperación que tienen una destinación de recursos cercana a los 10.500.000 USD, de los cuales tan solo 1.500.000 USD se destinan a Brasil, mostrando el panorama de la necesidad de los otros dos países:

Como primer paso para poner en marcha el Plan, desde la oficina de OCHA Colombia se ha contratado un coordinador de terreno/analista de información en Leticia, con el fin de apoyar los datos, demás tareas de

información y coordinar las evaluaciones y respuesta con los socios humanitarios e instituciones locales. Desde Perú se están buscando recursos adicionales para la contratación de dos personas que apoyen tareas similares en su territorio. Brasil está adelantando planes similares para contratar a una persona que esté basada en Manaus para apoyar la extensión de actividades a la triple frontera. El Plan de Acción cuenta inicialmente con un énfasis en la respuesta en los sectores de Salud, Seguridad Alimentaria y Nutrición (SAN) y Agua y Saneamiento Básico (WASH), identificados como prioritarios por la misión de evaluación y respondiendo también a las necesidades prioritarias identificadas por los Gobiernos. Las actividades de este plan de acción se resumen en 25 actividades críticas para implementación. La mayoría de estas actividades son comunes a las intervenciones requeridas en los tres países (ONU, 2020, p. 7).

En consecuencia, las relaciones bilaterales llegan a abordar incluso situaciones de amenaza imprevistas como la pandemia mundial, promoviendo la interacción bilateral entre Colombia y Perú, con injerencia de Brasil, por la Triple Frontera Amazónica, y la comunidad internacional, a través de organizaciones multilaterales.

Conclusiones

Si bien es cierto que las relaciones entre Colombia y Perú, a inicios del siglo XX, fueron, de una u otra manera, consideradas como *tormentosas*, debido a la guerra fronteriza y la delimitación de las fronteras a través del Tratado Lozano-Salomón, fueron siempre un soporte para los acercamientos diplomáticos y la resolución de conflictos consensuada.

Desde el desarrollo de la guerra en los años 30, las relaciones bilaterales se fortalecieron de una manera exponencial. Las diferentes acciones binacionales que se crearon y las interacciones gestadas en el interior de organizaciones multilaterales dan cuenta de la solidez de las relaciones y también de los esfuerzos, en

diferentes niveles de la toma de decisión estatal, que han hecho ambos países por garantizar los mínimos vitales a la población habitante de la zona fronteriza.

Los ya mencionados comités, comisiones, planes, tratados, políticas binacionales y el Tratado de Libre Comercio negociado en el marco de la CAN con la Unión Europea, el MMC2+2 y el POAB, son la demostración del empeño por consolidar espacios de seguridad y desarrollo en la zona de frontera.

A partir de lo anterior, es posible dimensionar la importancia, el desarrollo y los resultados que, en materia de cooperación e integración, puede tener la constante implementación de la OADB Colombia-Perú, toda vez que ayuda, de manera decisiva, en la reducción de factores de inseguridad multidimensionalidad y apoya el desarrollo sostenible de la región. Ambos factores están intrínsecamente relacionados, pues el medioambiente, la seguridad ciudadana, el acceso a bienes naturales y su protección, la mejora en las condiciones de salud, alimento, vivienda, transporte, etc., son vitales para la región y se enmarcan como los objetivos de la Operación.

El acceso a las instituciones, el acompañamiento de estas y el fomento de actividades productivas de orden sostenible son pilares para consolidar esos escenarios de seguridad y desarrollo que promulga la OADB, a la vez que son factores favorables para la consolidación de escenarios de soberanía territorial, confianza en las instituciones estatales y el enfrentamiento estructural de amenazas como el terrorismo, el crimen organizado transnacional, el narcotráfico, la deforestación y el cambio climático.

La OADB, que, de 2007 a 2019, ha cumplido con cerca de 200.000 ciudadanos de ambos países, es recibida con los brazos abiertos y esperada anualmente con ansias. Las condiciones sociales de la región han cambiado y, poco a poco, los pobladores empiezan a transformar sus modelos productivos ilegales hacia la legalidad, restando espacio a los criminales; y, aunque aún persiste un grado importante de temor frente a las represalias que esto pueda provocar, las personas se vuelven más conscientes de su papel comunitario y, en consenso con las comunidades indígenas, se

ha empezado a notar un cambio importante en el pensamiento de la población, que permite concluir con un valor agregado de escenarios de optimismo en la zona fronteriza entre Colombia y Perú, gracias al desarrollo anual de la OADB Colombia-Perú.

Declaración de conflicto de interés: Los autores no manifiestan conflictos de interés institucionales ni personales.

Referencias

- Álvarez, J. M., & Guerra-Barón, A. (2013). Acuerdo de Asociación Colombia y Perú-Unión Europea: de negociación bloquea bloque a negociación multi-partes. *Diálogos de Saberes*, (38), 117-132. <https://revistas.unilibre.edu.co/index.php/dialogos/article/view/1824/1358>
- Arciniegas, H. (2018). La integración y el desarrollo fronterizo en la Comunidad Andina. Reflexiones sobre su origen y evolución. *Aldea Mundo*, (45), 23-35. <https://www.reDALYC.org/jatsRepo/543/54356888003/html/index.html>
- Armada de Colombia (2019, 22 de julio). Culminó con éxito la actividad de bienestar más importante de la Amazonía colombiana. *Armada de Colombia*. <https://www.armada.mil.co/es/content/culmino-con-exito-actividad-bienestar-mas-importante-amazonia-colombiana>
- Ávila Sánchez, V. C. (2017, enero-junio). La guerra entre Colombia y Perú (1932-1934). Una perspectiva desde la prensa venezolana. *Tiempo y Espacio*, 35(67), 151-175. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6175402>
- Cancillería de Colombia (2019, 17 de mayo). *Inició la jornada binacional Colombia-Perú*. *Cancillería de Colombia*. <https://www.cancilleria.gov.co/newsroom/news/inicio-jornada-binacional-colombia-peru>
- Cancillería de Colombia (2021a). *Plan de Acción para la seguridad fronteriza entre el Ministerio de Defensa Nacional de Colombia y los Ministerios de Defensa y del Interior del Perú*. Bogotá: Ministerio de Relaciones Exteriores de Colombia. https://www.cancilleria.gov.co/sites/default/files/Normograma/docs/pdf/plan_seguridadfronteriza.pdf
- Cancillería de Colombia (2021b, 19 de marzo). Frontera Terrestre Colombia-Perú. *Cancillería de Colombia*. <https://www.cancilleria.gov.co/frontera-terrestre-colombia-peru>
- Cancillería de Colombia (2021c, 22 de marzo). Seguridad y Defensa. *Cancillería de Colombia*. <https://www.cancilleria.gov.co/en/integracion-fronteriza-brasil-ecuador-y-peru>

- Departamento de Acción Integral Fuerza Naval del Sur (2019). Estadísticas generales Operación Binacional Colombia-Perú, 2007-2019. https://www.armada.mil.co/sites/default/files/informe_de_gestion_arc_-_2019.pdf
- Equipo de Modelación y Niveles de Referencia Sistema de Monitoreo de Bosques y Carbono. (2018). *Caracterización de las principales causas y agentes de la deforestación a nivel nacional 2005-2015*. FAO, MASD, & IDEAM. <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023780/Caracterizacion.pdf>
- Fuerza Aérea Colombiana. (2021, 19 de marzo). El conflicto fronterizo. *Fuerza Aérea Colombiana*. <https://www.fac.mil.co/v-el-conflicto-fronterizo>
- García Pinzón, V. (2018). Dimensiones locales de la seguridad y la cooperación transfronteriza en la frontera amazónica de Brasil, Colombia y Perú. *OPERA*, (23), 59-80. <https://doi.org/10.18601/16578651.n23.05>
- González-Cuenca, D., & Rodríguez, E. (2018). Desarrollo de potencialidades fronterizas de Colombia en el posconflicto: una oportunidad para la gobernanza de la región Andina. En D. Calderón, & D. Palma, *Gobernanza Multidimensional* (pp. 167-186). Ediciones USTA.
- Hernández Sampieri, R. (2014). *Metodología de Investigación* (6.ª ed.). McGraw Hill Education.
- Ladino, W., & Rey, O. (2010). Gestión Ambiental y Fronteras. Análisis de las dinámicas de los actores locales en el departamento del Amazonas. *Nova et Vetera*, (19), 33-48.
- Leal, K. (2019, 11 de septiembre). Elecciones 2019: Violencia va en aumento, dice Fundación Paz y Reconciliación. *RCN Radio*. <https://www.rcnradio.com/colombia/elecciones-2019-violencia-va-en-aumento-dice-fundacion-paz-y-reconciliacion>
- López, N., & Tuesta, D. (2015). Economías ilícitas y orden social: la frontera de Perú, Brasil y Colombia. *CIDOB d'Afers Internacionals*, (111), 79-104. https://www.cidob.org/es/articulos/revista_cidob_d_afers_internacionals/111/economias_ilicitas_y_orden_social_la_frontera_de_peru_brasil_y_colombia
- Moreno Urigüen, H. (2006). Las implicaciones del conflicto armado interno colombiano para las fronteras de Ecuador, Perú, Brasil y Venezuela, 2000-2005. *Íconos*, (24), 161-170. <https://revistas.flacoandes.edu.ec/iconos/article/view/155/151>
- Novak, F., & Namihás, S. (2011). *Las relaciones entre Perú y Colombia. Perú-Colombia: La construcción de una asociación estratégica y un desarrollo fronterizo*. Konrad Adenauer Stiftung. http://repositorio.pucp.edu.pe/index/bitstream/handle/123456789/39908/Per%3%ba-Colombia_La_construcci%3%b3n_de_una_asociaci%3%b3n_estrat%3%a9gica_y_un_desarrollo_fronterizo.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2020). *Plan de Acción Triple Frontera Amazónica. Colombia-Brasil-Perú. Humanitarian Response*. https://www.humanitarianresponse.info/sites/www.humanitarianresponse.info/files/documents/files/plan_de_accion_triple_frontera_vf.pdf
- Trejos, L., & Puente, M. de la (2016). El lado colombiano de la frontera con Perú. ¿Vacío, inseguro y poco integrado? *Justicia*, (30), 52-69. <http://dx.doi.org/10.17081/just.21.30.1349>
- WWF. (2011, 7 de febrero). *Proyecto Putumayo Tres Fronteras-Colombia, Ecuador y Perú*. https://wwfint.awsassets.panda.org/downloads/plegable_pt_completo_final_2010_1.pdf

Desarrollo de una metodología para la gerencia de proyectos del sector aeroespacial en Colombia*

| Fecha de recibido: 23 de febrero del 2021 | Fecha de aprobación: 20 de abril del 2021 |

Giovanna Estefanía Ramírez-Ruiz

Ingeniera electrónica

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito
Colombia

Unidad de Proyectos

Rol de investigador: teórico

<http://orcid.org/0000-0003-1686-7381>

✉ giovanna.ramirez@epfac.edu.co

Daniel Leandro Cárdenas-Sabogal

Ingeniero civil

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito
Colombia

Unidad de Proyectos

Rol de investigador: experimental

<http://orcid.org/0000-0001-8976-2789>

✉ daniel.cardenas-s@mail.escuelaing.edu.co

Miguel Ángel García-Molina

Ingeniero mecánico

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito
Colombia

Unidad de Proyectos

Rol de investigador: experimental

<http://orcid.org/0000-0002-6550-6390>

✉ miguel.garcia-mo@mail.escuelaing.edu.co

* Artículo de investigación derivado del proyecto “Desarrollo de una metodología para la gerencia de proyectos del sector aeroespacial en Colombia”, realizado por Giovanna Ramírez, Daniel Cárdenas y Miguel García, bajo la supervisión de Ricardo Benavides, con el fin de facilitar la articulación en los procesos de gerencia de proyectos del sector aeroespacial en Colombia, y así proporcionar una herramienta que permita estandarizar dichos procesos.

Para citar este artículo: Ramírez-Ruiz, G. E., Cárdenas-Sabogal, D. L., & García-Molina, M. Á. (2021). Desarrollo de una metodología para la gerencia de proyectos del sector aeroespacial en Colombia. *Ciencia y Poder Aéreo*, 16(1), 116-138. <https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaaereo.700>



Desarrollo de una metodología para la gerencia de proyectos del sector aeroespacial en Colombia

Resumen: Este artículo propone una metodología para la gerencia de proyectos del sector aeroespacial en Colombia, como herramienta de apoyo y complemento en los procesos de inicio, planeación, ejecución, monitoreo, control y cierre de los proyectos referentes al sector. Lo anterior, en vista de que actualmente cada una de las entidades realiza proyectos con procesos y actividades propios de cada entidad, lo que genera una débil articulación entre las organizaciones, las instancias y los actores del desarrollo de proyectos espaciales y, como consecuencia, se genera una baja competitividad por parte de estas organizaciones en Colombia. Dicha metodología contiene 36 procesos ajustados a las necesidades del sector, acompañados de procedimientos, diagramas de flujo y formatos a seguir durante la gerencia de proyectos. Para su desarrollo, se inició con la identificación, descripción y comparación de estándares internacionales, marcos de referencia y buenas prácticas en gerencia de proyectos, seguido de un análisis del sector aeroespacial en Colombia. Por último, la construcción de la metodología se hizo con los procesos ajustados de acuerdo con los antecedentes y su validación, en la cual, se obtuvieron resultados satisfactorios por parte de los expertos seleccionados para la validación del método.

Palabras clave: gerencia de proyectos; metodología; planeación; procesos; sector aeroespacial.

Development of a Project Management Methodology for the Colombian Aerospace Sector

Abstract: This article suggests a project management methodology for the Colombian aerospace sector that serves as a complementary support tool in the initiation, planning, execution, monitoring, control, and closure of initiatives. The foregoing, in view of the current trend by the organizations in this sector of developing individual and independent projects, a situation that generates a weak articulation between entities, instances, and actors for the development of space projects, and, as a result, low competitiveness for the national aerospace industry. The proposed methodology comprises 36 processes that were adjusted to the needs of the sector, along with a series of procedures, flow diagrams, and formats to be followed during project management. Its development involved the identification, description and comparison of international standards, reference frameworks, and good practices in project management, followed by an analysis of the Colombian aerospace sector. Finally, the construction of the methodology was performed using the adjusted processes, after analyzing their background and carrying out their validation, phase in which satisfactory results were reported by the experts in charge.

Keywords: Project management; methodology; planning; processes; aerospace sector.

Desenvolvimento de uma metodologia para a gerência de projetos do setor aeroespacial na Colômbia

Resumo: Este artigo propõe uma metodologia para a gerência de projetos do setor aeroespacial na Colômbia, como ferramenta de apoio e complemento nos processos de início, planejamento, execução, monitoramento, controle e encerramento dos projetos relativos ao setor. Tendo em conta que atualmente cada uma das entidades realiza projetos com processos e atividades próprias de cada entidade, o que gera uma fraca articulação entre as organizações, as instâncias e os atores no desenvolvimento de projetos espaciais e, conseqüentemente, é gerada a baixa competitividade destas organizações na Colômbia. Esta metodologia contém 36 processos adaptados às necessidades do setor, acompanhados de procedimentos, diagramas de fluxo e formatos a seguir durante a gerência de projetos. Para seu desenvolvimento, começou com a identificação, descrição e comparação de padrões internacionais, marcos de referência e boas práticas em gerência de projetos, seguido de uma análise do setor aeroespacial na Colômbia. Por último, a construção da metodologia foi feita com os processos ajustados de acordo com os antecedentes e a sua validação, na qual se obtiveram resultados satisfatórios por parte dos especialistas escolhidos para a validação do método.

Palavras-chave: gerenciamento de projetos; metodologia; planejamento; processos; setor aeroespacial.

En el ámbito internacional, el sector aeroespacial se compone de funciones de la industria aeronáutica y espacial. La industria aeronáutica se caracteriza por su desempeño en actividades pertinentes al diseño, elaboración, distribución y mantenimiento de aeronaves y equipos específicos asociados; mientras que la industria espacial comprende las mismas actividades, pero para el caso de naves espaciales, cohetes, satélites, lanzadoras y otros sistemas relacionados (Universidad Politécnica de Madrid, 2017).

Hoy en día, de manera global la industria aeroespacial simboliza una considerable evolución de las industrias en el mundo, e igualmente, consolida un crecimiento estimado entre el 6 y 7% cada año; y se estima que en los próximos 20 años esta cifra se duplicará, lo que representa una mayor oportunidad de acceder a proyectos de alta tecnología con la proyección de “un futuro asegurado y enorme” (Delgado-Gómez, 2018, p. 3).

Debido al crecimiento del sector y el incremento de proyectos en esta área, surge la necesidad de implementar metodologías para su gerenciamiento que mejoren la articulación de los procesos utilizados en la actualidad. En ese sentido, este documento tiene cuatro objetivos: (I) identificar, describir y comparar estándares, marcos de referencia y buenas prácticas en gerencia de proyectos; (II) analizar el sector aeroespacial en Colombia en el área de gerencia de proyectos; (III) diseñar una metodología para la gerencia de proyectos del sector aeroespacial de Colombia, y (IV) validar la metodología.

De modo que, el propósito de esta investigación es facilitar la articulación en los procesos de gerencia de los proyectos de este sector y, proporcionar una herramienta que permita estandarizarlos.

Justificación

El sector aeronáutico colombiano mantiene un crecimiento anual que se evidencia, entre otros componentes, en la estructura de entidades, clústeres, asociaciones y federaciones aeroespaciales constituidas ante

la exigencia de generar proyectos de la industria e internacionalmente potencializar su trascendencia. Se compone de 159 organizaciones que se esfuerzan conjuntamente en un compendio de cadena de valor, mediante cinco canales de servicio: ingeniería, fabricación, educación, suministros y mantenimiento (Granada *et al.*, 2017).

En la actualidad, las organizaciones del sector aeroespacial en Colombia realizan proyectos según procesos de gerencia internos de cada entidad, lo que limita la articulación en el lenguaje de comunicación y la sinergia entre las entidades. De acuerdo con la Corporación de la Industria Aeronáutica Colombiana (CIAC, 2020) y la Fuerza Aérea Colombiana (FAC), no se está utilizando una guía unificada o específica para la gerencia de proyectos aeroespaciales. Además, indica Gustavo Saavedra, coronel retirado de la FAC y participante activo en proyectos con la CIAC, que “se están presentando proyectos con diferentes parámetros de entrega” (Comunicación personal, Saavedra, 2019). Todo lo anterior, son causa de la débil articulación entre instancias y actores del sector para el desarrollo de proyectos espaciales, que conlleva a la baja productividad y competitividad de esta industria en el país (Consejo Nacional de Política Económica y Social [Conpes], 2020).

Por una parte, ya existe una alianza para la creación de proyectos entre la CIAC y la FAC, lo que ha generado que en las dos organizaciones se unan esfuerzos para obtener mejores resultados, “juntos se pusieron al nivel de los productores de bienes y servicios aeroespaciales y adquirieron certificaciones europeas y norteamericanas de la industria aeroespacial” (Comunicación personal, Saavedra, 2019). Esta es la oportunidad para aprovechar y centralizar los procesos de gerencia internos y promover mayores oportunidades en el sector.

Cuando se habla del sector aeroespacial internacional, se hace referencia a un sector pionero en diversas áreas que se ha establecido gracias a los logros obtenidos a través de la historia. Pese a ello, en Colombia este sector tiene una mínima participación, comparado con el mercado (Granada *et al.*, 2017). Para contribuir con el desarrollo de los procesos ya existentes, se ve la necesidad de implementar una metodología para uso específico de este sector enfocada en la

gerencia de proyectos, que permita establecer una articulación entre las organizaciones, las instancias y los actores del área aeroespacial.

Internacionalmente el mercado aeroespacial y de defensa asciende alrededor de los 674 billones de dólares. Cerca de la mitad del mercado estadounidense concierne al 51 % del valor mundial. Consecutivo a este país, se encuentran entre los cuatro mercados más importantes: Francia, Reino Unido, Alemania y Canadá, aunque en la escena mundial están creciendo países como China, Brasil, India, Singapur y México, que, armonizados, simbolizan el 7 % de la industria global en ventas (Granada *et al.*, 2017).

Según el Plan Estratégico de la Industria Colombiana (Peica), elaborado por actores de la Acopaer, en términos generales del ámbito nacional “la industria manufacturera aeroespacial es inmadura” (Comunicación personal, Saavedra, 2019), pese a que cuenta con las iniciativas de desarrollo industrial lideradas por la industria militar, principalmente por la FAC. Entonces bien, solo si existe una verdadera voluntad de alto gobierno, es probable que estas iniciativas se intensifiquen, teniendo un mercado aún por explorar: la aviación civil. Por otra parte, no hay suficiente información integrada sobre la industria colombiana disponible para las organizaciones gubernamentales, así como falta de datos cuantificados (Granada *et al.*, 2017).

Metodología de la investigación

Para la exposición de esta investigación, se planteó atribuir una metodología basada en la investigación aplicada no experimental, debido a que el estudio fue característico de procesos teóricos y prácticos (existentes) de la gerencia moderna de proyectos, a los procesos del sector aeroespacial en Colombia.

