

# Ciencia y Tecnología

“La ciencia mi ruta, mi meta el espacio”.  
Avances y desafíos en la investigación aérea y espacial



**Colección:**  
Gestión, Ciencia y Poder Aeroespacial



**EMAVI**  
SELLO EDITORIAL

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

Ciencia y Tecnología “La ciencia mi ruta, mi meta el espacio”. Avances y desafíos en la investigación aérea y espacial

Ciencia y Tecnología “La ciencia mi ruta, mi meta el espacio”. Avances y desafíos en la investigación aérea y espacial / Guerra, Laura ... [y otros 27]; -Santiago de Cali: Sello Editorial Escuela Militar de Aviación “Marco Fidel Suárez” EMAVI, 2024.

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

Incluye bibliografía al final de cada capítulo

ISBN (Impreso): 978-628-96090-2-8

ISBN (Digital): 978-628-96090-3-5

(Colección: Gestión, Ciencia y Poder Aeroespacial)

1. Tecnología satelital – Colombia 2. Inteligencia Artificial – Colombia – 3. Simulador- 4. CubeSat

I. Gómez Muñoz, Oscar Mauricio (prólogo), II. Agudelo, Daniel (autor), III. Morales, Oscar (autor), IV. Osorio, John (autor), V. Herrera, José (autor), VI. Cabrera Narváez, Nelson Andrés (autor), VII. Domínguez Pombo, Mario Germán (autor), VIII. Hidalgo Arciniegas, Andrés Camilo (autor), IX. Cervantes Estrada, Luis Carlos (autor), X. Mosquera Castro, Albanid (autor), XI. Romero Palacios, Wilson Eduardo (autor), XII. Amelines Chamorro, Francia Elena (autor), XIII. Jara Vargas, María del Pilar (autor), XIV. Estrada López, Hernán David (autor), XV. Moreno Calderón, Lida Victoria (autor), XVI. Cárdenas García, Juan Manuel (autor), XVII. Rincón Urbina, Sonia Ruth (autor), XVIII. Pirazan Villanueva, Karen Nicole (autor), XIX. Salek Chaves, Dib Ziyari, (autor), XX. Molina Conde, Mayra Alejandra, (autor), XXI. Duarte López, Geana Marcela, (autor), XXII. Henao Valencia, Salomé (autor), XXIII. Ortega-Gómez, Juan Arturo (autor), XXIV. Caicedo-Angulo, Julio César (autor), XXV. Ortiz-Ortiz, Christian, (autor), XXVI. Rodríguez-Sánchez, María del Pilar, (autor), XXVII. Román Montoya, Santiago (autor), XXVIII. Colombia. Fuerza Aérea Colombiana. Escuela Militar de Aviación “Marco Fidel Suárez” (EMAVI).

500.5 -dc 21.

QB500 .C54 2004

Catálogo SIBFuP 991315614107231

### Ciencia y Tecnología “La ciencia mi ruta, mi meta el espacio”. Avances y desafíos en la investigación aérea y espacial.