Por consiguiente, se efectuó una investigación exploratoria para recopilar información histórica y realizar el análisis de los procesos de gerencia internos, que permitiera caracterizar el sector aeroespacial en Colombia. Además, se llevó a cabo un diagnóstico literario con especial interés en los principales

estándares de gerencia de proyectos que pueden aplicarse a las entidades del sector aeroespacial nacional y, posteriormente, tenerlos en cuenta en el análisis de la metodología propuesta (Bello, 2017).

De acuerdo con la breve descripción realizada, la investigación está compuesta por cuatro fases.

Fase 1. Identificar, describir y comparar estándares, marcos de referencia y metodologías en gerencia de proyectos

Como se mencionó, esta fase busca identificar, analizar, describir y comparar los marcos de trabajo de los estándares internacionales en gerencia de proyectos, que se encuentran en las principales agencias espaciales del mundo para luego identificar los procesos comunes en cada uno de estos. El producto de esta comparación contribuye a los procesos de gerencia de la metodología propuesta.

Actividades de la fase 1:

- Identificar estándares existentes en gerencia de proyectos.
- Comparar los estándares existentes.
- Seleccionar los estándares aplicables al sector aeroespacial en Colombia.
- Incorporar los estándares seleccionados al marco de referencia.

Principales productos y resultados de la fase 1:

- Listado de estándares utilizados en la localización de las principales agencias del sector aeroespacial global.
- Listado de procesos en común de los estándares utilizados en la investigación.

Fase 2. Analizar el sector aeroespacial en Colombia, en el área de gerencia de proyectos

El objetivo de esta fase es recopilar toda la información alusiva al sector aeroespacial en Colombia, mediante una búsqueda sistémica que permita identificar

los antecedentes, características y procesos particulares que se vienen aplicando en el marco singular de la gerencia de proyectos.

Actividades de la fase 2:

- Seleccionar las bases de datos y motores de búsqueda.
- Realizar una exploración bibliográfica con énfasis en la industria aeroespacial colombiana.
- Recopilar la información relevante para el sector aeroespacial.
- Analizar artículos seleccionados.
- Identificar las principales entidades del sector aeroespacial en Colombia.
- Realizar entrevistas o encuestas a las principales entidades del sector, con el fin de recolectar información adicional y los requerimientos de la gerencia de los proyectos internos.
- Integrar y sintetizar las características del sector aeroespacial en Colombia en el área de gerencia de proyectos.

Principales productos y resultados de la fase 2:

- Análisis del sector aeroespacial en Colombia, en lo referente a la aplicación de prácticas en gerencia de proyectos.

Fase 3. Diseñar la metodología para la gerencia de proyectos del sector aeroespacial en Colombia

La finalidad de esta fase es integrar los resultados adquiridos en las fases 1 y 2, para obtener una metodología que se adapte a las entidades del sector nacional, cumpla con las oportunas experiencias en gerencia internacional de proyectos y, sirva de apoyo y complemento a los procesos internos de gerencia de cada organización.

Actividades de la fase 3:

- Integración de fases 1 y 2.

- Realización de una metodología para la gestión de proyectos en Colombia con referencia al sector aeroespacial.

Principales productos y resultados de la fase 3:

- Metodología para la gerencia de los proyectos aeroespaciales en Colombia.

Fase 4. Validar la metodología

Esta etapa se desarrolla con el objetivo de validar la metodología generada en la fase 3.

Actividades de la fase 4:

- Presentar la metodología a las principales entidades del sector.
- Recepción de comentarios y sugerencias por parte de los expertos de las entidades a través de encuestas, correo y reuniones virtuales.
- Incorporación de cambios a la metodología.

Principales productos y resultados de la fase 4:

- Metodología validada.

Trabajo futuro

La metodología aplicada se puede complementar con la inclusión de aquellos procesos de gerencia que fueron excluidos en este estudio, como por ejemplo, recopilar requisitos o validar el alcance.

La metodología usada en esta investigación se puede complementar con técnicas y herramientas vigentes, nacionales e internacionales en gerencia integral de proyectos. A su vez, entradas y salidas de los procesos se pueden desarrollar como complemento a este trabajo.

Así mismo, es posible indagar a mayor profundidad en las actividades específicas que desarrollan las entidades en la gerencia de los proyectos y, enlazar cada una de estas a los procesos propuestos en la metodología.

Resultados

Estándares internacionales en gerencia de proyectos

Para establecer los estándares aplicados como referencia al desarrollo de esta metodología, en primera instancia se realizó una investigación acerca de las principales agencias aeroespaciales internacionales; luego, se tuvo en cuenta la ubicación geográfica de cada una de ellas y, por último, se relacionaron a los estándares de gerencia de proyectos implementados en esa región. Los resultados se ilustran en la tabla 1. No obstante, esto no implica que las principales agencias espaciales hagan uso exclusivo de los marcos de trabajo de la región.

Como se observa en la tabla anterior, los estándares usados en las zonas geográficas en donde están ubicadas las principales agencias aeroespaciales son PMBOK, APMBOK, ICB, ISO 21500:2012 y P2M. Por tal motivo, se tuvieron en cuenta estos términos de referencia para la exposición de la metodología.

Más adelante, se realizó una comparación entre los procesos que se manejan en cada uno de los estándares, y como resultado de la comparación, resultaron 25 procesos que están presentes en todos los estándares tomados como referencia, detallado en la tabla 2.

Tabla 2
Procesos en común de los estándares internacionales

Procesos	
Gestión integración	Dirigir y gestionar el trabajo del proyecto
	Gestionar el conocimiento del proyecto
	Realizar el control integrado de cambios
Gestión alcance	Definir el alcance
	Crear la EDT/WBS
	Controlar el alcance
Gestión cronograma	Desarrollar el cronograma
	Controlar el cronograma
Gestión costos	Estimar los costos
	Controlar los costos
Gestión de la calidad	Planificar la gestión de la calidad
	Gestionar la calidad
Gestión de los recursos	Planificar la gestión de recursos
	Estimar los recursos de las actividades
	Dirigir al equipo
	Controlar los recursos
Gestión de las comunicaciones	Planificar la gestión de las comunicaciones
	Gestionar las comunicaciones
	Monitorear las comunicaciones
Gestión de los riesgos	Identificar los riesgos
	Implementar la respuesta a los riesgos
	Monitorear los riesgos
Gestión de las adquisiciones	Planificar la gestión de las adquisiciones
	Controlar las adquisiciones
Gestión de los interesados	Gestionar la participación de los interesados

Fuente: elaboración propia.

Tabla 1
Agencias espaciales y marco de trabajo en proyectos

	Agencias espaciales más grandes del mundo						
	National Aeronautics and Space Administration	European Space Agency	Canadian Space Agency	China National Space Administration	Russian Federal Space Agency	Centre National d'Études Spatiales	Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial
	NASA	ESA	ASC	CNSA	Roscosmos	CNES	JAXA
País	EE. UU.	Europa	Canadá	China	Rusia	Francia	Japón
Año	1958	1962	1989	1993	1992	1961	2003
Estándar internacional para proyectos	PMI	APM	PMI	IPMA	ISO	APM	PMAJ
Marco de referencia	PMBOK	APMBOK	PMBOK	PEB	ISO 21500:2012	APMBOK	P2M

Fuente: Cardoza y Guerrero (2011) e International Project Management Association (IPMA, 2016).

Descripción de estándares

En la tabla 3, se realiza una descripción de los estándares seleccionados, junto con el respectivo marco de referencia y su definición de proyectos y gerencia de proyectos.

Tabla 3
Descripción de estándares

ID	Estándar	Descripción	Marco de referencia	Definición gerencia de proyectos	Definición proyectos
1	 <p>IPMA</p>	<p>IPMA fue la primera asociación de administración de proyectos en el mundo. Fue fundada en 1965, en Viena, Austria, con el objetivo de crear redes de cooperación y trabajo para compartir información acerca de la gestión de proyectos para luego ser registrada en Zúrich, Suiza, y en Nijkerk, Holanda; es una asociación a nivel mundial que cuenta hoy en día con más de 50 asociaciones nacionales de gestión de proyectos, con más de 40 mil miembros en todos los continentes, en su mayoría localizados en Europa. IPMA se basa en la identificación de las competencias necesarias para la dirección de proyectos.</p>	<p>IPMA Competence Baseline (ICB3)</p>	<p>Es la planificación, organización, seguimiento y control de todos los aspectos de un proyecto.</p>	<p>Es una operación de tiempo y costo limitados para realizar un conjunto de entregables definidos (el alcance para cumplir con los objetivos del proyecto) hasta llegar a los estándares de calidad requeridos.</p>
2	 <p>PMI</p>	<p>El Instituto de Gerencia de Proyectos (Project Management Institute, PMI) es la organización de gerencia de proyectos más grande del mundo, con alrededor de 280 países asociados y cuya sede principal se encuentra en Estados Unidos; tiene como objetivos promover la profesión de dirección de proyectos, generar conocimiento constante a través de la investigación y generar estándares creados por la experiencia de sus asociados sobre la gerencia de proyectos (PMI, 2016).</p>	<p>Project Management Body of Knowledge (PMBok)</p>	<p>Aplicación de conocimientos, habilidades, herramientas y técnicas de actividades del proyecto para cumplir con los requisitos de este.</p>	<p>Esfuerzo temporal que se lleva a cabo para crear un producto, servicio o resultado único.</p>
3	 <p>PMAJ</p>	<p>La Asociación de Gerencia de Proyectos del Japón (Project Management Association of Japan, PMAJ) es una asociación que se originó en noviembre del 2005 gracias a la unión de dos organizaciones, el Project Management Professionals Certification Center (PMCC) y el Japan Project Management Forum (JPMF), las cuales buscaban mayor promoción de la gerencia de proyectos en el país, satisfacer las necesidades de educación y formación a los profesionales en gerencia de proyectos y llevar a cabo una gran cantidad actividades de alta calidad donde se pudiera crear una red personal y un amplio conocimiento dentro y fuera de Japón.</p>	<p>Project and Program Management for Enterprise Innovation (P2M)</p>	<p>La guía P2M se enfoca en la organización y el programa, amplía el alcance de los programas de gestión de proyectos con la obtención de beneficios para una organización, así mismo sensibiliza la afectación que pueden tener los proyectos por procesos inesperados centrados en la sociedad y el medio ambiente. El profesional debe tener conocimiento de múltiples disciplinas.</p>	<p>Definen los proyectos como un emprendimiento de creación de valor basado en una misión de proyecto que es completado en un marco de tiempo dado u acordado y bajo restricciones, incluidos los recursos y circunstancias externas.</p>
4	 <p>APM</p>	<p>La Asociación para la Gerencia de Proyectos (Association for Project Management, APM) es una asociación que cuenta con más de 21.650 profesionales y más de 570 miembros corporativos, siendo la más grande de Europa en gerencia de proyectos; la misión de la asociación es proveer liderazgo a las organizaciones e individuos que estén dispuestos a compartir su pasión por la mejora de los resultados de los proyectos.</p>	<p>APM Body of Knowledge (Cuerpo de conocimiento de la APM)</p>	<p>La gestión de proyectos es el proceso mediante el cual los proyectos se definen, planifican, supervisan, controlan y entregan de modo que los beneficios acordados se realicen.</p>	<p>Un esfuerzo único y transitorio emprendido para lograr un resultado.</p>
5	 <p>ISO 21500</p>	<p>La organización Internacional de Normalización (International Organization for Standardization, ISO) es una organización no gubernamental internacional e independiente, que comenzó en febrero de 1947 gracias a algunos delegados de países que se reunieron en Londres con el objetivo de facilitar la coordinación internacional y la unificación de las normas industriales; en la actualidad, la ISO tiene su centro de operaciones en Ginebra, Suiza, y posee más de 162 países miembros. La ISO a través de sus miembros y sus expertos, busca compartir conocimiento y desarrollar estrategias basadas en consenso, con normas internacionales que soporten la innovación y provean soluciones a los desafíos globales.</p>	<p>ISO 21500:2012 "Orientación sobre gerencia de proyectos"</p>	<p>La gestión de proyectos es la aplicación de métodos, herramientas, técnicas y competencias para un proyecto.</p>	<p>Un proyecto consiste en un conjunto único de procesos y actividades coordinadas y controladas con fechas de inicio y finalización, realizadas para alcanzar los objetivos del proyecto.</p>

Fuente: Murray-Webster y Dalcher (2019), IPMA (2016), ISO (2012), Apmbok (2019) y P2M (2016).

Análisis del sector aeroespacial en Colombia en el área de gerencia de proyectos

En la caracterización de la división aeroespacial colombiana se describe la evolución, estructura, procesos, entidades y regulación concerniente al sector

aeroespacial en el país. Además, se conocieron las principales empresas dedicadas a esta actividad económica y se identificaron las prácticas relacionadas con la gestión de proyectos aplicados en este sector.

Las organizaciones aeroespaciales en Colombia se distribuyen en diferentes categorías, según su

actividad en el sector: transporte aéreo; aviación especializada; educación; estructuras; hidráulicos y motores; talleres aeronáuticos de reparación (TAR-OMA); suministros; fabricación; ciencia y tecnología; proveedores y aliados, y aviónica, como se muestra en la siguiente ilustración:

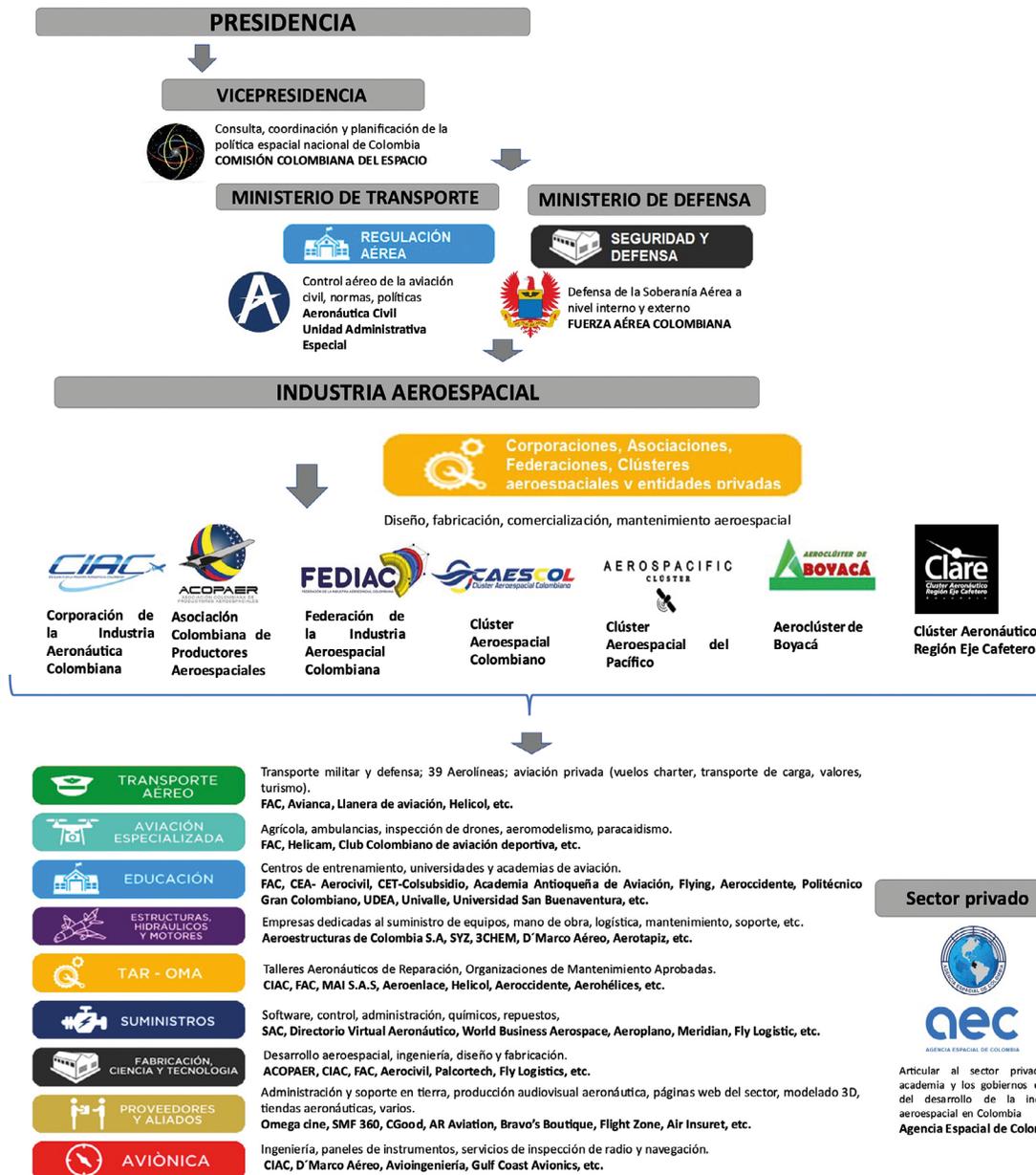


Figura 1. Estructura y empresas del sector aeroespacial en Colombia
 Fuente: Gestión pública (2020).

Con el objetivo de seleccionar las organizaciones con mayor influencia en el sector aeroespacial colombiano, se tomó como referencia los ingresos reportados en el estado de resultados de cada entidad y se compararon las empresas del sector mediante un diagrama de Pareto.

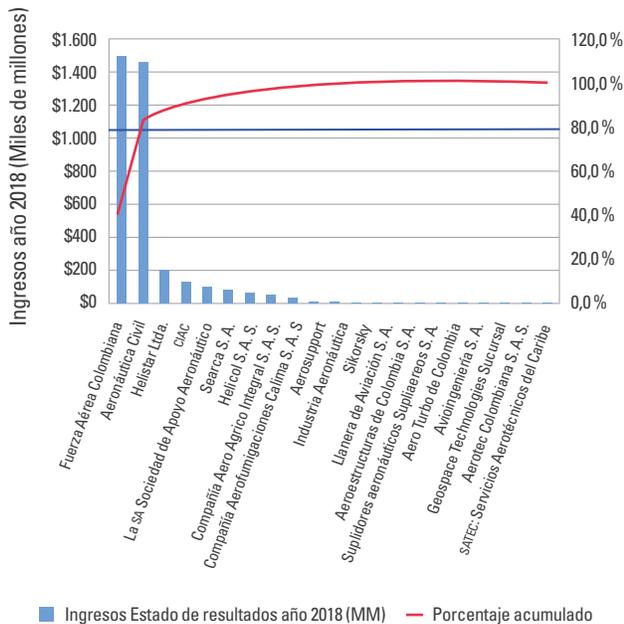


Figura 2. Pareto del sector aeroespacial en Colombia
Fuente: Supersociedades (2020).

Al realizar la comparación de los ingresos obtenidos por las organizaciones más representativas del sector aeroespacial en Colombia, se tomó una muestra de 20 empresas nacionales enfocadas en la industria. A este respecto, la gráfica de Pareto indica que, de los ingresos en sus estados de resultados, la FAC y la Aeronáutica Civil (Aerocivil), representan un 83,5% del total, así mismo, este porcentaje representa el 10% de las entidades tomadas como muestra, lo que indica que la FAC y la Aerocivil son las dos organizaciones más influyentes (FAC, 2018).

De igual modo, se identificó que la importancia de la Aerocivil y la FAC en el sector aeroespacial radica en que dichas entidades son la Autoridad de Aviación Civil y la Autoridad de Aviación Militar en Colombia, por lo cual, son referentes para las políticas e instancias que rigen al sector en el país (Granada *et al.*, 2017).

Lo anterior, está alineado con el resultado encontrado en el análisis de Pareto visto en la figura 2.

En ese marco, se indagó en los procesos de gestión implementados en los proyectos de cada una de las entidades (Aerocivil, 2019).

Gerencia de proyectos del sector aeroespacial en Colombia

Para identificar la gerencia de proyectos del sector en las entidades seleccionadas, se realizaron entrevistas y visitas a la Dirección de Ciencia, Tecnología e Innovación (Dicti) de la FAC y a la Unidad de I+D+i de la Aerocivil, encargadas de los proyectos.

En el ejercicio de recopilación de información, se obtuvieron datos específicos sobre los procesos, actividades, plantillas, formatos, instructivos y flujos de procesos implantados en la gerencia de proyectos de cada organización.

Procesos de gerencia Aerocivil

A continuación se relacionan los procesos de gerencia que se utilizan actualmente en los proyectos de la Aerocivil y, la verificación de si existe algún procedimiento o formato específico para esta función.

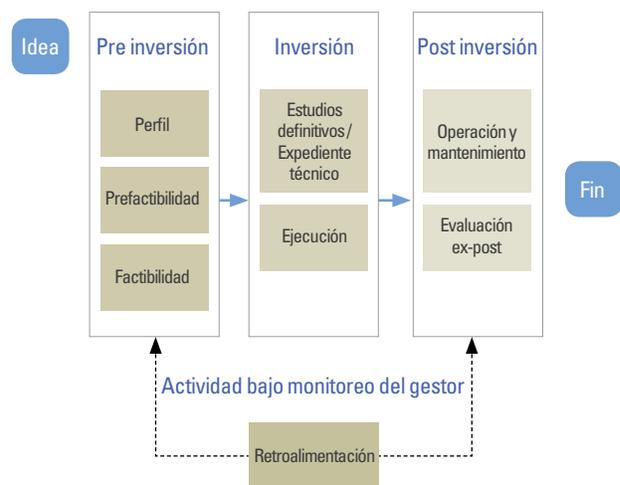


Figura 3. Procesos de gerencia Aerocivil
Fuente: Aerocivil (2021).

Tabla 4
Procesos de gerencia en proyectos de la Aerocivil

Procesos		¿Se realiza este proceso?	¿Tiene un formato específico?	¿Se tiene un procedimiento de instrucciones para este proceso?
Gestión Integración	Dirigir y gestionar el trabajo del proyecto	Sí	No	No
	Gestionar el conocimiento del proyecto	Sí	No	No
	Realizar el control integrado de cambios	No	No	No
Gestión Alcance	Definir el alcance	Sí	Sí	Sí
	Crear la EDT/WBS	No	No	No
	Controlar el alcance	No	No	No
Gestión del Cronograma	Desarrollar el cronograma	Sí	No	No
	Controlar el cronograma	Sí	No	No
Gestión de Costos	Estimar los costos	Sí	Sí	Sí
	Controlar los costos	Sí	No	No
Gestión de la Calidad	Planificar la gestión de la calidad	Sí	Sí	Sí
	Gestionar la calidad	Sí	Sí	Sí
	Planificar la gestión de recursos	Sí	Sí	Sí
Gestión de los Recursos	Estimar los recursos de las actividades	Sí	Sí	Sí
	Dirigir al equipo	Sí	No	No
	Controlar los recursos	Sí	Sí	Sí
Gestión de las Comunicaciones	Planificar la gestión de las comunicaciones	Sí	No	No
	Gestionar las comunicaciones	Sí	No	No
	Monitorear las comunicaciones	No	No	No
Gestión de los Riesgos	Identificar los riesgos	Sí	Sí	Sí
	Implementar la respuesta a los riesgos	Sí	Sí	Sí
	Monitorear los riesgos	Sí	Sí	Sí
Gestión de las Adquisiciones	Planificar la gestión de las adquisiciones	Sí	Sí	Sí
	Controlar las adquisiciones	Sí	Sí	Sí
Gestión de los Interesados	Gestionar la participación de los interesados	No	No	No

Fuente: Aerocivil (2020).

Procesos de gerencia FAC

A continuación, se relacionan los procesos de gerencia utilizados en los proyectos de la FAC y, la verificación de si existe algún procedimiento o formato específico para esta función (FAC, 2020).

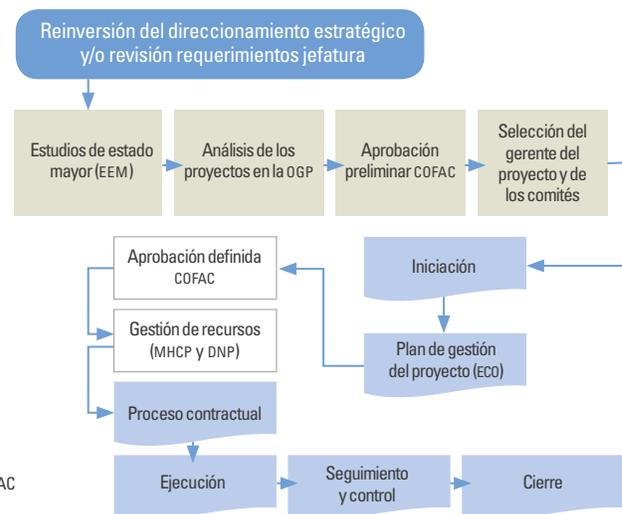


Figura 4. Flujo de procesos de gerencia FAC
Fuente: (FAC, 2021).

Tabla 5
Procesos de gerencia en proyectos de la FAC

Procesos		¿Se realiza este proceso?	¿Tiene un formato específico?	¿Se tiene un procedimiento de instrucciones para este proceso?
Gestión Integración	Dirigir y gestionar el trabajo del proyecto	Sí	Sí	Sí
	Gestionar el conocimiento del proyecto	Sí	Sí	Sí
	Realizar el control integrado de cambios	Sí	Sí	Sí
Gestión Alcance	Definir el alcance	No	No	No
	Crear la EDT/WBS	Sí	Sí	Sí
	Controlar el alcance	No	No	No
Gestión del Cronograma	Desarrollar el cronograma	Sí	Sí	Sí
	Controlar el cronograma	Sí	Sí	Sí
Gestión de Costos	Estimar los costos	Sí	Sí	Sí
	Controlar los costos	Sí	Sí	Sí
Gestión de la Calidad	Planificar la gestión de la calidad	No	No	No
	Gestionar la calidad	No	No	No
Gestión de los Recursos	Planificar la gestión de recursos	Sí	Sí	Sí
	Estimar los recursos de las actividades	Sí	Sí	Sí
	Dirigir al equipo	Sí	Sí	Sí
	Controlar los recursos	Sí	Sí	Sí
Gestión de las Comunicaciones	Planificar la gestión de las comunicaciones	Sí	Sí	Sí
	Gestionar las comunicaciones	Sí	Sí	Sí
	Monitorear las comunicaciones	No	No	No
Gestión de los Riesgos	Identificar los riesgos	Sí	Sí	Sí
	Implementar la respuesta a los riesgos	No	No	No
	Monitorear los riesgos	No	No	No
Gestión de las Adquisiciones	Planificar la gestión de las adquisiciones	Sí	Sí	Sí
	Controlar las adquisiciones	Sí	Sí	Sí
Gestión de los Interesados	Gestionar la participación de los interesados	Sí	Sí	Sí

Fuente: (FAC, 2020).

Durante la encuesta realizada a las entidades del sector, se evidenció que hay procesos que se están ejecutando, pero no se encuentran dentro de los procesos filtrados. Estos 11 procesos se incluyen en el desarrollo de esta metodología para complementar y fortalecer la estructura de los procesos de gerencia.

Teniendo en cuenta los procesos que se realizan en cada entidad, se evidenció que la FAC no lleva a cabo los procesos de definición y control del alcance; planificación y gestión de la calidad; ejecución de la respuesta a los riesgos y su monitoreo, y el control de las comunicaciones. Por otro lado, la Aerocivil no lleva

Tabla 6
Procesos de gerencia adicionales utilizados por los principales entes del sector

Área de Conocimiento	Proceso	Área de Conocimiento	Proceso
Gestión de la integración	Desarrollar acta de constitución del proyecto	Gestión de la calidad	Controlar la calidad
Gestión de la integración	Desarrollar el plan para la dirección del proyecto	Gestión de los riesgos	Realizar análisis cualitativo de riesgos
Gestión de la integración	Monitorear y controlar el trabajo del proyecto	Gestión de los interesados	Identificar a los interesados
Gestión de la integración	Cerrar el proyecto o fase	Gestión de la integración	Aprobar definitivamente la planeación
Gestión del cronograma	Estimar duración de las actividades	Gestión del costos	Determinar el presupuesto
		Gestión del cronograma	Definir y secuenciar las actividades

Fuente: Aerocivil (2019).

a cabo los procesos de realizar el control integrado de cambios; crear la EDT; manejar el alcance; gestionar la intervención de los interesados y el monitoreo de las comunicaciones (Monsalve, 2019).

Dentro las organizaciones existen responsables para cada proceso de gerencia. De modo tal que se identificó el área responsable y el cargo que desarrolla dentro de la Aerocivil y la FAC cada funcionario.

Tabla 7
Responsables de los procesos de gerencia dentro de los entes del sector aeroespacial

		Área responsable o cargo que desarrolla este proceso	
Procesos		Aeronáutica civil	Fuerza Aérea Colombiana
Gestión integrada	Desarrollar el acta de constitución del proyecto	Grupo de investigación académica	Subdirección de investigación e innovación o administrador de recursos
	Desarrollar el plan para la dirección del proyecto		Investigador principal
	Aprobar definitivamente la planeación	Grupo de investigación académica	Jefe de centro de I+D+i
	Dirigir y gestionar el trabajo del proyecto	Investigador principal	Investigador principal
	Gestionar el conocimiento del proyecto	Investigador principal	Jefe de centro de I+D+i
	Monitorear y controlar el trabajo del proyecto	Grupo de investigación académica	Subdirección de investigación e innovación o jefes de centro de I+D+i
	Realizar el control integrado de cambios		Subdirección de investigación e innovación
	Cerrar el proyecto o fase	Grupo de investigación académica	Investigador principal
Gestión alcance	Definir el alcance	Investigador principal	Investigador principal
	Crear la EDT/WBS		Investigador principal
	Controlar el alcance		Subdirección de investigación e innovación o jefes de centro de I+D+i
Gestión del cronograma	Estimar la duración de las actividades	Investigador principal	Investigador principal
	Definir y secuenciar las actividades	Investigador principal	Investigador principal
	Desarrollar el cronograma	Investigador principal	Investigador principal
	Controlar el cronograma	Grupo de investigación académica	Investigador principal
Gestión de costos	Estimar los costos	Investigador principal	Investigador principal
	Determinar el presupuesto	Investigador principal	Investigador principal
	Controlar los costos	Grupo de investigación académica	Subdirección de investigación e innovación o jefes de centro de I+D+i
Gestión de la calidad	Planificar la gestión de la calidad	Grupo de autoevaluación y calidad académica	Jefes de centros de I+D+i
	Gestionar la calidad	Grupo de autoevaluación y calidad académica	Jefes de centros de I+D+i
	Controlar la calidad	Grupo de autoevaluación y calidad académica	Jefes de centros de I+D+i
Gestión de los recursos	Planificar la gestión de los recursos	Investigador principal	Investigador principal
	Estimar los recursos de las actividades	Investigador principal	Investigador principal
	Dirigir al Equipo	Investigador principal	Investigador principal
	Controlar los recursos	Grupo de investigación académica	Investigador principal
Gestión de las comunicaciones	Planificar la gestión de las comunicaciones	Grupo de investigación académica	Investigador principal
	Gestionar las comunicaciones	Grupo de investigación académica	Investigador principal
	Monitorear las comunicaciones		
Gestión de los riesgos	Identificar los riesgos	Investigador principal	Investigador principal
	Realizar el análisis cualitativo de riesgos	Investigador principal	Investigador principal
	Implementar la respuesta a los riesgos	Investigador principal	
	Monitorear los riesgos	Investigador principal	
Gestión de las adquisiciones	Planificar la gestión de las adquisiciones	Investigador principal	Investigador principal
	Controlar las adquisiciones	Investigador principal	Director de investigación
Gestión de los interesados	Identificar a los interesados		Jefe de centro de I+D+i
	Gestionar la participación de los interesados		Jefe de centro de I+D+i

Fuente: Aerocivil (2020).

Así, se identificaron 36 procesos para la gerencia de proyectos del sector aeroespacial en Colombia. Cada uno de estos, con su respectivo procedimiento y formato.

Tabla 8
Procesos de gerencia identificados

Procesos	
Gestión integración	Desarrollar el acta de constitución del proyecto
	Desarrollar el plan para la dirección del proyecto
	Aprobar definitivamente la planeación
	Dirigir y gestionar el trabajo del proyecto
	Gestionar el conocimiento del proyecto
	Monitorear y controlar el trabajo del proyecto
	Realizar el control integrado de cambios
	Cerrar el proyecto o fase
Gestión alcance	Definir el alcance
	Crear la EDT/WBS
	Controlar el alcance
Gestión del cronograma	Estimar la duración de las actividades
	Definir y secuenciar las actividades
	Desarrollar el cronograma
	Controlar el cronograma
Gestión de costos	Estimar los costos
	Determinar el presupuesto
	Controlar los costos
Gestión de la calidad	Planificar la gestión de la calidad
	Gestionar la calidad
	Controlar la calidad
Gestión de los recursos	Planificar la gestión de los recursos
	Estimar los recursos de las actividades
	Dirigir al equipo
	Controlar los recursos
Gestión de las comunicaciones	Planificar la gestión de las comunicaciones
	Gestionar las comunicaciones
	Monitorear las comunicaciones
Gestión de los riesgos	Identificar los riesgos
	Realizar el análisis cualitativo de riesgos
	Implementar la respuesta a los riesgos
	Monitorear los riesgos
Gestión de las adquisiciones	Planificar la gestión de las adquisiciones
	Controlar las adquisiciones
Gestión de los interesados	Identificar a los interesados
	Gestionar la participación de los interesados

Fuente: elaboración propia.

Desarrollo de la metodología

La metodología comprende seis diagramas, uno por cada agrupación de procesos (iniciación, planeación, ejecución, seguimiento y finalización); y uno general, en el que se relacionan estos grupos de procesos. A su vez, la metodología contiene 36 procedimientos, uno por cada proceso resultado de la sección dos y tres de este documento. También incluye un formato por cada procedimiento en el que se relaciona lo descrito para facilitar la ejecución de del proceso.

Codificación de diagramas de flujo, procesos y formatos

La metodología maneja una codificación para los diagramas de flujo, procesos y formatos. A continuación, se presenta el respectivo método de identificación. A cada uno de los grupos de procesos se le asignó un código de identificación y un color (usado en los bordes de los procedimientos y formatos).

Tabla 9
Codificación procesos

Código de identificación	Descripción	Color
PI	Inicio	Rojo
PP	Planeación	Amarillo
PE	Ejecución	Verde
PM	Monitoreo y control	Azul
PC	Cierre	Morado

Fuente: elaboración propia.

A cada grupo del proceso se le asignó un consecutivo de dos dígitos:

PI03

Etapa de iniciación Consecutivo de dos dígitos

Figura 5. Ejemplo codificación procesos

Fuente: elaboración propia.

Para la correcta interrelación entre procesos se elaboraron seis diagramas de flujo. El primero es general y agrupa los procesos de inicio, planeación, ejecución, monitoreo y cierre. Los otros cinco diagramas son específicos para cada grupo. La identificación de estos se referencia en la tabla 10.

Tabla 10
Codificación diagramas de flujo

Código de identificación	Descripción
DFI	Diagrama de flujo inicio
DFP	Diagrama de flujo planeación
DFE	Diagrama de flujo ejecución
DFM	Diagrama de flujo monitoreo/control
DFC	Diagrama de flujo cierre
DFG	Diagrama de flujo general

Fuente: elaboración propia.

Para los 36 procesos de la metodología, se incluyó un formato que relaciona la información comprendida en los procedimientos y facilita la organización y registro de la información generada. La identificación de estos, se muestra en la tabla 11. Luego del código de identificación, el formato llevará el mismo consecutivo del procedimiento al cual pertenece. Para cada uno de los procesos, se inicia con la identificación del grupo, seguido de un consecutivo.

Tabla 11
Codificación formatos

Código de identificación	Descripción
FI	Formato de inicio
FP	Formato de planeación
FE	Formato de ejecución
FM	Formato de monitoreo/control
FC	Formato de cierre

Fuente: elaboración propia.

Diagramas de flujo

Los diagramas representan la secuencia del trabajo para la gerencia de proyectos en el sector. En este caso se evidencia la manera como se conectan los procesos

entre sí. Ya que en muchos de estos, es necesario tener la información obtenida como resultado de otro proceso. Por ello, se recomienda que antes de realizar cualquier procedimiento se siga el orden lógico para garantizar que en ese punto del proyecto se cuente con la información necesaria para ejecutar dicho proceso. Cada uno de los símbolos usados en los diagramas de flujo se menciona a continuación:



Figura 6. Simbología de los diagramas de flujo

Fuente: elaboración propia.

Se recomienda hacer uso del formato de manera simultánea, de acuerdo con el consecutivo de los grupos de procesos, debido a que cada procedimiento se encuentra articulado con un formato. En el caso de que los procedimientos no requieran de registro, en la columna de “ID Formato” y “Nombre formato” se registra como “No Aplica – NA”.

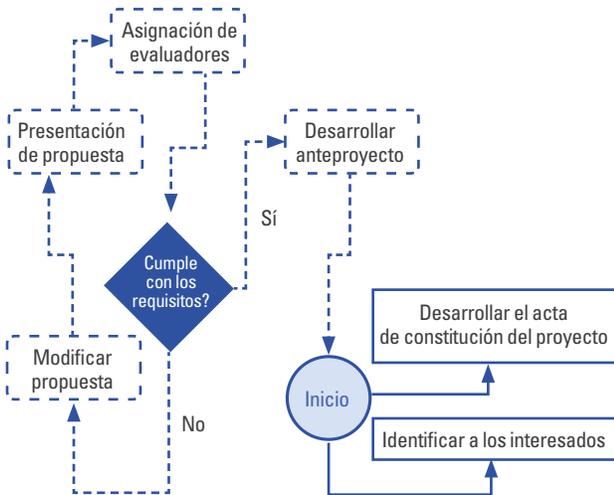


Figura 7. Ejemplo de diagrama de flujo del grupo de procesos de inicio
Fuente: elaboración propia.

Procedimientos y formatos

Los procedimientos y formatos son herramientas de la metodología con las que se pueden desarrollar proyectos de las organizaciones aeroespaciales. Los procedimientos cuentan con un número de identificación, la descripción del procedimiento, el responsable y el respectivo nombre del formato como se detalla:

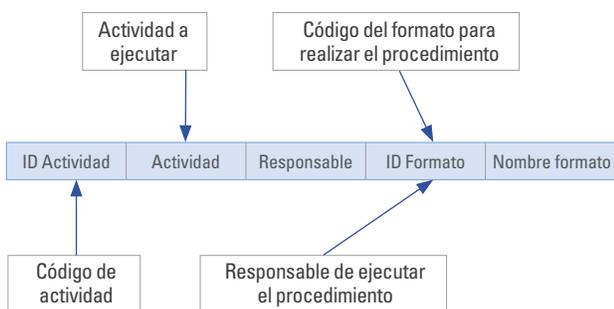


Figura 8. Detalle del formato de los procedimientos
Fuente: elaboración propia.

Los procedimientos de cada proceso indican el marco de trabajo a seguir para completar su respectivo formato. Cada uno de los procesos seleccionados para la metodología tiene su debido procedimiento, una sinergia de los procedimientos propios del sector aeroespacial y la metodología desarrollada (Suárez, 2020).

Tabla 12
Ejemplo del procedimiento del proceso “Desarrollar el acta de constitución del proyecto”. Grupo de procesos de inicio

PI01. Desarrollar el acta de constitución del proyecto				
ID Actividad	Actividad	Responsable	ID Formato	Nombre formato
PI01-1	Asigne al director del proyecto, así como su responsabilidad y autoridad	Dirección de proyectos	FI01	Acta de constitución del proyecto
PI01-2	Realice una descripción del proyecto (problema / oportunidad, justificación, propósito, metas / objetivos, entregables esperados, código del proyecto)			
PI01-3	Defina cuáles son los criterios de éxito del proyecto			
PI01-4	Realice una descripción de los hitos clave del proyecto			
PI01-5	Conozca las restricciones tiempo, presupuesto y recursos			
PI01-6	Conozca los requisitos de alcance y calidad			
PI01-7	Identifique supuestos y riesgos			
PI01-8	Describa cuáles son los beneficios del proyecto			
PI01-9	Describa cuáles son las personas interesadas que puedan ser afectadas de manera positiva o negativa por el proyecto			
PI01-10	Busque la autorización del patrocinador para la aceptación del acta de constitución del proyecto			

Fuente: elaboración propia.

Los procedimientos contienen diferentes formatos, cada uno, ajustado al respectivo proceso. Los formatos tienen cinco secciones:

- Nombre y código del proceso: sección en la que se especifica el código del proceso, formato y nombre del proceso. Varía de acuerdo con su grupo de procesos.
- Encabezado: contiene datos de entrada como la titulación del proyecto, director del proyecto y fecha en la cual se está utilizando el formato.

- Cuerpo del formato: es el contenido del formato e información propia de cada proceso.
- Pie de página: son datos informativos como código, nombre y versión del formato (Universidad Politécnica, 2017).
- Color del grupo de proceso: distintivo visual de los grupos de procesos de la metodología.

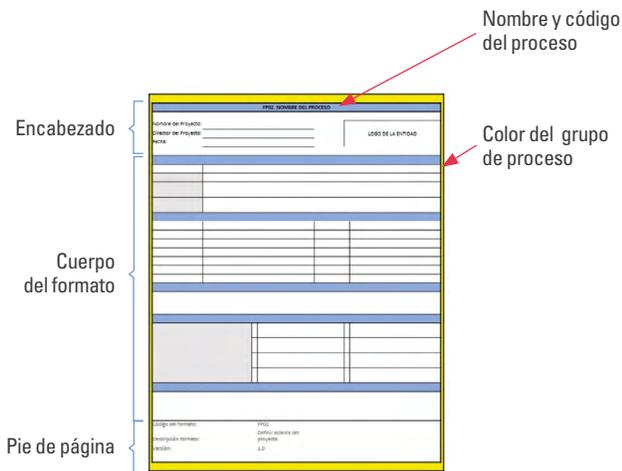


Figura 9. Distribución formatos
Fuente: elaboración propia.

Validación de la metodología

El proceso de validación de esta metodología se desarrolló con el juicio de expertos. En este caso, se tomó en cuenta el análisis y el criterio de diez expertos seleccionados del sector aeroespacial en Colombia y, del área de gerencia de proyectos en el ámbito nacional e internacional (véase apéndices, al final del documento).