Colección: Gestión, Ciencia y Poder Aeroespacial

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

©EMAVI Sello Editorial

©Varios autores

#### Dirección

CR. Oscar Mauricio Gómez Muñoz

#### Subdirección

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

#### Comando Grupo Académico

TC. Kenny Leonardo Moreno Delgado

#### Jefe Sección Investigación

MY. Héctor Fabio Calvo Valencia

1ra. Edición: 100 ejemplares

Santiago de Cali, Valle del Cauca, 2024

#### Sección Investigación EMAVI

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

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

#### Apoyo Gestión de Publicaciones Científicas

PS. Diana María Mosquera Taramuel

diana.mosquerat@emavi.edu.co

#### Corrección de Estilo:

Raúl Eduardo Chacón Hernández

#### Diseño y Diagramación Editorial:

Chako Hdnz

Publicado en Colombia–Published in Colombia

#### Contenido relacionado

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

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

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

# Ciencia y Tecnología

## “La ciencia mi ruta, mi meta el espacio”.

Avances y desafíos en la investigación aérea y espacial



**Colección:**

Gestión, Ciencia y Poder Aeroespacial

### **Autores:**

Daniel Agudelo, Laura Guerra, Oscar Morales, John Osorio, José Herrera, Nelson Andrés Cabrera Narváez, Mario Germán Domínguez Pombo, Andrés Camilo Hidalgo Arciniegas, Luis Carlos Cervantes Estrada, Albanid Mosquera Castro, Wilson Eduardo Romero Palacios, Francia Elena Amelines Chamorro, María del Pilar Jara Vargas, Hernán David Estrada López, Lida Victoria Moreno Calderón, Juan Manuel Cárdenas García, Sonia Ruth Rincón Urbina, Karen Nicole Pirazan Villanueva, Dib Ziyari Salek Chaves, Mayra Alejandra Molina Conde, Geana Marcela Duarte López, Salomé Henao Valencia, Juan Arturo Ortega-Gómez, Julio César Caicedo-Angulo, Christian Ortiz-Ortiz, María del Pilar Rodríguez-Sánchez y Santiago Román Montoya.





# Contenido

---

<b>Introducción</b>	<b>7</b>
<b>Prólogo</b>	<b>9</b>
<b>Capítulo 1.</b>	<b>13</b>
<b>Uso de tecnología satelital para el seguimiento de la emergencia del Volcán Nevado del Ruiz</b>	
Daniel Agudelo, Laura Guerra, Oscar Morales, John Osorio y José Herrera <i>/ Fuerza Aérea Colombiana - Centro Nacional de Observación Aeroespacial</i>	
<b>Capítulo 2.</b>	<b>43</b>
<b>Integración de herramientas digitales en la enseñanza de modelos dinámicos en el Álgebra Booleana, un ejemplo en modelación aeroespacial</b>	
Nelson Andrés Cabrera Narváez y Mario Germán Domínguez Pombo <i>/ Institución Universitaria Antonio José Camacho</i>	
<b>Capítulo 3.</b>	<b>69</b>
<b>Desafíos y oportunidades en Inteligencia Artificial para docentes de la Escuela de Cadetes de Policía</b>	
Andrés Camilo Hidalgo Arciniegas y Luis Carlos Cervantes Estrada <i>/ Escuela de Cadetes de Policía General Francisco de Paula Santander</i>	
<b>Capítulo 4.</b>	<b>95</b>
<b>Auditoría Ambiental. Un reto empresarial</b>	
Albanid Mosquera Castro / <i>Universidad Libre - Seccional Cali</i> Wilson Eduardo Romero Palacios / <i>Corporación Universitaria Centro Superior, Unicuces</i> Francia Elena Amelines Chamorro / <i>Institución Universitaria Antonio José Camacho, Uniaje</i> María del Pilar Jara Vargas / <i>Corporación Universitaria Centro Superior, Unicuces</i>	