A cada experto se le entregó la metodología y una encuesta, estas fueron leídas y analizadas durante 20 días, posteriormente, cada experto diligenció la encuesta según su criterio, la cual contiene la evaluación de la metodología y, por último, entregaron la encuesta diligenciada. Las observaciones y sugerencias recibidas fueron de apoyo para el proceso de acciones, apreciaciones, ajustes y observaciones del avance de la metodología (véase apéndices, al final del documento).

FI01. ACTA DE CONSTITUCIÓN DEL PROYECTO			
Nombre del Proyecto:			LOGO DE LA ENTIDAD
Director del Proyecto:			
Fecha:			
DIRECTOR DEL PROYECTO			
Asigne el director o la directora de proyecto, quien se le otorga la autoridad necesaria para organizar la ejecución del proyecto, asignar los recursos internos que requiera, contratar los recursos externos.	NOMBRE DEL DIRECTOR		
	FIRMA		
DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO			
Patrocinador del proyecto			
Unidad Organizacional	Ej: DICTI- Dirección de Ciencia Tecnología e Innovación de la Fuerza Aérea Colombiana		
Programa Estratégico	Programas y líneas de investigación de la entidad aeroespacial. Ej: consulte La Directiva Permanente No. 28 MD-CGFM-FAC-COFAC-JEMFA-JEA-28.1		
Problema/Oportunidad			
Justificación			
Propósito del proyecto			
Metas / Objetivos			
Entregables esperados	Consultar la tipología de productos de la entidad. Ej: Tipos de productos: Nuevo Conocimiento, Productos Resultados de Actividades de Desarrollo Tecnológico e Innovación, Productos de Apropiación Social del Conocimiento, Productos de Formación de Recursos Humanos.		
Código del proyecto			
CRITERIOS DE ÉXITO			
Criterios de éxito	Describa los criterio de éxito del proyecto		
HITOS CLAVE DEL PROYECTO			
Hitos clave	DESCRIPCIÓN	FECHA	
	Ej: Contratos firmados		
REQUISITOS DE ALCANCE			
Dentro del alcance del proyecto			
Fuera del alcance del proyecto			
RESTRICCIONES DE TIEMPO			
Fecha de radicación			
Fecha límite de inicio			
Fecha límite de finalización			
RESTRICCIONES EN RECURSOS			
RESTRICCIONES EN RECURSOS			
Recursos de apoyo			
RESTRICCIONES DE PRESUPUESTO			
Presupuesto aprobado	Especie	Efectivo	
Centro de costos			
REQUISITOS DE CALIDAD			
Criterios de aceptación de calidad			
RIESGOS Y SUPUESTOS			
Riesgos del proyecto			
Supuestos			
TIPOS DE BENEFICIOS DEL PROYECTO			
Beneficios	Ej: Ahorro de costos específicos		
INTERESADOS DEL PROYECTO			
Patrocinador del proyecto			
Otros interesados			
Fecha de aprobación	Nombres	Firmas	DNI
	Patrocinador		
Lugar de aprobación	Director del proyecto		
Código del formato:	FI01		
Descripción formato:	Acta de con constitución del proyecto		
Versión:	1.0		

Figura 10. Ejemplo del formato del procedimiento “Desarrollar el acta de constitución del proyecto. Grupo de procesos de inicio”
Fuente: elaboración propia.

TRABAJO DE GRADO: DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA LA GERENCIA DE PROYECTOS DEL SECTOR AEROSPAZIAL EN COLOMBIA

La siguiente es una encuesta de validación para la tesis titulada "Desarrollo de una metodología para la gerencia de proyectos del sector aeroespacial en Colombia". Usted ha sido seleccionado como un experto para realizar dicha validación. De antemano agradecemos el apoyo brindado y solicitamos que se diligencien las siguientes preguntas:

PROCEDIMIENTO:
 1. Leer la tesis (documento .pdf y excel)
 2. Diligenciar esta encuesta según sea su criterio
 3. Opcional: Agendar una corta reunión para una retroalimentación y/o preguntas.

Si tiene alguna duda, por favor comunicarse al siguiente contacto:
 +57 3103076125
 Giovanna Ramirez

Trabajo de Grado desarrollado por:
 Ing. Daniel Cárdenas
 Ing. Miguel García
 Ing. Giovanna Ramirez

Nombre completo *

Your answer

Correo electrónico *

Your answer

Entidad/Organización *

Your answer

Cargo *

Your answer

Experiencia en proyectos o cargos
 Describa su experiencia en desarrollo o liderazgo de proyectos. Cargos relacionados, estudios o certificaciones.

Your answer

Evalúe la estructura de la metodología *
 1 = Poco satisfecho 5 = Muy satisfecho

	1	2	3	4	5
Lenguaje común	<input type="radio"/>				
Entendible/Claridad	<input type="radio"/>				
Terminología del sector aeroespacial	<input type="radio"/>				
Relación entre el título y el contenido	<input type="radio"/>				

Evalúe la coherencia entre la formulación del problema y los objetivos de la metodología *
 1 = Poco satisfecho 5 = Muy satisfecho

	1	2	3	4	5
¿El trabajo de Grado, identifica, describe y compara estándares, marcos de referencia y buenas prácticas en gerencia de proyectos?	<input type="radio"/>				

¿El trabajo de Grado, caracteriza el sector aeroespacial en Colombia en el área de gerencia de proyectos?

<input type="radio"/>				
-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------

¿La metodología diseñada para la gerencia de proyectos es adecuada para el sector?

<input type="radio"/>				
-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------

Criterios de aceptación: *
 1 = Poco satisfecho 5 = Muy satisfecho

	1	2	3	4	5
Los diagramas de flujo, se muestran de manera coherente a lo largo de la metodología	<input type="radio"/>				
Los procedimientos, se muestran de manera coherente a lo largo de la metodología	<input type="radio"/>				
Los formatos, se muestran de manera coherente a lo largo de la metodología	<input type="radio"/>				

Estaría dispuesto a implementar esta metodología en sus proyectos? *

Si
 No

Qué tanto le gustó la metodología? *
 calificación cualitativa

	1	2	3	4	5	
Muy poco	<input type="radio"/>	Mucho				

¿Qué tan viable considera que es la ejecución de la propuesta? *

	1	2	3	4	5	
Muy poco	<input type="radio"/>	Mucho				

Observaciones *

Your answer

Sugerencias *

Your answer

Nos gustaría contar con su apoyo para agendar una reunión en la que podamos tener una retroalimentación desde su campo de experticia. Estaría dispuesto a realizar esta reunión? *

si
 no

Figura 11. Encuesta juicio de expertos

Fuente: elaboración propia.

Los criterios de evaluación de la encuesta se seleccionaron con base en la información y retroalimentación obtenida en reuniones con los expertos, verificación de antecedentes y sugerencias de la ingeniera Erika Sofía Olaya Escobar, docente de la Escuela Colombiana de Ingeniería, experta en el ámbito de formulación, y evaluación de proyectos.

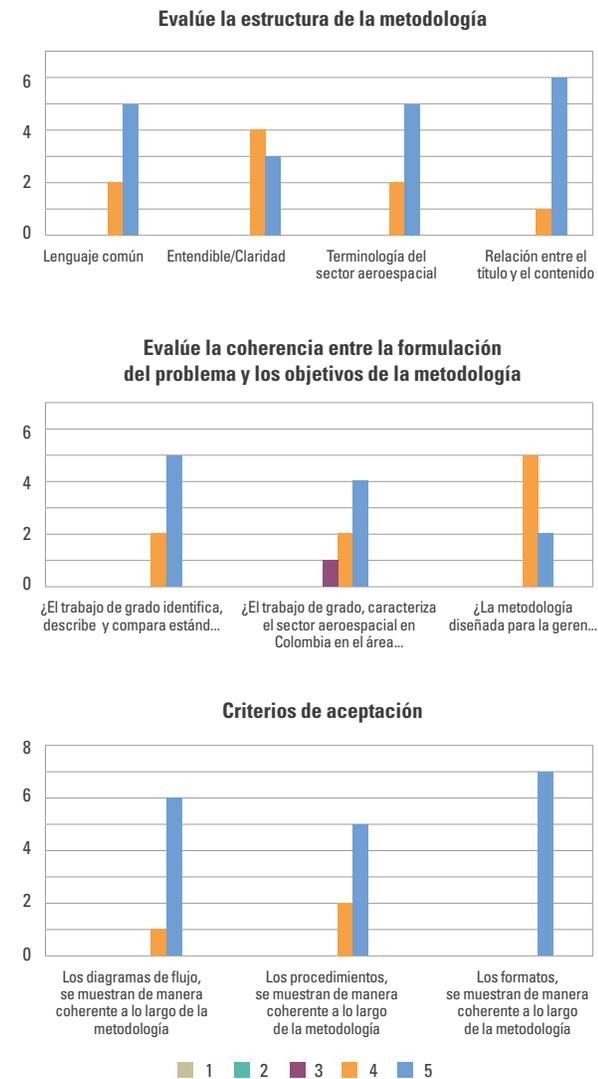


Figura 12. Análisis de encuestas
Fuente: elaboración propia.

Dentro de las observaciones y sugerencias recopiladas de los expertos a través de la encuesta, se presentaron cambios de fondo, estructura y contenido. Estos se incorporaron a la investigación y se realizó la

reestructuración pertinente, para que la metodología desarrollada fuera más incluyente de acuerdo con la retroalimentación de los profesionales del sector aeroespacial en Colombia.

Conclusiones

La industria aeronáutica internacional ha venido en un crecimiento acelerado a lo largo de los años. En el caso de Colombia, el crecimiento del sector aeroespacial se ha visto beneficiado por organismos como la Fuerza Aérea de Colombia y la Aeronáutica Civil.

Estas organizaciones son las principales entidades públicas que desempeñan un papel dentro de la industria aeroespacial colombiana, en la que existe un fuerte componente de seguridad nacional que condiciona la participación del Estado, lo que implica que la inversión, modernización y actividades de la industria aeroespacial, se fundamenten desde una visión de la gestión pública.

Partiendo del análisis de resultados de la investigación, se evidencia que la metodología aplicada para la gestión de proyectos en la división aeroespacial, recopila 11 grupos con 56 procesos de gerencia, dentro de los cuales se identificaron 25 procesos en común con los estándares internacionales tomados como referencia. Además, se adicionaron 11 procesos particulares que complementan la metodología.

Con respecto a la Fuerza Aérea Colombiana, se identificó que la entidad no lleva los procesos de definición y control del alcance, planificación y gestión de la calidad e implementación y monitoreo de los riesgos.

En el caso de la Aeronáutica Civil se evidenció la carencia de supervisión de procesos, como por ejemplo, la realización del monitoreo integral de los cambios, creación de la EDT, control del alcance, gestión y participación de los interesados.

Por ello, se concluye que ambas entidades no desarrollan los procesos de control, alcance y monitoreo de las comunicaciones. Motivo por el cual, el desarrollo de la metodología incluye los procesos faltantes de

cada organización, incluyendo los respectivos formatos que servirán de apoyo a la gestión interna de los proyectos y a la articulación puesta en marcha de procesos de gerencia entre organizaciones del sector a la hora de presentar proyectos en conjunto.

Ahora bien, con respecto a los expertos seleccionados para la validación de la metodología, se obtuvieron resultados satisfactorios en la evaluación de parámetros tales como la estructura, la coherencia y los criterios de evaluación de la metodología.

Finalmente, la metodología se convierte en una herramienta para el sector aeroespacial colombiano que puede mejorar la gestión y la articulación de proyectos de las entidades, aunque esto implica un trabajo futuro que complemente la metodología con los procesos faltantes, técnicas y herramientas vigentes, nacionales e internacionales en gerencia integral de proyectos.

De manera opcional, se puede realizar un amplio estudio del sector aeroespacial, teniendo en cuenta a los actores del tripe hélice que se determinan en la academia, la industria y el Estado. Aspecto que se establece con el objetivo de hacer partícipes a más entes del sector y aplicar la metodología desarrollada en proyectos, en cooperación con la industria, el Gobierno, la academia y, alianzas nacientes que involucren a la sociedad.

Declaración de conflicto de interés: Los autores no manifiestan conflictos de interés institucionales ni personales.

Referencias

- Aerocivil. (2016). *Aviación para la paz*. Aeronáutica Civil. <https://www.aerocivil.gov.co/atencion/estadisticas-de-las-actividades-aeronauticas/Estudios%20y%20publicaciones/AVIACI%C3%93N%20PARA%20LA%20PAZ%20DIC%202016.pdf>
- Aerocivil. (2019). *Plan estratégico aeronáutico 2030*. Aeronáutica Civil. <https://www.aerocivil.gov.co/aerocivil/II-FORO2030/Documents/Resumen%20Ejecutivo%20Plan%20Estrat%C3%A9gico%20Aeron%C3%A1utico%202030.pdf>
- Aerocivil. (2020). *Autoridad de la Aviación Civil*. Aeronáutica Civil. <https://www.aerocivil.gov.co/autoridad-de-la-aviacion-civil>
- Aerocivil. (2020, 28 de diciembre). *Planes en construcción*. Aeronáutica Civil. <https://www.aerocivil.gov.co/atencion/participacion/planes-en-construccion>
- Barne, D., & Wadhwa, D. (2018, 21 de diciembre). *Resumen anual: el año 2018 en 14 gráficos*. Banco Mundial. <https://www.bancomundial.org/es/news/feature/2018/12/21/year-in-review-2018-in-14-charts>
- Bello, A. (2017). Análisis de clústeres aeronáuticos referentes para el desarrollo del clúster aeroespacial colombiano. *Ciencia y Poder Aéreo*, 12(1), 36-58. <https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaereo.560>
- Cardoza, A., Guerrero, D., & Ríos, I. (2011). *Comparación de cuatro sistemas de certificación del Ámbito de la dirección de proyectos*. XV Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos. http://oa.upm.es/12809/1/INVE_MEM_2011_107522.pdf
- CIAC. (2020, 24 de septiembre). *La industria 4.0 en el desarrollo del sector aeroespacial colombiano*. CIAC. <https://www.ciac.gov.co/blog/articulo?id=262>
- Conpes. (2020). *Política de desarrollo espacial: condiciones habilitantes para el impulso de la competitividad nacional*. Documento Conpes 3983. Consejo Nacional de Política Económica Y Social; República de Colombia; Departamento nacional de planeación. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3983.pdf>
- Córdoba, G. (2019). *Los nuevos retos, roles y responsabilidades de la Fuerza Aérea Colombiana en el marco de la implementación de los Acuerdos de Paz* [tesis de Maestría, Pontificia Universidad Javeriana]. <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/45094>
- Delgado-Gómez, P. (2018, 2 de septiembre). En Colombia hay industria aeronáutica. *El Espectador*. <https://www.elespectador.com/economia/en-colombia-hay-industria-aeronautica-article-809827/>
- FAC. (2020). *Plan de acción FAC 2019*. Fuerza Aérea Colombiana. https://d2r89ls1uje5rg.cloudfront.net/sites/default/files/plan_de_accion_fuerza_aerea_2019_0.pdf
- Función Pública. (2014). *Manual Técnico del Modelo Estándar de Control Interno para el Estado Colombiano MECI 2014*. Departamento Administrativo de la Función Pública. <https://www.funcionpublica.gov.co/documents/418537/506911/Manual+T%C3%A9cnico+del+Modelo+Est%C3%A1ndar+de+Control+Interno+para+el+Estado+Colombiano+MECI+2014/065a3838-cc9f-4eeb-a308-21b2a7a040bd>

Granada, J., Rivera, S., Saavedra, G., Ramos, G., Segura, J., Espinel, F., Ballesteros, M., Vallejo, M., & Rodríguez, H. (2017). *Plan Estratégico de la Industrial Colombiana Aeroespacial (Peica)*. Acopaer. <https://acopaer.org/documentos/>

International Project Management Association (IPMA). (2016, 12 de diciembre). *Projects and project management in China*. International Project Management Association. <https://www.ipma.world/projects-and-project-management-in-china/>

iso. (2012). *iso 21500 Directrices para la Dirección y Gestión de Proyectos*. <https://www.isotools.org/2017/07/11/norma-iso-21500-guia-gestion-proyectos/>

Martínez, W. E. L., & Morante F. (2018). Análisis de modelos de clústeres aeroespaciales más representativos a nivel mundial y su incidencia para el desarrollo del Clúster Aeroespacial del Valle del Cauca. *Ciencia y poder aéreo*, 13(1), 114-122.

Monsalve, J. S. (2019). *Aplicación de la guía PMBOK 6 ed. en la planificación de la construcción de viviendas tipo (vis) en el municipio de valdivia (Antioquia), con materiales ecológicos WPC*. Universidad Católica de Colombia. [https://](https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/23413/1/Proyecto%20de%20Grado%20-%20Viviendas%20VIS%20con%20material%20WPC%20-%202028-05-2019.pdf)

repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/23413/1/Proyecto%20de%20Grado%20-%20Viviendas%20VIS%20con%20material%20WPC%20-%202028-05-2019.pdf

Murray-Webster, R., & Dalcher, D. (Eds.) (2019). *APM Body of Knowledge (7th Ed.)*. Association for Project Management. <https://www.apm.org.uk/book-shop/apm-body-of-knowledge-7th-edition>

PMBOK. (2021, 12 de mayo). *Guía de los Fundamentos para la Dirección de Proyectos (Guía del PMBOK®)*. https://www.pmi.org/-/media/pmi/documents/public/pdf/pmbok-standards/pmbok-guide-6th-errata.pdf?v=66712958-a626-47f6-b285-b3f24cf29dc4&sc_lang_temp=es-ES

Project Management Association of Japan. (2016). *P2M. Program & Project Management for Enterprise Innovation*. PMAJ. https://www.pmaj.or.jp/ENG/p2m/p2m_guide/p2m_guide.html

Project Management Institute. (2017). *Business Analysis for Practitioners: A Practice Guide*. Project Management Institute.

Suárez, M. (2020). *Análisis de las estrategias e innovación del desarrollo del clúster aeroespacial en Colombia*. Universidad Militar.

Apéndice A

Árbol problema del sector aeroespacial, con sus respectivas causas y efectos, según la problemática escogida.

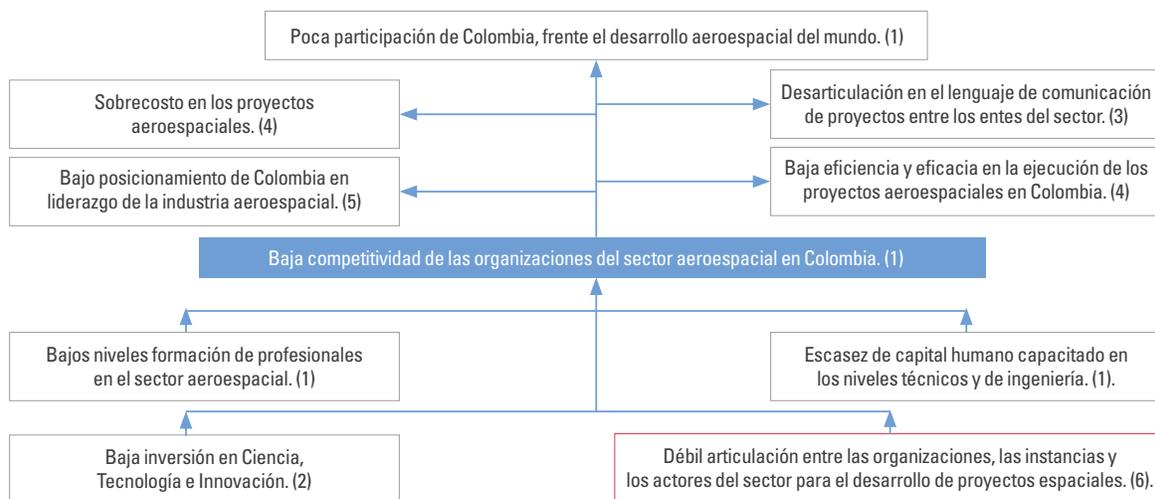


Figura A1. Árbol problema del sector aeroespacial en Colombia

Fuente: Granada et al. (2017), Barne (2018), Córdoba (2019), Spectrum (2018), Cárdenas (2013) y Guaque (2015).

Apéndice B

Comparación de los diferentes procesos que maneja cada uno de los estándares.

Tabla B1
Comparación de estándares

PROCESOS		PMBOK	APMBOK	ICB	ISO 21500:2012	P2M
Gestión Integración	Desarrollar el Acta de Constitución del Proyecto	X		X	X	
	Desarrollar el Plan para la Dirección del Proyecto	X	X	X	X	
	Definir el Ciclo de Vida del Proyecto					X
	Dirigir y Gestionar el Trabajo del Proyecto	X	X	X	X	X
	Gestionar el Conocimiento del Proyecto	X	X	X	X	X
	Monitorear y Controlar el Trabajo del Proyecto	X	X	X	X	
	Realizar el Control Integrado de Cambios	X	X	X	X	X
	Cerrar el Proyecto o Fase	X		X	X	
Gestión Alcance	Planificar la Gestión del Alcance	X	X			X
	Recopilar Requisitos	X	X			X
	Definir el Alcance	X	X	X	X	X
	Crear la EDT/WBS	X	X	X	X	X
	Validar el Alcance	X	X			
	Controlar el Alcance	X	X	X	X	X
Gestión del Cronograma	Planificar la Gestión del Cronograma	X	X			
	Definir las Actividades	X	X	X	X	
	Secuenciar las Actividades	X	X	X	X	
	Estimar la Duración de las Actividades	X	X	X	X	
	Desarrollar el Cronograma	X	X	X	X	X
	Controlar el Cronograma	X	X	X	X	X
Gestión de Costos	Asegurar el compromiso de la organización con los fondos		X			
	Planificar la Gestión de los Costos	X	X			X
	Estimar los Costos	X	X	X	X	X
	Evaluar el flujo de caja en el contexto del proyecto		X			
	Determinar el presupuesto	X		X	X	
	Controlar los Costos	X	X	X	X	X
Gestión de la Calidad	Planificar la Gestión de la Calidad	X	X	X	X	X
	Gestionar la Calidad	X	X	X	X	X
	Controlar la Calidad	X	X	X	X	
Gestión de los Recursos	Planificar la Gestión de Recursos	X	X	X	X	X
	Estimar los Recursos de las Actividades	X	X	X	X	X
	Definir la Organización del Proyecto		X	X	X	X
	Adquirir Recursos	X	X			X
	Desarrollar el Equipo	X		X	X	X
	Dirigir al Equipo	X	X	X	X	X
	Controlar los Recursos	X	X	X	X	X
Gestión de las Comunicaciones	Planificar la Gestión de las Comunicaciones	X	X	X	X	X
	Gestionar las Comunicaciones	X	X	X	X	X
	Monitorear las Comunicaciones	X	X	X	X	X
Gestión de los Riesgos	Planificar la Gestión de los Riesgos	X	X			X
	Identificar los Riesgos	X	X	X	X	X
	Realizar el Análisis Cualitativo de Riesgos	X	X	X	X	
	Realizar el Análisis Cuantitativo de Riesgos	X	X			X
	Planificar la Respuesta a los Riesgos	X	X			X
	Implementar la Respuesta a los Riesgos	X	X	X	X	X
	Monitorear los Riesgos	X	X	X	X	X
Gestión de las Adquisiciones	Planificar la Gestión de las Adquisiciones	X	X	X	X	X
	Seleccione proveedores		X	X	X	
	Efectuar las Adquisiciones	X	X			X
	Controlar las Adquisiciones	X	X	X	X	X
Gestión de los Interesados	Identificar a los interesados	X	X	X	X	
	Planificar el Involucramiento de los Interesados	X	X			X
	Gestionar la Participación de los Interesados	X	X	X	X	X
	Monitorear el Involucramiento de los Interesados	X				X
Gestión del Valor Ganado	Identificar y Cuantificar el Valor del Proyecto		X			X
	Identificar oportunidades potenciales de creación de valor y generar recursos de creación de valor relevantes					X
Gestión de la Información	Gestionar la información del Proyecto		X			

Fuente: elaboración propia.

Apéndice C

Diagramas de flujo adicionales presentes en la metodología.

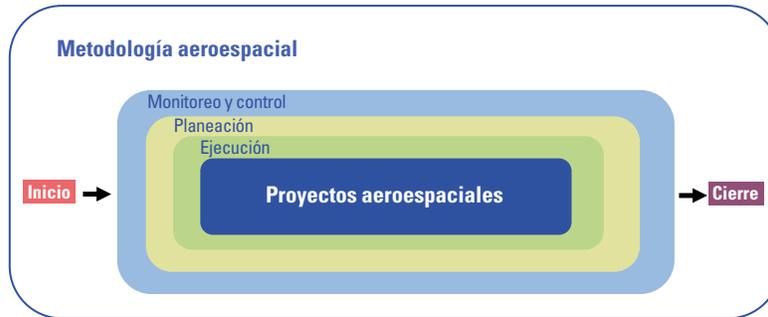


Figura C1. Diagrama de flujo general

Fuente: elaboración propia.

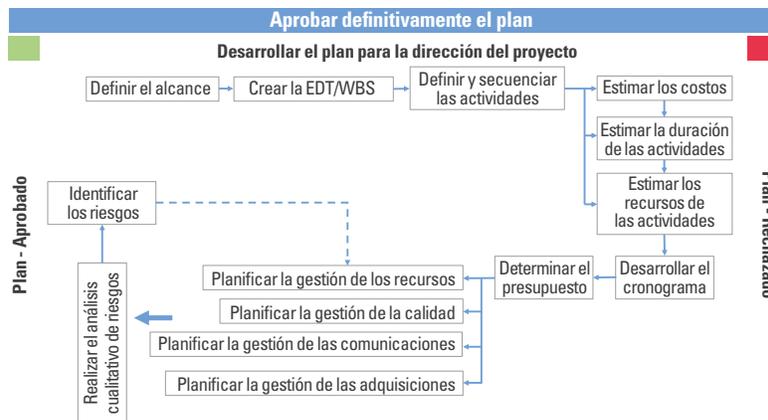


Figura C2. Diagrama de flujo planeación

Fuente: elaboración propia.

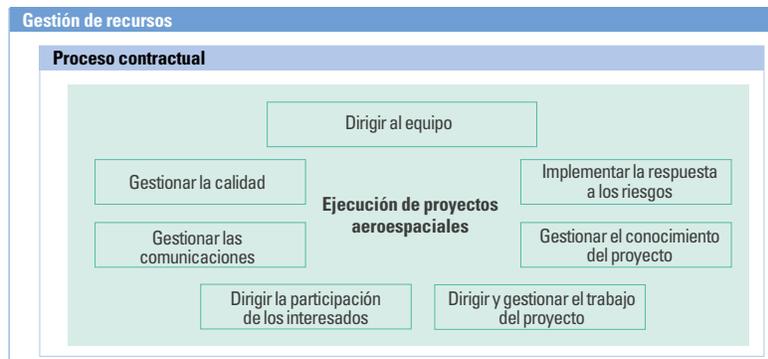


Figura C3. Diagrama de flujo ejecución

Fuente: elaboración propia.

Monitorear y controlar el trabajo del proyecto

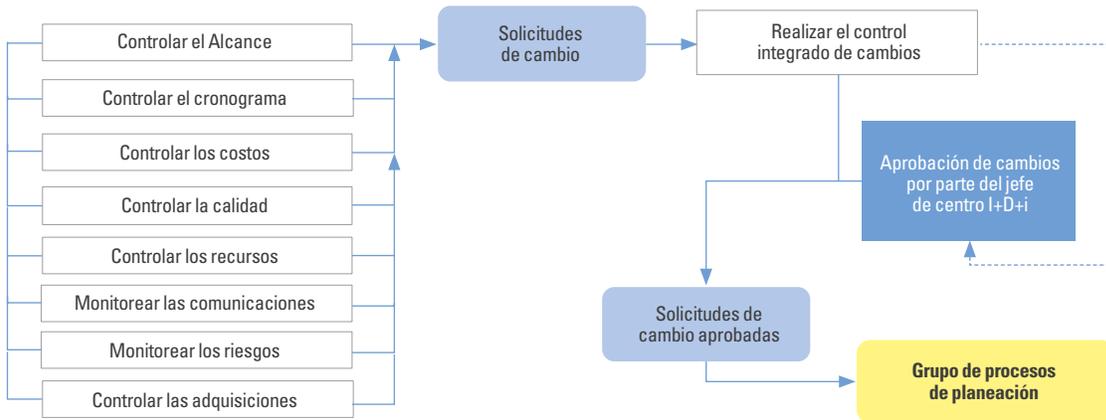


Figura C4. Diagrama de flujo monitoreo y control
Fuente: elaboración propia.

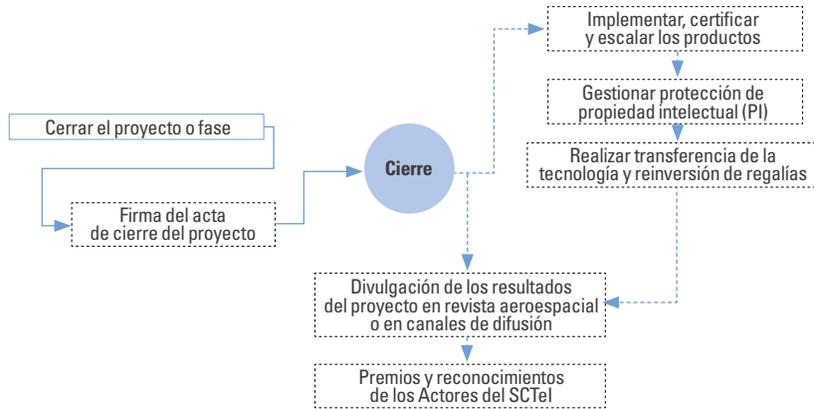


Figura C5. Diagrama de flujo cierre
Fuente: elaboración propia.

Estudio transversal: pérdida auditiva causada por ruido en el personal de la aviación militar ecuatoriana

| Fecha de recibido: 24 de enero del 2021 | Fecha de aprobación: 9 de abril del 2021 |

**Álvaro Guillermo
Ortiz Rodríguez**

Magíster en Gestión Ambiental

Fuerza Aérea Ecuatoriana
Ecuador

Rol de investigador: experimental y escritura

<https://orcid.org/0000-0002-9277-6097>

✉ alvaroortizr0@gmail.com

Para citar este artículo: Ortiz Rodríguez, A. (2021). Estudio transversal: pérdida auditiva causada por ruido en el personal de la aviación militar ecuatoriana. *Ciencia y Poder Aéreo*, 16(1), 139-148. <https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaereo.688>



Estudio transversal: pérdida auditiva causada por ruido en el personal de la aviación militar ecuatoriana

Resumen: La hipoacusia como condición de salud crónica ocupa uno de los primeros lugares en países como Norteamérica, superando a la diabetes y el cáncer, motivo por el cual, desde hace décadas sus Fuerzas Armadas iniciaron estudios pormenorizados con el fin de implementar medidas preventivas adecuadas; no obstante, la aviación militar tiene sus particularidades debido a que las principales fuentes de ruido son sus propias aeronaves. Dicho lo anterior, el objetivo de esta investigación es correlacionar la pérdida auditiva con los factores: edad, actividad o rango, analizando las audiometrías de 73 miembros de la aviación ecuatoriana y verificar su estado actual de acuerdo con los umbrales de audición de frecuencias. Los resultados indican que la mayor cantidad de afectados se presentan en el personal de tropa de sexo masculino de 30 a 44 años de edad. Sin embargo, la variabilidad de los niveles de hipoacusia no evidenció la existencia de una relación directa entre pérdida auditiva y el incremento en la edad, tiempo de servicio, actividad inherente al tipo de aeronave, o rango del individuo, por lo que no se puede aseverar que para el caso de la Institución la hipoacusia sea producida exclusivamente por las condiciones laborales y, más bien, puede ser producto de antecedentes clínicos de la persona. En consecuencia, se evidencia un eficaz programa preventivo y medidas de mitigación adecuadas, referentes a la seguridad y salud ocupacional. Aunque es imprescindible realizar estudios más detallados, siendo más enfáticos en las Bases Aéreas donde se despliegan aeronaves de combate y de ala rotatoria.

Palabras clave: contaminación acústica; hipoacusia; mantenimiento de aeronaves; ruido aeronáutico; salud ocupacional; seguridad industrial.

Cross-sectional Study: Noise-induced Hearing Loss in Ecuadorian Military Aviation Personnel

Abstract: Hearing loss holds an important place among chronic health conditions in North American countries, surpassing diabetes and cancer. Therefore, for decades, the Armed Forces in these nations began detailed studies in order to implement adequate preventive measures. However, military aviation has the peculiarity that the main sources of noise are aircraft themselves. With that being said, this research seeks to correlate hearing loss with the variables age, activity, and rank within military aviation, by analyzing audiometry reports of 73 members of the Ecuadorian aviation and later verifying their current status regarding frequency hearing thresholds. Our results show that the biggest number of affected individuals correspond to male personnel aged 30-44. However, the variability of hearing loss levels did not signal a direct relationship between this condition and an increase in age, service time, activity and type of aircraft, or the rank held by participants. Hence, it is not possible to assert that, in the case of the studied institution, hearing loss is produced exclusively by working conditions, but rather by individuals' clinical history. Consequently, there is evidence of an effective preventive program and adequate mitigation measures in occupational health and safety. Despite this, it is essential to carry out additional in-depth studies in airbases where combat and rotary-wing aircraft are deployed.

Keywords: Noise pollution; hearing loss; aircraft maintenance; aeronautical noise; occupational safety and health; industrial Security.

Estudo transversal: perda auditiva causada por ruído no pessoal da aviação militar equatoriana

Resumo: A hipoacusia como condição de saúde crônica ocupa um dos primeiros lugares em países da América do Norte, superando a diabetes e o câncer, motivo pelo qual, desde há décadas que as suas Forças Armadas iniciaram estudos aprofundados a fim de implementar medidas preventivas adequadas; No entanto, a aviação militar tem as suas particularidades, uma vez que as principais fontes de ruído são as suas próprias aeronaves. Dito isto, o objetivo desta investigação é correlacionar a perda auditiva com os fatores: idade, atividade ou intervalo, analisando as audiometrias de 73 membros da aviação equatoriana e verificando seu estado atual de acordo com os limiares de audição de frequências. Os resultados indicam que o maior número de pessoas afetadas são apresentados no pessoal de tropa do sexo masculino de 30 a 44 anos de idade. No entanto, a variabilidade dos níveis de hipoacusia não evidenciou a existência de uma relação direta entre perda auditiva e aumento da idade, tempo de serviço, atividade inerente ao tipo de aeronave, ou categoria do indivíduo, pelo que não se pode afirmar que, no caso da instituição, a hipoacusia é produzida exclusivamente pelas condições de trabalho e, em vez disso, pode ser produto de antecedentes clínicos da pessoa. Em consequência, evidencia-se um eficaz programa preventivo e medidas de mitigação adequadas, referentes à segurança e saúde ocupacional. Apesar de ser imprescindível realizar estudos mais detalhados, sendo mais enfáticos nas bases aéreas onde são desdobradas aeronaves de combate e de asa rotatória.

Palavras-chave: poluição acústica; hipoacusia; manutenção de aeronaves; ruído aeronáutico; saúde ocupacional; segurança industrial.

La hipoacusia o pérdida auditiva es una de las condiciones de salud crónica más común en Norteamérica, superando a la diabetes y el cáncer (Yankaskas *et al.*, 2017). Las Fuerzas Armadas estadounidenses a finales de la Segunda Guerra Mundial iniciaron medidas preventivas en el ámbito global, debido al alto índice de afectaciones en la percepción sonora de sus combatientes luego de la intervención en dicho conflicto, lo cual inclusive, llegó a ser motivo de millonarias demandas luego de operaciones más recientes como las de Irak y Afganistán. Por ello, las regulaciones implantadas en el país del norte han servido de base para la expedición de normativas en otros países (Kerr *et al.*, 2017), que en la actualidad están encabezadas fundamentalmente por la Organización Mundial de la Salud (OMS) (Héroux *et al.*, 2018). Las principales medidas adoptadas se centran en la utilización de elementos de protección auditiva, sean simples o dobles, como los tipo orejera, tapones de inserción o el uso combinado de ambos (Gwenolé NEXER, 2013), pese a que internacionalmente no existe una estandarización para el cálculo de la atenuación proporcionada por estos dispositivos, existen diferencias sustanciales en los métodos aplicados (Rodríguez, 2003), que dependen de si estos están sometidos a bajas o altas frecuencias (Coello *et al.*, 2017). Aunque eventualmente se puede optar por otro tipo de barreras acústicas que no son aplicables en la generalidad de los casos (Hernández-Sánchez, 2013).

Las alteraciones congénitas, tumoraciones, envejecimiento, exposición a sustancias ototóxicas y al ruido, entre otros, constituyen los componentes causantes de la hipoacusia (Olarieta *et al.*, 2015) y de la denominada pérdida auditiva oculta (Tepe *et al.*, 2017). De modo que, la exposición a la contaminación acústica es uno de los factores más comunes en las operaciones militares y objeto de diversas investigaciones en el campo militar, debido a que los niveles de ruido alcanzan valores importantes, como es el caso de las armas de fuego que superan los 130 dB (Heupa *et al.*, 2011). Un estudio realizado en la Marina Real Noruega en el 2013, basado en pruebas de audiometría obtuvo un total de 190 individuos con pérdida auditiva, equivalente

al 31,4% de la muestra evaluada, de los cuales en su mayoría correspondía a personal de navegantes y personal encargado del cuarto de máquinas, íntimamente relacionado a la edad del individuo (Irgens-Hansen *et al.*, 2015).

En el 2012, el personal militar estadounidense realizó una investigación de pérdida de audición autoinformada, validada con estudios audiométricos, en la cual el 7,5% de los 48.540 casos estudiados reportaron una nueva pérdida de audición, la mayoría de individuos de sexo masculino nacidos antes de 1970 y pertenecientes al Ejército, Marina y Guardia Costera (Wells *et al.*, 2015). En otro estudio, se evaluó a veteranos de guerra americanos luego de aproximadamente tres años de haberse separado de las filas milicianas, entre ellos, el 15% de participantes fueron identificados con pérdida de audición de baja a media frecuencia, mientras que el 25% lo reflejó en altas frecuencias, encontrando los casos más críticos en edades superiores a 41 años y una diferencia casi imperceptible en exmiembros de la Fuerza Aérea, frente a las otras ramas; por el contrario, sí hubo diferencias significativas en aquellos individuos con más de 20 años de servicio (Gordon *et al.*, 2017).

Los procedimientos y evaluaciones de las afectaciones del ruido en los combatientes han evolucionado y perfeccionado con el tiempo, buscando ser más precisos y cercanos a la realidad, como lo constituye la propuesta de caracterización de enfermedades agudas adquiridas a corto plazo por parte de la población militar (Hecht *et al.*, 2019), la cual promueve la realización de pruebas audiométricas antes e inmediatamente después de la exposición a ruidos continuos, como los generados por buques, tanques, ruidos impulsivos como los de un rifle o explosiones que pueden alcanzar los 180 dB. La aplicación de estos test no es del todo factible, debido a los altos costos, ya que la audiometría debe realizarse en exteriores y en condiciones totalmente diferentes a las convencionales.

En actividades similares llevadas a cabo por la fuerza pública, policía y bomberos, existen investigaciones como la realizada en Córdoba, España, en la cual, según los criterios de Klockhoff, un total de 207

trabajadores equivalentes al 53,2% resultaron con audiogramas anormales, adicional se determinó que el 35,7% de ellos resultaron ser casos de hipoacusia neurossensorial (Álvarez-Fernández *et al.*, 2016).

En la rama de la aviación, específicamente en la tripulación de aeronaves, la Fuerza Aérea Colombiana en el 2015, determinó que el 5% de un total de 1.629 pacientes presentó hipoacusia inducida por ruido, con mayor afectación en el oído izquierdo, diagnóstico que aparece a partir de los 5 años de servicio del personal; no obstante, se encontraron niveles importantes de pérdida auditiva en población joven determinando que el ambiente laboral no es la causa principal y sí, se asocia a factores externos como el uso de audífonos con presiones sonoras superiores a 85 dB (Caputo & Correa, 2018). Por su parte, en la aviación del Ejército Ecuatoriano en el 2016, se estudió a un total de 112 individuos, entre pilotos, ingenieros de vuelo y mecánicos, de los cuales el 19,6% presentó hipoacusia unilateral y el 16% hipoacusia bilateral, mientras que la hipoacusia leve, moderada y severa fue del 15,2%, 7,1% y 1,8%, respectivamente. En cuanto al grado militar, los oficiales de mayor tiempo de servicio, y por ende, con más horas de vuelo, resultaron ser de los más afectados (Carpio-Ayora & Álvarez-Pesantez, 2017).

La Fuerza Aérea Ecuatoriana (FAE), a diferencia del Ejército, opera con aeronaves de diferente tipo, esto es, de entrenamiento, ala rotatoria, transporte, combate a turbohélice y supersónicas, estas últimas, superan los 110 dB al momento del despegue (Corbalán *et al.*, 2019). Es decir, no solamente está expuesta la tripulación, sino también el personal de apoyo en tierra, por lo que esta investigación pretende determinar la relación existente entre el grado de afectación de la capacidad auditiva y variables como edad o tiempo de servicio, rango y actividad dentro de la institución, a fin de fortalecer las medidas de prevención existentes y focalizarlas, de ser necesario. De igual forma, podrán implementarse medidas de mitigación oportunas, reduciendo ostensiblemente la afectación del personal, y así, constituir una política generalizada en todos los

países, en especial europeos, en donde se responsabiliza a los empleadores de todo lo relacionado con los procedimientos de evaluación de riesgos en el ambiente laboral (Stolk *et al.*, 2012), lo que involucra un gran reto para la aviación militar, al estar sujeta a innumerables externalidades que directa e indirectamente influyen en el desarrollo normal de las actividades.

Metodología

Se recopilaron las audiometrías realizadas entre el 2018 y el 2019 —controles anuales y bianuales—, del personal militar al que de acuerdo con los registros clínicos de la FAE, se le diagnosticó algún tipo de afección auditiva, hipoacusia de alta frecuencia, percepción de posible pérdida de audición, y personal que respecto a sus funciones, se le recomendó el uso de protectores auditivos. La muestra suma un total de 73 miembros, entre oficiales y aerotécnicos.

A partir de los audiogramas se obtuvieron y tabularon los valores de los umbrales auditivos de las frecuencias 500 Hz, 1.000 Hz, 2.000 Hz y 3.000 Hz, con el objeto de calcular el porcentaje de pérdida de audición monoaural mediante la sumatoria de dichos umbrales (sum), de acuerdo con las tablas de conversión establecidas en la normativa española (Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales, 2000), cuyo extracto se visualiza en la tabla 1. Luego, se calculó la pérdida de audición binaural (*Pab*), aplicando la ecuación (1) y clasificando el tipo de discapacidad conforme a la normativa antes citada.

La pérdida de audición monoaural y binaural fue contrastada con las variables: edad, rango y actividad según el tipo de aeronave, para determinar la prevalencia de afectados. Así mismo, a través de técnicas de estadística inferencial en lenguaje R para un nivel de confianza del 95% ($\alpha = 0,05$), se evaluó la posible relación existente entre dichas variables y los porcentajes de hipoacusia obtenidos, aplicando un análisis Anova y un test Kruskal-Wallis.

Tabla 1
Pérdida auditiva monoaural

SUM	%	SUM	%	SUM	%	SUM	%	SUM	%
100	0,0	130	11,2	160	22,5	190	33,8	220	45,0
105	1,9	135	13,1	165	24,4	195	35,6	225	46,9
110	3,8	140	15,0	170	26,2	200	37,5	230	48,9
115	5,6	145	16,9	175	28,1	205	39,4	235	50,5
120	7,5	150	18,8	180	30,0	210	41,2	240	52,5
125	9,4	155	20,6	185	31,9	215	43,1	245	54,4

Fuente: Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales (2000).

$$Pab = \left(\frac{5 * (\% \text{ pérdida mejor oído}) + \% \text{ pérdida peor oído}}{6} \right) \quad (1)$$

Donde:

Pab es la pérdida de audición binaural en %

Resultados

Los 73 miembros de la FAE corresponden en su totalidad al sexo masculino, de los cuales cinco son oficiales y 68 aerotécnicos, con rango de edad entre los 23 y 50 años, y un tiempo de servicio de dos a 26 años, el 32,88 % del personal evaluado realiza actividades relacionadas con aeronaves supersónicas, conforme se observa en la tabla 2.

Tabla 2
Frecuencia del personal evaluado de acuerdo con las variables

	Variable	Frecuencia	Porcentaje
Edad	Joven 20-29	6	8,22
	Adulto joven 30-44	43	58,90
	Adulto mayor 45-65	24	32,88
Rango	Oficiales	5	6,85
	Aerotécnicos	68	93,15
Aeronave	Ala rotatoria	14	19,18
	Combate turbohélice	7	9,59
	Entrenamiento	2	2,74
	Supersónico	24	32,88
	Transporte	17	23,29
	Otros	9	12,33

Fuente: elaboración propia.

Pérdida de audición monoaural y binaural

De acuerdo con las pruebas audiométricas, el 71,23 % de la muestra estudiada refleja una condición auditiva normal, mientras que el 20,55 % presenta hipoacusia monoaural y el 28,77 % hipoacusia binaural, conforme se visualiza en la figura 1.

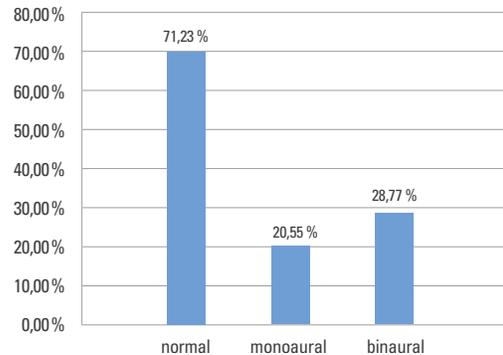


Figura 1. Presencia de hipoacusia en el personal evaluado

Fuente: elaboración propia.

Pérdida de audición monoaural y binaural según edad

En cuanto a la pérdida auditiva del oído derecho, conforme se muestra en la tabla 3, el 19,18 % de personas en su mayoría adulto joven (10,96 %), presenta pérdida auditiva, con el mayor valor correspondiente al 41,2 % de deficiencia en este rango de edad, lo cual se verifica visualmente en la figura 2. Por otro lado, para el caso del oído izquierdo, el mayor porcentaje de pérdida auditiva con el 39,4 %, se presenta en el rango de 30 a 44 años de edad, sumando un total de 15 casos con esta condición correspondientes al 20,55 %, de los cuales el 13,70 % está en el rango de edad intermedio.

La afectación binaural leve con el 27,40 % y moderada con el 1,37 %, del total de casos analizados, en su gran mayoría se presenta entre los 30 y 44 años de edad, reflejando una deficiencia auditiva máxima del 39,7 % considerada como clase de discapacidad tipo 3.

El análisis estadístico Anova realizado en R, para un nivel de confianza del 95 %, refleja que el incremento en la edad no incide directamente en los niveles de hipoacusia monoaural, obteniendo un *p-value*

de 0,663, lo cual es ratificado con el test de Kruskal-Wallis, con un *p-value* de 0,9434. De igual forma, no existe incidencia del aumento en la edad sobre los porcentajes de pérdida de audición binaural, obteniendo así un *p-value* de 0,683 para el análisis Anova y un *p-value* de 0,8588 para el test de Kruskal-Wallis.

Tabla 3
Pérdida de audición monoaural y binaural según edad

		% Afectados	Edad	% en relación al total	Tiempo de servicio (años)	% pérdida auditiva
Afectación monoaural	00	19,18	Joven 20-29	1,37	2	1,9
			Adulto joven 30-44	10,96	7-21	5,6-41,2
			Adulto mayor 45-65	6,85	23-26	1,9-24,4
	01	20,55	Joven 20-29	2,74	2-4	5,6-7,5
			Adulto joven 30-44	13,70	12-21	1,9-39,4
			Adulto mayor 45-65	4,11	22-24	1,9-11,2
Afectación binaural	Leve	27,40	Joven 20-29	2,74	2-4	2,5-7,5
			Adulto joven 30-44	16,44	7-21	3,8-15,0
			Adulto mayor 45-65	8,22	23-26	3,8-11,2
	Moderada	1,37	Joven 20-29	---	---	---
			Adulto joven 30-44	1,37	15	39,7
			Adulto mayor 45-65	---	---	---

Fuente: elaboración propia.

Pérdida de audición según actividad

En cuanto a la pérdida de audición monoaural según el tipo de avión al cual el personal realiza el mantenimiento, tanto para el oído derecho como para el oído izquierdo, el mayor porcentaje de afectados se da en la aviación supersónica con el 6,85% y 8,22%, como se observa en la tabla 4, cuyos porcentajes de hipoacusia más altos (41,2% y 39,4%) se presentan en las aeronaves de ala rotatoria como se visualizan en la figura 3.

La mayor cantidad de afectados con hipoacusia binaural se registra en el personal de actividades inherentes a las aeronaves supersónicas con el 12,33% de pacientes, seguido de las actividades correspondientes al ala rotatoria con el 6,85% (figura 4), evidenciándose una pérdida auditiva del 39,7% en un elemento especializado en helicópteros (figura 5).

Tabla 4
Pérdida de audición monoaural y binaural según actividad

Aeronave	% respecto al total			
	Afectación OD	Afectación OI	Afectación binaural	
			Leve	Moderada
Ala rotatoria	6,85	5,48	5,48	1,37
Combate turbohélice	1,37	1,37	2,74	---
Entrenamiento	0,00	1,37	1,37	---
Supersónico	6,85	8,22	12,33	---
Transporte	2,74	1,37	2,74	---
Otros	1,37	2,74	2,74	---
Total	19,18	20,55	27,40	1,37

Fuente: elaboración propia.

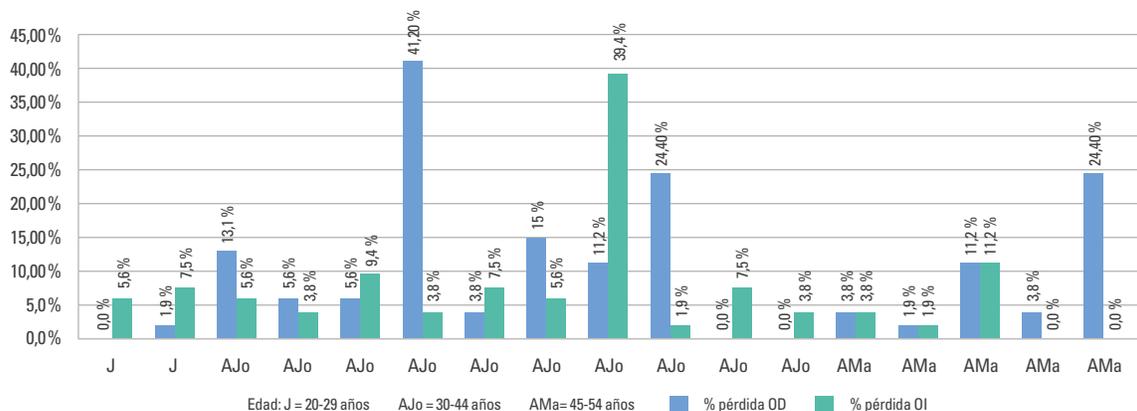


Figura 2. Pérdida de audición monoaural, oído derecho e izquierdo
Fuente: elaboración propia.

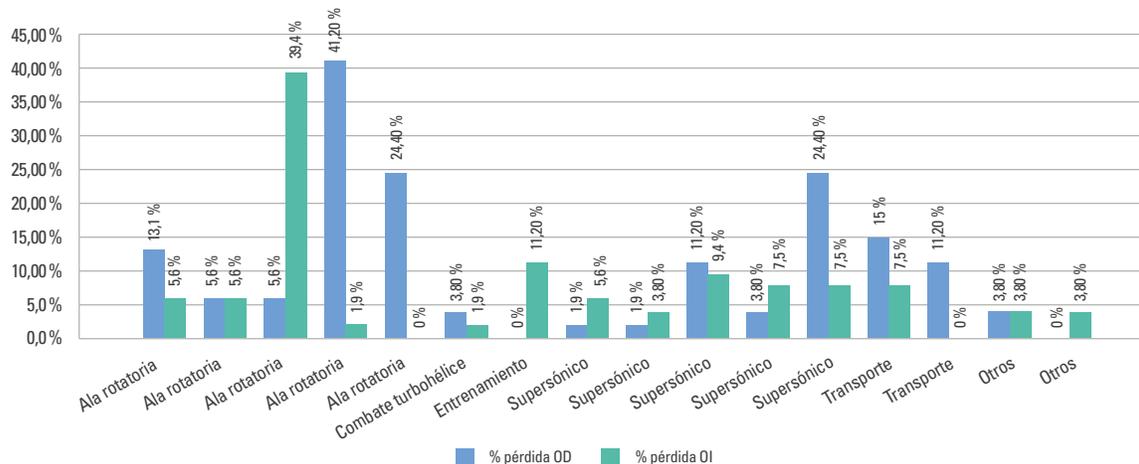


Figura 3. Pérdida de audición monoaural según actividad

Fuente: elaboración propia.

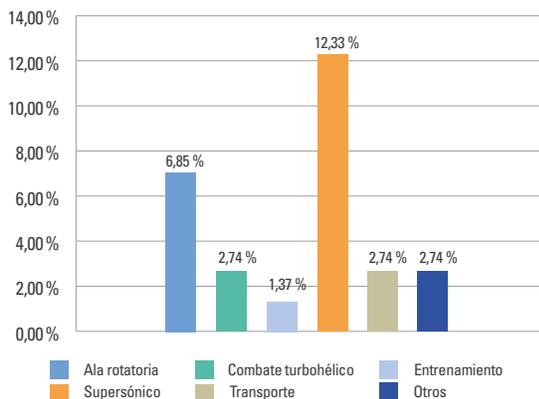


Figura 4. Afectados audición binaural según actividad y aeronave

Fuente: elaboración propia.

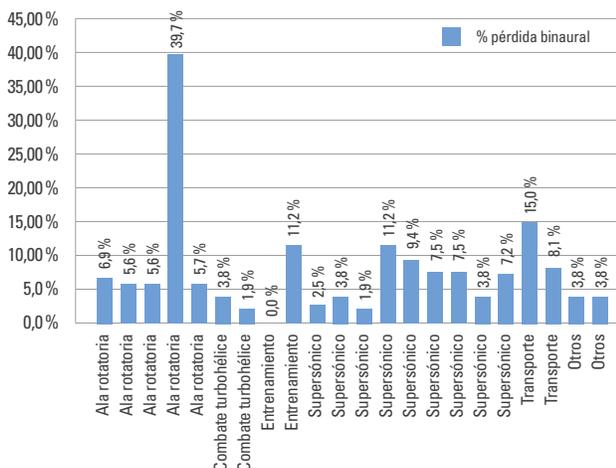


Figura 5. Afectación binaural según actividad y aeronave

Fuente: elaboración propia.

La estadística inferencial demuestra que el tipo de actividad no es determinante en los niveles de pérdida auditiva monoaural, obteniendo un *p-value* de 0,221 y 0,4515 para el análisis Anova y el test Kruskal-Wallis, respectivamente. Similares resultados se obtienen para la hipoacusia binaural, ya que no existe evidencia significativa de incidencia de la actividad desempeñada con un *p-value* de 0,482 y 0,5013 para los parámetros estadísticos.

Pérdida de audición binaural según rango

Conforme se advierte en la tabla 5, los afectados con hipoacusia en su mayoría son aerotécnicos, que corresponden al 27,40% del personal evaluado, existe un solo caso para oficiales, los porcentajes de hipoacusia se visualizan en la figura 6 y resulta el mayor valor para un señor aerotécnico con el 39,70%.

Tabla 5
Afectados con pérdida de audición binaural según rango

Rango	Afectados	% respecto del total		
		Leve	Moderada	Total
Oficiales	1	1,37	0,0	1,37
Aerotécnicos	20	26,03	1,37	27,40
Total	21	27,40	1,37	28,77

Fuente: elaboración propia.

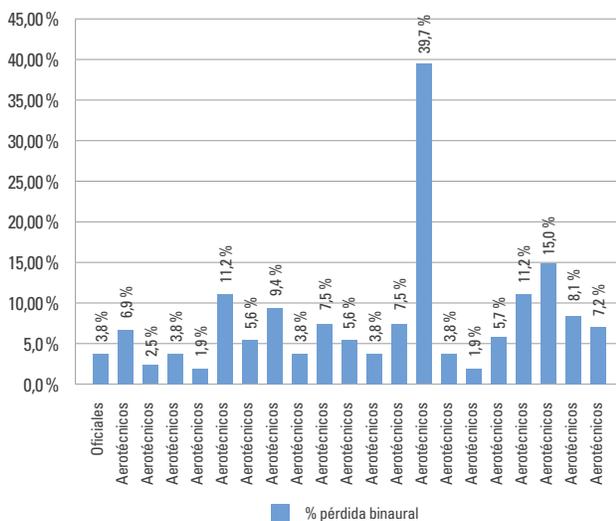


Figura 6. Afectación binaural según rango

Fuente: elaboración propia.

Discusión

De acuerdo con los resultados obtenidos, los casos de hipoacusia para el oído izquierdo y derecho son similares con el 20,55 % y el 19,18 %, respectivamente. Para este último se presenta el mayor valor de pérdida auditiva con el 41,2 %, estos resultados no son compatibles con el estudio de Caputo y Correa (2018), ya que este se realizó exclusivamente a personal de tripulación, es decir, para el personal de pilotos; la fuente emisora principal de ruido la constituyen los motores, ubicados al lado izquierdo de la cabina, y por consiguiente, la hipoacusia monoaural se presenta en ese oído.

El mayor valor de afectación binaural se presenta en la edad intermedia de 30 a 44 años; sin embargo, estadísticamente y debido a la variabilidad de los resultados, el incremento en la edad no es determinante en los niveles de hipoacusia, contrario a los resultados obtenidos en la aviación del Ejército Ecuatoriano. Así mismo, el porcentaje de afectados con hipoacusia binaural del presente estudio, que asciende al 28,77 %, supera el porcentaje del 16 % obtenido en la investigación de la Fuerza Terrestre. Los motivos principales de tal diferencia pueden ser antecedentes clínicos del personal analizado, pero sobre todo, los trabajos

rotativos del personal en los diferentes tipos de aeronaves, que es común en la Fuerza Aérea.

La prevalencia de hipoacusia en esta investigación supera el valor del 5 %, obtenido por Caputo y Correa (2018) para el personal de tripulantes de la aviación colombiana, sector que en el caso ecuatoriano no presenta afectación auditiva, pues los casos de pérdida en la audición corresponden al personal de oficiales y aerotécnicos de mantenimiento de aeronaves.

La mayor cantidad de afectados con hipoacusia binaural corresponde a las especialidades relacionadas con la aviación supersónica, seguida de la aviación con ala rotatoria, aunque conforme al Anova, los niveles de afectación no guardan relación directa con el tipo de aeronave, es así que el mayor grado de afectación del 39,7 % para un señor aerotécnico de 39 años de la especialidad de helicópteros, no puede ser considerado determinante, es un valor atípico que constituye un caso de discapacidad moderada y corresponde al 1,37 % del total de la muestra, frente al 7,1 % obtenido por Carpio-Ayora y Álvarez-Pesantez (2017) en el caso de Aviación del Ejército Ecuatoriano, en el que incluso, se presentaron casos de discapacidad severa, por lo que se puede deducir que los programas preventivos, controles médicos continuos y medidas de mitigación respecto al factor ruido, han sido eficaces en la Fuerza Aérea.

Conclusiones

La hipoacusia causada por ruido en el campo de la aviación depende de muchos factores como la edad y el tiempo de servicio, sin embargo, para la aviación militar ecuatoriana los casos que se han presentado resultan ser excepcionales al evidenciar que no dependen del incremento en los años, que está íntimamente relacionada con el periodo de permanencia en la institución, por lo que la pérdida auditiva manifestada en el personal de la Fuerza Aérea no está ligada directamente a la actividad laboral, pudiendo deberse más bien a asuntos externos, así como a antecedentes clínicos especiales.

De igual forma, no existe evidencia suficiente para aseverar que la pérdida en la audición dependa del rango o actividad específica del oficial o aerotécnico, sin existir diferencias significativas entre el oído derecho y el izquierdo, presentándose hechos aislados en el caso de helicópteros y aviones supersónicos, hacia los cuales podrían focalizarse y fortalecerse las medidas preventivas y correctivas.

El programa preventivo y medidas de mitigación respecto al factor ruido han sido eficaces en la aviación militar ecuatoriana, ya que al considerar el número total de efectivos se evidencia una mínima cantidad de casos de personal con pérdida auditiva, que inclusive, puede ser corregida con ayuda de otoamplifonos o dispositivos especiales.

Debido a que los casos aislados de mayor pérdida auditiva se presentan en aerotécnicos a cargo de actividades de mantenimiento de aeronaves de ala rotatoria y supersónica, es necesario profundizar en estudios audiométricos más frecuentes y detallados en el personal desplegado en las instalaciones destinadas para este tipo de aviones.

Declaración de conflicto de interés: El autor no manifiesta conflictos de interés institucionales ni personales.

Referencias

- Álvarez-Fernández, C., Romero-Saldaña, M., & Prieto-Ballesteros, A. (2016). Evaluación epidemiológica de la exposición a ruido en trabajadores de policía local y bomberos. *Revista de la Asociación Española de Especialistas en Medicina del Trabajo*, 25(2), 86-95. https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1132-62552016000200004
- Caputo, L., & Correa, M. A. (2018). Manejo del ruido en las tripulaciones de la Fuerza Aérea Colombiana en las últimas dos décadas. *Ciencia y Poder Aéreo*, 13(1), 46-53. <https://doi.org/10.18667/cienciaypoderareo.585>
- Carpio-Ayora, M. X., & Álvarez-Pesantez, K. del R. (2017). Estudio transversal: hipoacusia laboral inducida por ruido en personal de aeronáutica del ejército ecuatoriano y factores asociados. Quito, Ecuador, 2014-2016. *Revista Médica Hospital del José Carrasco Arteaga*, 9(2), 116-122. <https://doi.org/10.14410/2017.9.2.ao.19>
- Coello, F., Males, D., Tello, D., & López-Pulles, R. (2017). ¿Son los tapones auditivos eficaces para prevenir los efectos de la contaminación auditiva mediante la atenuación sonora? *Revista de la Facultad de Ciencias Médicas (Quito)*, 42(1), 108-113. https://doi.org/10.29166/ciencias_medicas.v42i1.1541
- Corbalán, E., Trujillo, C., Sznajderman, L., & Di Bernardi, C. A. (2019). *Interacción del aeropuerto de la plata con su entorno a través de mapas estratégicos de ruido y mapas de dispersión gaseosa* [Ponencia]. V Jornadas de Investigación, Transferencia y Extensión de la Facultad de Ingeniería, La Plata, Argentina. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/74993>
- Gordon, J. S., Griest, S. E., Thielman, E. J., Carlson, K. F., Helt, W. J., Lewis, M. S., Blankenship, C., Austin, D., Theodoroff, S. M., & Henry, J. A. (2017). Audiologic characteristics in a sample of recently-separated military veterans: The Noise Outcomes in Servicemembers Epidemiology Study (NOISE Study). *Hearing Research*, 349, 21-30. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2016.11.014>
- Gwenolé NEXER. (2013). *Dans quelle situation l'utilisation d'une double protection auditive devient-elle nécessaire?*. Hearing Protech. <https://www.hearingprotech.com/fr/publications/doble-protection-auditive.html>
- Hecht, Q. A., Hammill, T. L., Calamia, P. T., Smalt, C. J., & Brungart, D. S. (2019). Characterization of acute hearing changes in United States military populations. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 146(5), 3.839-3.848. <https://doi.org/10.1121/1.5132710>
- Hernández-Sánchez, H. (2013). Medio militar y trastornos auditivos inducidos por ruido. *Revista Cubana de Medicina Militar*, 42(3), 396-402. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0138-65572013000300006
- Héroux, M. E., Babisch, W., Belojevic, G., Brink, M., Janssen, S., Lercher, P., Paviotti, M., Pershagen, G., Waye, K. P., Preis, A., Stansfeld, S., Van den Berg, M., & Verbeek, J. (2018). WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region: A Systematic Review on Environmental Noise and Cardiovascular and Metabolic Effects: A Summary. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(2), 379. <https://doi.org/10.3390/ijerph15020379>
- Heupa, A. B., Gonçalves, C. G. de O., & Coifman, H. (2011). Effects of impact noise on the hearing of military personnel. *Brazilian Journal of Otorhinolaryngology*, 77(6), 747-753. <https://doi.org/10.1590/s1808-86942011000600011>

- Irgens-Hansen, K., Sunde, E., Bråtveit, M., Baste, V., Oftedal, G., Koefoed, V., Lind, O., & Moen, B. E. (2015). Hearing loss in the royal Norwegian navy: a cross-sectional study. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 88(5), 641-649. <https://doi.org/10.1007/s00420-014-0988-8>
- Kerr, M. J., Neitzel, R. L., Hong, O. S., & Sataloff, R. T. (2017). Historical review of efforts to reduce noise-induced hearing loss in the United States. *American Journal of Industrial Medicine*, 60(6), 569-577. <https://doi.org/10.1002/ajim.22627>
- Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales. (2000, 26 de enero). [Real Decreto 1971/1999]. De procedimiento para el reconocimiento, declaración y calificación del grado de minusvalía. BOE: número 22. <https://www.boe.es/eli/es/rd/1999/12/23/1971/con>
- Olarieta, J., García-Alcántara, F., Pérez, N., & Rivera, T. (2015). Hipoacusia. *Medicine*, 11(91), 5445-5454. https://doi.org/10.1007/978-88-470-1649-1_43
- Rodríguez, O. A. (2003). *Determinación de aptitud de protectores auditivos*. <http://www.siafa.com.ar/notisiafa/353/auditivos.pdf>
- Stolk, C., Staetsky, L., Hassan, E., & Kim, C. W. (2012). Management of occupational safety and health: An Analysis of the findings of the European Survey of Enterprises on New and Emerging Risks (ESENER). *European Agency for Safety and Health at Work* (Vol. 3). <https://osha.europa.eu/en/tools-and-publications/publications/reports/management-of-occupational-safety-and-health-analysis-of-data-from-the-esener/view>
- Tepe, V., Smalt, C., Nelson, J., Quatieri, T., & Pitts, K. (2017). Hidden hearing injury: The emerging science and military relevance of cochlear synaptopathy. *Military Medicine*, 182(9), e1785-e1795. <https://doi.org/10.7205/MILMED-D-17-00025>
- Wells, T. S., Seelig, A. D., Ryan, M. A., Jones, J. M., Hooper, T. I., Jacobson, I. G., & Boyko, E. J. (2015). Hearing loss associated with us military combat deployment. *Noise and Health*, 17(74), 34-42. <https://doi.org/10.4103/1463-1741.149574>
- Yankaskas, K., Hammill, T., Packer, M., & Zuo, J. (2017). Editorial: Auditory injury. A military perspective. *Hearing Research*, 349, 1-3. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2017.04.010>

Rehabilitación vestibular en la silla de Barany para el manejo de la aerocinetosis

| Fecha de recibido: 25 de noviembre del 2020 | Fecha de aprobación: 21 de abril del 2021 |

María Alejandra Correa Guarín

Otorrinolaringóloga

Dirección de Medicina Aeroespacial,
Fuerza Aérea Colombiana
Colombia

Rol de investigador: teórico
<https://orcid.org/0000-0001-6015-144X>
✉ correa10aleja@yahoo.com

Sonia Lucía Jaimes Gómez

Médica de Aviación

Dirección de Medicina Aeroespacial,
Fuerza Aérea Colombiana
Colombia

Rol de investigador: teórico
<http://orcid.org/0000-0002-3239-2788>
✉ soniluja@gmail.com

Claudia Marcela Mozo Madariaga

Audióloga

Dirección de Medicina Aeroespacial,
Fuerza Aérea Colombiana
Colombia

Rol de investigador: teórico
<https://orcid.org/0000-0001-7621-0555>
✉ claudimozom@yahoo.es

Cómo citar este artículo: Correa Guarín, M. A., Jaimes Gómez, S. L., & Mozo Madariaga, C. M. (2021). Rehabilitación vestibular en la silla de Barany para el manejo de la aerocinetosis. *Ciencia y Poder Aéreo*, 16(1), 149-157. <https://doi.org/10.18667/cienciaypoderareo.683>



Rehabilitación vestibular en la silla de Barany para el manejo de la aerocinetosis

Resumen: La rehabilitación es una parte de la terapia vestibular que sirve para mejorar el equilibrio, fundamental para el manejo de la aerocinetosis que se presenta en el personal de vuelo. Por esta razón, se decidió establecer un protocolo para realizar la rehabilitación vestibular en la silla de Barany de la Dirección de Medicina Aeroespacial de la Fuerza Aérea Colombiana, con el fin de unificar criterios, según los parámetros de los protocolos definidos por otras fuerzas militares. Para esta demostración, se analizaron los casos de once pilotos que presentaron aerocinetosis, que fueron atendidos en la Dirección de Medicina Aeroespacial desde el 2016 hasta el 2020, y a quienes se les programaron sesiones para el tratamiento, de acuerdo con el protocolo. En estas sesiones se observó la recuperación de todos los pilotos, el mejoramiento de los síntomas y la recuperación de su actividad en vuelo. Adicionalmente se les explicaron las indicaciones que debían seguir para su reintegro laboral.

Palabras clave: enfermedad del movimiento; adaptación vestibular; silla de Barany.

Vestibular Adaptation in the Barany Chair for Handling Motion Sickness

Abstract: Adaptation makes part of vestibular therapy and serves to improve the functioning of the balance system, which is essential for managing motion sickness in flight personnel. For this reason, it was decided to establish a protocol for vestibular adaptation using the Barany chair property of the Colombian Air Force Directorate of Aerospace Medicine, in order to unify criteria around the parameters and protocols defined by other military forces. Eleven pilots affected by motion sickness and treated at the Directorate from 2016 to 2020 participated in the demonstration sessions, which were performed in accordance with the new protocol. During these sessions, researchers could observe the recovery of all pilots, who overcame the symptoms and could get back to their flight activity after receiving instructions on how to reincorporate to their duties.

Keywords: Motion sickness; vestibular adaptation; Barany chair.

Reabilitação vestibular na cadeira de Barany para o manejo da aerocinetose

Resumo: A reabilitação é uma parte da terapia vestibular que serve para melhorar o funcionamento do sistema de equilíbrio, que é fundamental para o manejo da aerocinetose que se apresenta no pessoal de voo. Por esta razão, foi decidido estabelecer um protocolo para realizar a reabilitação vestibular na cadeira de Barany da Direção de Medicina Aeroespacial da Força Aérea Colombiana, com o fim de unificar critérios, segundo os parâmetros dos protocolos definidos por outras forças militares. Para esta demonstração, participaram onze pilotos que apresentaram aerocinetose e que se atenderam na Direção de Medicina Aeroespacial desde 2016 até 2020, a quem foram realizadas sessões estabelecidas de acordo com o protocolo. Nestas sessões se observou a recuperação de todos os pilotos, com resolução dos sintomas e com recuperação de sua atividade em voo. Além disso, foram explicadas as indicações a seguir para a sua reintegração no mercado de trabalho.

Palavras-chave: doença do movimento; adaptação vestibular; cadeira de Barany.

La enfermedad del movimiento es un conjunto de síntomas variados que ocurren en asociación con el movimiento de la persona o su entorno, en este caso, el vuelo. Algunos autores han mencionado que el estrés es un factor psicológico desencadenante de esta afección. Los síntomas que presentan son autonómicos e insidiosos: adormecimiento en las manos, bostezos frecuentes y disminución de la atención, los cuales progresan con la sensación de mareo, sudoración, palidez, salivación, cefalea, náuseas y vómito, lo que produce una incapacidad severa e incluso la pérdida del conocimiento. Estos síntomas generalmente desaparecen a las veinticuatro horas después del cese del estímulo.

La teoría más aceptada para la aerocinetosis es que se trata de un conflicto en el procesamiento de la información del sistema vestibular, visual y propioceptivo, dentro de un sistema sensorial multimodal cuya función está determinada por el movimiento relativo individual y de su ambiente, a la que se le ha llamado la hipótesis del mismatch neural o del desajuste neural, descrita por Benson (Correa & Caputo 2014; Bertolini & Straumann 2016; Lee *et al*, 2012). El grado de aerocinetosis se basa en los síntomas y en la incapacidad que genera al individuo el estímulo de movimiento en el vuelo —tabla 1— (Correa & Caputo, 2014).

Uno de los pilares para el tratamiento de la cinetosis es la habituación vestibular; esta se fundamenta en un fenómeno fisiológico de compensación del sistema vestibular, que se basa en la repetición del estímulo generador de los síntomas. A través del aprendizaje y el reconocimiento, se logra la adaptación del sistema

vestibular al suprimir la respuesta al estímulo (Riveros *et al*, 2007).

Ahora bien, la plasticidad neuronal vestibular se define como una modificación en los tipos de la comunicación entre dos células o dos redes neuronales, la cual permite que se produzca una compensación del sistema central por diferentes mecanismos como la habituación, la adaptación y la sustitución (Riveros *et al*, 2007).

La habituación es una técnica de rehabilitación vestibular descrita inicialmente por Cawthorne y Cooksey, y luego por Norre y De Weerd. El principio de esta técnica se basa en la realización de una serie de ejercicios o estímulos repetitivos, cuya finalidad es desencadenar el cuadro de sensación vertiginosa, hasta que a través de la repetición se consiga la supresión de la respuesta, adaptación y reconocimiento del estímulo desencadenante. Su fundamento radica en la existencia de un conflicto sensorial derivado de la falta de congruencia en la información que llega por la vía vestibular, visual y propioceptiva, que se manifiesta como un cuadro vertiginoso. Mediante la repetición frecuente de la circunstancia desencadenante, se logra la habituación a la sensación vertiginosa hasta que se produce una adaptación (Novoa, 2019).

Este fenómeno de habituación tiene su impacto en el sistema nervioso central que, basado en la repetición de señales erróneas, conforma una nueva “imagen central”, resultado de la estimulación vestibular; finalmente, no se mostrará una información discordante. Al realizar esta repetición aparece un fenómeno de sustitución por aprendizaje de la capacidad de

Tabla 1
Grados de aerocinetosis y entrenamiento

Grado I	Grado II	Grado III	Grado IV
Síntomas leves: náuseas, dispepsia, mareo leve	Síntomas moderados: además de lo anterior, sudoración y sialorrea	Síntomas severos: aumenta la intensidad de los síntomas y palidez	Síntomas incapacitantes: emesis, desorientación, alteración conciencia
Apoyo psicológico	Apoyo psicológico	Apoyo psicológico	Apoyo psicológico
Ejercicios de respiración y relajación	Ejercicios de respiración y relajación	Ejercicios de respiración y relajación	Ejercicios de respiración y relajación
2 sesiones en silla de Barany (un día)	5 sesiones en silla de Barany (dos días y medio)	7 sesiones en silla de Barany (tres días y medio)	10 sesiones en silla de Barany (cinco días)

Fuente: Correa & Caputo (2014)

cada sujeto, para establecer nuevamente la función (López *et al*, 2003).

Una de las formas de realizar la rehabilitación vestibular es por medio de la silla de Barany, nombrada así por el fisiólogo húngaro Robert Barany, Premio Nobel de Fisiología en 1914. Este es un equipo que se utiliza para entrenamiento en fisiología de vuelo, con el propósito de demostrar algunas ilusiones y efectos de la desorientación espacial que provienen del sistema vestibular, así como para realizar entrenamiento en adaptación fisiológica y rehabilitación en personas que presenten cinetosis (Gonzalez-Aguado, 2018).

El test rotatorio es la base del estímulo generado en la silla de Barany, que permite conocer el comportamiento del sistema vestibular, fundamental en la inclusión del movimiento ocular mediante la vía del Reflejo Vestíbulo-Ocular (VOR, por sus siglas en inglés) (Pérez *et al*, 2009 & Sanz *et al*, 2013). En otras palabras, este produce un estímulo del canal semicircular horizontal que desencadena el reflejo vestibulo-ocular, al usar la rotación de la silla.

Las principales indicaciones de este test de rotación son: determinar la hipofunción vestibular bilateral, las patologías centrales, la rehabilitación vestibular y el entrenamiento fisiológico de vuelo (Pérez *et al*, 2009; Sanz *et al*, 2013).

El VOR es uno de los tres reflejos vestibulares y es el responsable de mantener la fijación de los ojos durante la rotación de la cabeza. Este reflejo se basa en el test rotatorio en el que se genera una rotación del ojo con una amplitud igual y opuesta a la dirección del movimiento de la cabeza, como resultado de la estimulación vestibular (Herdman & Clendaniel, 2014). El reflejo tiene un componente angular que está vinculado por los canales semicirculares, encargados de compensar la rotación y estabilizar la mirada. Además, tiene un componente lineal, mediado por los otolitos, que compensan el movimiento de translación. Este reflejo de movimiento se utiliza al ver objetos cercanos y al mover la cabeza a alta frecuencia (Sánchez *et al*, 2014).

Las crestas ampulares de cada canal semicircular horizontal se disponen perpendicularmente al eje del canal. Estas están constituidas por células

neuroepiteliales pilosas que presentan estereocilios, y uno de mayor tamaño llamado kinocilio, orientado hacia el utrículo en el canal horizontal, y hacia el canal en los canales verticales. Según la segunda ley de Ewald, las corrientes hacia la ampolla (ampulipetas) generan una descarga excitatoria y las ampulifugas una descarga inhibitoria, mientras que en los canales verticales ocurre lo contrario, pues las ampulipetas inhiben y las ampulifugas excitan (Pérez *et al*, 2009; Sanz *et al*, 2013).

Al mover la cabeza a la derecha, el VOR genera que el flujo endolinfático desplace la cúpula a la izquierda, lo que produce un aumento de la descarga de las células ciliadas del canal horizontal derecho y decrece las descargas de las células ciliadas del canal horizontal izquierdo. El nervio vestibular transmite la información a los núcleos vestibulares medial y superior y al cerebelo; el estímulo excitatorio es transmitido hasta el núcleo oculomotor que estimula el músculo ocular recto medial ipsilateral derecho y el recto lateral contralateral izquierdo; posteriormente, el impulso inhibitorio se transmite al núcleo del músculo recto lateral ipsilateral derecho y recto medial contralateral izquierdo y, de este modo, provoca el movimiento compensatorio a la izquierda (Herdman & Clendaniel, 2014).

La respuesta vestibular a un estímulo impulsivo es un nistagmo, cuya velocidad en la fase lenta decrece en el tiempo, si se mantiene una velocidad constante del estímulo (Pérez *et al*, 2009; Sanz *et al*, 2013). Dicha respuesta tiene tres componentes: el primero es mecánico y depende del desplazamiento de la cúpula en contraposición a tres fuerzas del complejo cúpula-endolinfa (inercia, elasticidad y viscosidad), lo que hace que los canales semicirculares se vuelvan menos sensibles a los movimientos de oscilación. El segundo es de origen central y supone el procesamiento de la señal que llega del nervio, permitiendo que la señal inicial se prolongue en el tiempo y dure más, fenómeno que se denomina *almacenamiento de velocidad*, y que refleja la señal de entrada en un circuito de retroalimentación positiva. El tercer componente es la adaptación que tiene origen a nivel central, la cual permite que la respuesta decline progresivamente y no persevere de manera indefinida (Zuma E Maia *et al*, 2017).

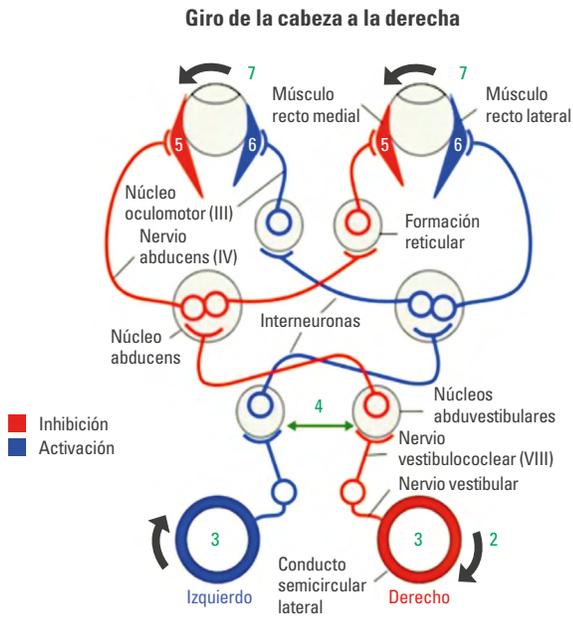


Figura 1. Reflejo Vestíbulo Ocular

Fuente: Highstein (1998).

Asimismo, se pueden realizar dos pruebas con el test rotacional: una impulsiva, en donde se aplica una aceleración angular para alcanzar una velocidad constante durante un minuto, lo que provoca un nistagmo derecho si la rotación es horaria, y uno izquierdo si la rotación es antihoraria, y después de una desaceleración rápida se genera un nistagmo inverso (ilusión somatogiratoria). La otra prueba es la sinusoidal, en la que se emplean estímulos complejos variados en el eje vertical y horizontal, para lograr la estimulación adecuada. Al paciente se le flexiona la cabeza treinta grados para que los canales queden en el plano —ilusión de coriolis— (Islam *et al*, 1997). Teniendo en cuenta estas premisas, se propuso aplicar un protocolo de rehabilitación en la silla de Barany a los pilotos con aerocinetosis.

Material y métodos

Se realizó un estudio observacional, descriptivo y de corte transversal de los pacientes que asistieron a la Dirección de Medicina Aeroespacial desde el 2016

hasta el 2020. En total fueron once pacientes, hombres con aerocinetosis grado IV, con edades entre los 19 y 22 años, pilotos en formación, sin otras patologías asociadas, a quienes se les realizó el protocolo de rehabilitación vestibular en la silla de Barany de Environmental Tectonics Corporation 1997, que es un simulador de ilusiones vestibulares. Se realizaron diez sesiones en total, dos diarias durante cinco días. Todos los pacientes regresaron a su actividad de vuelo al terminar la rehabilitación y se encontró una mejoría en el cuadro que los hizo suspender su actividad de vuelo.

La silla de Barany está constituida por una cabina con una silla con pedales y un *stick*, un eje de montaje, y una consola de instrucción que tiene como objetivo dar un entrenamiento de fisiología y adaptación vestibular. Este equipo de ingeniería para entrenamiento fisiológico está conforme a los estándares militares utilizados para la preparación del personal de vuelo —figura 2—. A su vez, está diseñado para simular las ilusiones de vuelo, las cuales son replicadas por la rotación en el eje axial, y provocan una falsa sensación de movimiento y la ilusión de coriolis. Esos efectos son inducidos a través de la rotación de la silla con las manecillas del reloj o en contra de ellas, cuya capacidad de rotación es ajustable de cero a veinticinco revoluciones por minuto, con un controlable rango de aceleración desde un nivel sublímite a setenta y cinco grados por segundo cuadrado, el cual simula el test de silla rotatoria.

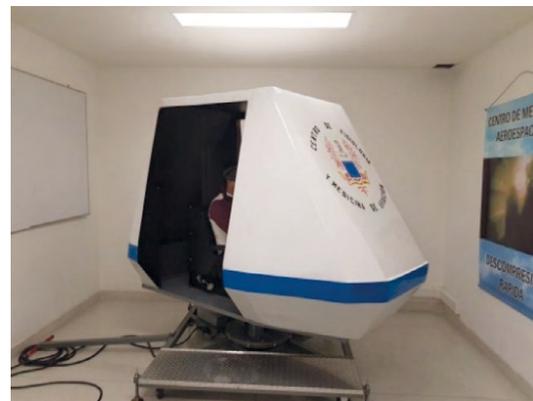


Figura 2. Silla de Barany, Environmental Tectonics Corporation 1997

Fuente: elaboración propia.

Las ilusiones vestibulares que se pueden generar en la silla de Barany son las siguientes: ilusión somatogiratoria y cinco tipos diferentes de ilusión de coriolis que se logran mediante movimientos de la cabeza en diferentes ejes, al tiempo que se lleva a cabo el movimiento de rotación de la silla, simulando el test de silla rotatoria.

Los síntomas que se presentan en los participantes durante el vuelo, con el estímulo en la silla, se gradúan a partir de la clasificación subjetiva de síntomas descrita por la Fuerza Aérea de los Estados Unidos (USAF por sus siglas en inglés), la cual se toma como referencia para realizar la graduación de los síntomas durante las sesiones de rehabilitación vestibular, con el fin de determinar si pueden o no continuar con la terapia en la silla de Barany —ver tabla 2—.

Tabla 2
Grados de los síntomas presentados por los alumnos durante el vuelo

Grado de mareo	Descripción
1-3	Refiere mínima sensación de náuseas o malestar, no afecta sus actividades en el vuelo.
4-6	Refiere moderada sensación de náuseas, puede desviarse del plan de vuelo. Ejemplo en la dirección y altura.
7-9	Refiere mucha sensación de náuseas, detienen su actividad de vuelo. Transfiere el control del vuelo.
10	Puede presentar vómito, lipotimia, pérdida control del vuelo.

Fuente: Air Force (2020).

Para iniciar el entrenamiento de rehabilitación vestibular, primero se plasmó la historia clínica de cada paciente, y se obtuvo la información sobre los síntomas, evolución, eventos relacionados con estos, síntomas asociados, eventos que generan la sensación y tratamientos recibidos. Además, se realizó la valoración por Otorrinolaringología, Medicina Aeroespacial y Psicología, y se efectuaron los estudios audiológicos y paraclínicos necesarios. Estas acciones permitieron determinar el grado de aerocinetosis que presentaba cada piloto y establecer el número de sesiones que se les realizarían a cada paciente (Correa & Caputo, 2014).

Al iniciar las sesiones se les explicó a los pilotos qué es la aerocinetosis y se compartió información sobre la terapia vestibular, así como la forma como deberían respirar durante el desarrollo de esta. En cada sesión se hicieron progresivamente los ejercicios de ilusión somatogiratoria y coriolis, aumentando su intensidad según la tolerancia del paciente; esta última fue valorada a través de los síntomas que presentaban durante el estímulo y clasificada en la tabla 2, si presentaban síntomas grado 7-9, se suspendía el ejercicio.

El objetivo es que el paciente soporte la terapia vestibular por un periodo de veinte minutos continuos, con síntomas que pueda controlar. Dicha terapia siempre debe ir acompañada con ejercicios de respiración, ya que la relajación producida por una respiración adecuada disminuye el estrés y los síntomas durante el ejercicio, lo que mejora la concentración en la silla de Barany. La técnica de respiración más usada consiste en una inspiración nasal profunda regular, en un solo movimiento, se retiene el aire y después se expulsa por nariz o boca. Los datos fueron tomados de la historia clínica de los pacientes y de lo registrado en cada sesión de terapia vestibular. Se realizó la base de datos en Excel con las mediciones requeridas en este programa.

Resultados

En el periodo comprendido desde el 2016 hasta el 2020, en la Dirección de Medicina Aeroespacial se atendieron once pacientes pilotos, alumnos de la FAC con aerocinetosis grado IV. Inicialmente se les hizo una valoración por Otorrinolaringología, Medicina Aeroespacial y Psicología, para descartar patología vestibular o sistémica y determinar su motivación hacia la actividad de vuelo. El promedio de edad de este grupo de pacientes fue de 19 a 22 años, hombres en su totalidad, y cuyos síntomas limitaban su actividad de vuelo. Todos refirieron que en la infancia se mareaban con el olor de la gasolina y con el movimiento de diferentes tipos de transporte. Se les realizaron exámenes audiológicos con resultados normales, y laboratorios como

hemograma, perfil lipídico, glicemia y la prueba de Hormona Estimulante de Tiroides (TSH, por sus siglas en inglés), que se encontraban dentro de parámetros normales.

Se les inició el protocolo de habituación vestibular en la silla de Barany a los once pacientes, con diez sesiones de veinte minutos, dos sesiones al día, durante las cuales se les sometía a estímulos somatogiros y coriolis según la tolerancia del paciente y en forma progresiva; además, se les midió los síntomas que presentaban en las sesiones, de acuerdo con la clasificación de la tabla 2. En la figura 3 se describen los síntomas detectados en las sesiones uno, tres y diez. Allí se puede observar que a medida que el piloto se estimula, los síntomas disminuyen y es posible controlarlos.

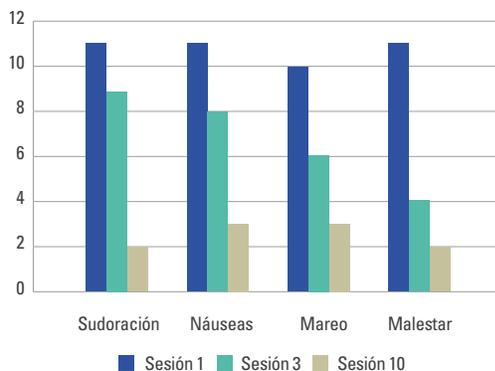


Figura 3. Síntomas presentados en las sesiones 1, 3 y 10 de rehabilitación
Fuente: elaboración propia.

Además, se determinó que durante la terapia vestibular los síntomas descritos tuvieron una mayor intensidad con los estímulos de coriolis, y que los pacientes reconocieron la importancia de conocer qué es la aerocinetosis y su fisiopatología, como estrategia para ayudarlos a controlar sus síntomas.

Al terminar la terapia de habituación vestibular, se les dio nuevamente la información del anexo 1 para continuar las actividades en su lugar de trabajo, y se les sugirió reiniciar sus actividades de vuelo en los siguientes tres días, después de terminar las sesiones. Después se hizo seguimiento a los once pacientes y se concluyó que todos retomaron sus actividades de vuelo sin ninguna limitación.

Conclusión

La aerocinetosis, o enfermedad del movimiento, es una alteración fisiológica presentada ante la percepción del movimiento, en este caso, generada por el vuelo. Esta enfermedad provoca discapacidad a los tripulantes en su actividad laboral. Además, se han identificado algunos factores predisponentes y de susceptibilidad individual. Uno de los pilares del tratamiento es la rehabilitación vestibular, que se basa en la repetición del estímulo de movimiento, lo que ocasiona una supresión de la respuesta y, en consecuencia, un aprendizaje y acomodación al estímulo. Por lo tanto, se pudo observar que los pacientes mejoraron en el manejo de los síntomas y en el autocontrol de estos y después fueron reintegrados a sus labores de vuelo sin presentar ningún inconveniente.

De acuerdo con lo anterior, se evidencia el beneficio de la rehabilitación vestibular en la aerocinetosis. Aunque en el ámbito académico todavía existe controversia sobre el origen de la fisiopatología de la aerocinetosis y su tratamiento, está claro que la habituación vestibular es efectiva para la resolución de los síntomas que se generan, y que la educación dada a los pilotos sobre esta condición, su prevención y manejo, es fundamental para obtener buenos resultados.

Declaración de conflicto de interés: Las autoras no manifiestan conflictos de interés institucionales ni personales.

Referencias

- Air Force. (2020). *Aerospace Physiological Training Program*. Air Force Instruction AF111-403.
- López, O. A., Fernández, N. P. & Sánchez, N. (2003). Rehabilitación vestibular. *Revista de Medicina de La Universidad de Navarra*, XLVII(4), 72-76. <https://revistas.unav.edu/index.php/revista-de-medicina/article/view/9064>
- González-Aguado, R. (2018). Prueba rotatoria. Técnica e interpretación. *Revista ORL*, 9(3), 215-219. <https://doi.org/10.14201/orl.17717>
- Bertolini, G. & Straumann, D. (2016). Moving in a Moving World: A Review on Vestibular Motion Sickness. *Frontiers in*

- Neurology*, 7(14). <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fneur.2016.00014/full#B2>
- Correa, M. A. & Caputo, L. A. (2014). Aerocinetosis: más que enfermedad desadaptación. *Ciencia y Poder Aéreo*, 9(1), 17-25. <https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaereo.129>
- Herdman, S. J. & Clendaniel, R. (2014). *Vestibular Rehabilitation*. F.A. Davis Company. <https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=tEEWBAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR3&dq=Herdman>
- Highstein, S. M. (1998). Role of the flocculus of the cerebellum in motor learning of the vestibulo-ocular reflex. *Otolaryngology--Head and Neck Surgery: Official Journal of American Academy of Otolaryngology-Head and Neck Surgery*, 119(3), 212-220. [https://doi.org/10.1016/S0194-5998\(98\)70056-7](https://doi.org/10.1016/S0194-5998(98)70056-7)
- Koch, A., Cascorbi, I., Westhofen, M., Dafotakis, M., Klapa, S. & Kutzt-Buschbeck, J. P. (2018). The Neurophysiology and Treatment of Motion Sickness. *Deutsches Arztblatt Online*, 115(41). <https://doi.org/10.3238/arztebl.2018.0687>
- Lee, Y. J., Shin, J. E., Park, M. S., Kim, J. M., Na, B. R., Kim, C. H. & Park, H. J. (2012). Comprehensive Analysis of Head-Shaking Nystagmus in Patients with Vestibular Neuritis. *Audiology and Neurotology*, 17(4), 228-234. <https://doi.org/10.1159/000336958>
- Lucertini, M., Verde, P. & Trivelloni, P. (2013). Rehabilitation from Airsickness in Military Pilots: Long-Term Treatment Effectiveness. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 84(11), 1.196-1.200. <https://doi.org/10.3357/ase.3509.2013>
- Novoa, C. I. (2019). Mecanismos neurofisiológicos de la rehabilitación vestibular. *Revista de Otorrinolaringología y Cirugía de Cabeza y Cuello*, 79(2), 240-247. <https://doi.org/10.4067/s0718-48162019000200240>
- Pérez-Fernández, N., Boleas-Aguirre, M.S. & Sanz-Martín, E. (2009). *Prueba rotatoria. Atlas de pruebas vestibulares para especialistas en otorrinolaringología*. Vanguard Gráfico.
- Riveros, H., Correa G. C., Anabalón B, J. L. & Aranís, J. C. (2007). Efectividad de la rehabilitación vestibular en una serie clínica. *Revista de Otorrinolaringología y Cirugía de Cabeza y Cuello*, 67(3), 229-236. <https://doi.org/10.4067/S0718-48162007000300004>
- Sánchez, C., Yañez R., Benito, J. I., Gordon C. R. & Batuecas, A. (2014). Cinetosis. *Revista de la Sociedad Otorrinolaringológica de Castilla y León*, 5(28), 233-251. gredos.usal.es/bitstream/handle/10366/124985/revision/taorl201428_cinetosis.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Sanz Martín, E., Sánchez, E., Zschaek Luzardo, C., Rodríguez R.M., Ramos González, O. & Portero de la Plaza, A. (2013). VIII Congreso de la Asociación Madrileña de Otorrinolaringología: interpretación de pruebas vestibulares. *Luminar SL*. 25-40.
- Zuma E Maia, F. C., Cal, R., D'Albora, R., Carmona, S. & Schubert, M. C. (2017). Head-shaking tilt suppression: a clinical test to discern central from peripheral causes of vertigo. *Journal of Neurology*, 264(6), 1.264-1.270. <https://doi.org/10.1007/s00415-017-8524-x>

Anexo 1 Aerocinetosis

Recomendaciones Dirección de Medicina Aeroespacial María Alejandra Correa y Luz Amparo Caputo

¿Qué es la aerocinetosis?

Es un conflicto sensorial que genera náuseas y mareo durante el movimiento y que depende del historial de mareos previos de los pacientes en el momento de utilizar medios de transporte o con olores fuertes como la gasolina. Esta condición también puede presentarse por episodios de ansiedad o asociarse a alguna enfermedad sistémica.

Según los síntomas que presentan los grados de aerocinetosis así:

Grado	Síntomas	Limitación en actividades
1	Náuseas, dolor estómago, mareo leve.	No limitación en sus actividades de vuelo.
2	Náuseas, mareo, sudoración, sialorrea.	Realiza las actividades de vuelo, pero evita los movimientos fuertes.
3	Aumenta los síntomas anteriores y surge el dolor en la boca del estómago.	Limita sus actividades de vuelo.
4	Vómito, decaimiento, dolor de cabeza, confusión, desorientación.	Limita actividades, requiere atención médica.

Hay factores que predisponen la aparición de estos síntomas

1. Ansiedad, estrés.
2. Olores.
3. Ayuno, alimentación.
4. Temperatura.
5. Acrobacias en el vuelo.

Tratamiento

Se debe evitar el uso de medicamentos, por lo tanto, es necesario realizar los siguientes ejercicios en casa tres veces al día con diez repeticiones de cada uno.

Movimientos oculares:

1. Mirar de izquierda a derecha.
2. Mirar arriba y abajo.
3. Rotación ocular horaria y antihoraria.

Movimientos de la cabeza:

1. Flexión y extensión de la cabeza (mentón-esternón / dorso-nuca).
2. Rotación de la cabeza (izquierda-derecha-izquierda).
3. Inclinación lateral (oído-hombro).
4. Rotación completa horaria y antihoraria.

Movimientos de pie:

Primero con los ojos abiertos, posteriormente con los ojos cerrados.

1. Flexión del tronco con los pies juntos (mano derecha pie derecho, mano izquierda pie izquierdo).

2. Flexión del tronco con rotación de la cabeza (izquierda-derecha-izquierda).
3. Flexión del tronco con rotación del tronco con los pies separados (mano derecha-pie izquierdo/ mano izquierda- pie derecho).
4. Rotación del tronco horario y antihorario.

Movimientos de brazos y cuerpo:

1. Sentarse y girar la cintura a la derecha y luego izquierda.
2. Sentarse e inclinarse hacia adelante para recoger un objeto del piso, volver a la posición inicial, después agacharse y dejar el objeto en el suelo nuevamente.

Indicaciones de alimentación

1. Comer 2 o 3 horas antes de la actividad de vuelo.
2. Evitar alimentos ácidos.
3. Evitar bebidas carbonatadas.
4. Evitar bebidas oscuras (tinto, chocolate, té).
5. Evitar comidas grasosas.
6. Evitar el cigarrillo.
7. Mantener una hidratación adecuada.
8. Horas de descanso.
9. Tener una rutina de actividad física.

Recomendaciones durante el vuelo

1. Usar una buena técnica de respiración.
2. Evitar movimientos de cabeza fuertes.
3. Mover los dedos de los pies si los siente fríos o sudorosos.
4. Masticar chicle durante el vuelo.
5. Si presenta mareo, fijar la mirada en los instrumentos de la nave.



| Fotografía: Revista Aeronáutica, Fuerza Aérea Colombiana |

Ciencia y Poder Aéreo

Revista Científica de la Escuela de Postgrados
de la Fuerza Aérea 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 Aérea Colombiana. Su objetivo es comunicar los resultados de investigación en los temas de 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 revista Ciencia y Poder Aéreo es un medio de comunicación de artículos productos de investigación y de desarrollo tecnológico, de reflexión, y de revisión temática. Estos artículos deben ser inéditos, originales, de alta calidad, y rigurosos. Los artículos tienen que tratar los temas de Seguridad Operacional y Logística Aeronáutica, Gestión y Estrategia, Tecnología e Innovación y Educación y TIC. La revista se constituye como un punto de encuentro de la comunidad científica, nacional e internacional en torno al sector aeroespacial, ofreciendo aportes significativos al campo de las ciencias sociales y exactas.

___ **Visión.** La revista Ciencia y Poder Aéreo se concibe como uno de los principales medios de comunicación científica en el sector aeroespacial, tanto en el campo de la ingeniería, la administración, como en las ciencias sociales y humanas. Publicará artículos originales e inéditos, resultado de actividades académicas, investigativas y profesionales, los cuales poseerán un alto grado de relevancia para la ciencia, tecnología e innovación nacional, regional e internacional. La calidad de sus

manuscritos generará un aumento de los índices de visibilidad de la publicación en distintas esferas. También será reconocida en el medio académico, científico y empresarial el sector aeroespacial nacional e internacionalmente. La revista hará parte de las 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 Ciencia y Poder Aéreo, Revista Científica de la Escuela de Postgrados de la Fuerza Aérea Colombiana.

Ciencia y Poder Aéreo

Scientific Journal of the Postgraduate School
of the Colombian Air Force

ISSN: 1909-7050 - E-ISSN 2389-9468

— **Aim and Scope.** *Ciencia y Poder Aéreo* is a biannual scientific journal, edited by the Postgraduate School of the Colombian Air Force. It is aimed to contribute to the dissemination of research results on the fields of Operational Safety and Aviation Logistics, Management and Strategy, Technology and Innovation, and education and ICT. The journal also seeks to contribute to Colombian technological and scientific development, generating new knowledge and creating opportunities for discussion and reflection.

— **Mission.** *Ciencia y Poder Aéreo* is a communication means of research and technological development papers, and reflection and review articles. Proposals must be unpublished works with high academic quality and scientific rigor, focused on Operational Safety and Aviation Logistics, Management and Strategy, Technology and Innovation issues, and education and ICT. The journal is a meeting point for the Colombian and international scientific community around the aerospace sector, offering significant contributions to the fields of Social and Exact Sciences.

— **Vision.** *Ciencia y Poder Aéreo* is considered as one of the main scientific communication means in the aerospace industry, both in the field of engineering and administration and within Social and Human Sciences. The journal will edit original and unpublished articles derived from academic, research and professional activities, with a high impact on science, technology, and innovation at the national, regional and international levels. The quality of submissions will generate

an increase in the journal's visibility indexes in different areas. *Ciencia y Poder Aéreo* will also be recognized in the academic, scientific and business environment of the national and international aerospace industry. The journal will be included in specialized databases and indexed in Scopus and the 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 Postgraduate School of the Colombian Air Force.

Ciencia y Poder Aéreo

Revista científica da Escola de Pós-Graduação
da Força Aérea Colombiana

ISSN: 1909-7050 - E-ISSN 2389-9468

___ **Enfoque e alcance.** A revista científica Ciencia y Poder Aéreo é uma publicação semestral, editada pela Escola de Pós-Graduação da Força Aérea Colombiana. Seu objetivo é comunicar os resultados de pesquisa nos temas de 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 é um meio de comunicação de artigos resultado de pesquisa e de desenvolvimento tecnológico, de reflexão, e de revisão temática. Estes artigos devem ser inédito, originais, de alta qualidade, e rigurosos. Os artigos têm que abordar os temas de Segurança Operacional e Logística na Indústria Aeronáutica, Gestão e Estratégia, Tecnologia e Inovação e educação e TIC. A revista se constitui como um ponto de encontro da comunidade científica, nacional e internacional em torno da indústria aeroespacial, oferecendo contribuições significativas ao campo das ciências sociais e exactas.

___ **Visão.** A revista Ciencia y Poder Aéreo é concebida como um dos principais meios de comunicação científica na indústria aeroespacial, tanto quanto no campo da engenharia e administração, como nas ciências sociais e humanas. Desta forma publicará artigos originais e inéditos, resultado de atividades acadêmicas, de pesquisas e profissionais, as quais terão um alto grau de relevância para a ciência, tecnologia e inovação nacional, regional e internacional. A qualidade dos

seus manuscritos gerarão um aumento dos índices de visibilidade da publicação em diferentes esferas. Do mesmo modo, será reconhecida no meio acadêmico, científico e empresarial na indústria aeroespacial nacional e internacionalmente. A revista fará parte das bases de dados especializadas e estará indexada em 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 Escola de Pós-Graduação da Força Aérea Colombiana.

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:

- 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/cienciaypoderaereo>) o al correo cienciaypoderaereo@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 Aérea Colombiana.

Normas generales

Todo artículo debe:

- Pertenecer a los ámbitos de Seguridad Operacional y Logística Aeronáutica, Gestión y Estrategia, Tecnología e Innovación, y Educación y TIC.
- 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 la Seguridad Operacional y Logística Aeronáutica, la Gestión y Estrategia, la Tecnología e Innovación y 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.

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@efac.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:

- Operational Safety and Aviation Logistics.
- Management and Strategy.
- Technology and Innovation.
- Education and ICTs.

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
- 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 Graduate School of the Colombian Air Force.

General Guidelines

All submissions must:

- Belong to the areas of Operational Safety and Aeronautical Logistics, Management and Strategy, Technology and Innovation, and Education and ICTs.
- 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 Operational Safety and Aeronautical Logistics, Management and Strategy, Technology and Innovation, and Education and ICTs 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

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

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:

- 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
- 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 Escola de Pós-Graduação da Força Aérea Colombiana.

Normas gerais

Todo artigo deve:

- Fazer referência às áreas relacionadas a Segurança Operacional e Logística na Indústria Aeronáutica, Gestão e Estratégia, Tecnologia e Inovação, e Educação e TIC.

- 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 Segurança Operacional, 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.

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



CIENCIA Y PODER AÉREO

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

Institución Universitaria, Resolución 1906 MEN, agosto del 2002

Enero-junio del 2021 | pp. 1-170

01

Vol. 16

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

Vol. 16 n.º 1 | enero-junio del 2021 | pp. 1-170 | ISSN 1909-7050 E-ISSN 2389-9468

Doi: <https://doi.org/10.18667/issn.1909-7050> | Bogotá, Colombia | Periodicidad semestral