<b>Capítulo 5.</b>	<b>107</b>
<b>Diseño del Sistema Mecánico de Movimientos de un Simulador de Helicóptero Bell 212</b>	
Hernán David Estrada López y Lida Victoria Moreno Calderón <i>/ Escuela Militar de Aviación “Marco Fidel Suárez” Fuerza Aérea Colombiana</i>	
<b>Capítulo 6.</b>	<b>121</b>
<b>Experiencia FACSAT-2 “Chiribiquete”: selección y gestión del Servicio de Lanzamiento en carga compartida para un nanosatélite</b>	
Juan Manuel Cárdenas García, Sonia Ruth Rincón Urbina, Karen Nicole Pirazan Villanueva, Dib Ziyari Salek Chaves y Mayra Alejandra Molina Conde <i>/ Centro de Investigación en Tecnologías Aeroespaciales – Fuerza Aérea Colombiana</i>	
<b>Capítulo 7.</b>	<b>153</b>
<b>Influencia de las realidades extendidas en el uso de simuladores para Misiones Aeroespaciales</b>	
Geana Marcela Duarte López y Salomé Henao Valencia <i>/ Aula STEM FabLab - Dirección Académica, Universidad Nacional de Colombia</i>	
<b>Capítulo 8.</b>	<b>173</b>
<b>Modelo de Gestión del Aprendizaje para la Innovación: el caso de caracterización de materiales de ingeniería en el laboratorio de RDAI-GRUPOS RDAI Y TPRM-E.I.MAT-UNIVALLE</b>	
Juan Arturo Ortega-Gómez / <i>E.I.I. – Universidad del Valle</i> Julio César Caicedo-Angulo / <i>E.I.MAT. - Universidad del Valle</i> Christian Ortiz-Ortiz / <i>E.I.MAT. - Universidad del Valle</i> María del Pilar Rodríguez-Sánchez / <i>Universidad Autónoma de Occidente</i>	
<b>Capítulo 9. Procesamiento de fotografías aéreas para la creación de modelos tridimensionales referentes a representación de espacios</b>	<b>191</b>
Santiago Román Montoya <i>/ Aula STEM FabLab, Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales</i>	

# Introducción

En esta quinta entrega de la Colección Gestión, Ciencia y Poder Aeroespacial, se exploran los avances más recientes y significativos de Colombia en los campos científico y tecnológico, con un énfasis particular en la investigación y exploración espacial. Este volumen recopila investigaciones de gran relevancia, presentadas durante la Semana Universitaria EMAVI 2023, que reflejan el compromiso y el rigor académico de las ponencias destacadas en el evento.

Los temas abordados incluyen la utilización de observaciones remotas para proteger a comunidades vulnerables ante amenazas volcánicas, subrayando el papel crucial de la ciencia en la prevención de desastres. También se discute la integración de herramientas digitales en la enseñanza de modelos dinámicos en álgebra booleana, fundamentales para la formación de ingenieros aeroespaciales. La inteligencia artificial se presenta como un motor de cambio en diversas aplicaciones, mientras que la auditoría ambiental emerge como una herramienta estratégica indispensable para la toma de decisiones empresariales sostenibles, proporcionando un marco para que las empresas adopten prácticas responsables en su entorno.

Además, se destacan innovaciones en el diseño de sistemas mecánicos para simuladores de helicópteros, así como experiencias pioneras en el lanzamiento de nanosatélites, que ilustran el ingenio y la innovación continua en el sector aeroespacial. Estas iniciativas no solo buscan mejorar la capacitación profesional, sino también reducir costos operacionales, aumentando la eficiencia y eficacia en el ámbito.

La influencia de las realidades extendidas en el uso de simuladores y la gestión del aprendizaje para la innovación se examina en profundidad, mostrando cómo estas tecnologías están transformando la forma en que se adquiere y aplica el conocimiento, con un impacto tangible en la formación de nuevas generaciones de profesionales.

Todos estos avances no solo representan un progreso en el ámbito científico y tecnológico, sino que también tienen un impacto directo y positivo en la sociedad colombiana. Desde la mejora en la capacidad de monitoreo de desastres naturales hasta la optimización de la educación a través de tecnologías avanzadas, estas investigaciones ofrecen aplicaciones prácticas que benefician a diversos sectores.

Esta publicación no solo documenta el presente, sino que también sirve como fuente de inspiración para futuros investigadores y profesionales, promoviendo la creación de alianzas estratégicas y la transferencia de conocimiento en los

campos espacial y ciberespacial. Con el apoyo continuo y la colaboración de todos los sectores involucrados, Colombia se encuentra en una posición privilegiada para alcanzar nuevos hitos en la exploración del espacio y en la creación de oportunidades para mejorar la calidad de vida de sus ciudadanos y contribuir al desarrollo global.

## Prólogo

Colombia ha logrado avances significativos en el ámbito científico y tecnológico, marcando hitos relevantes en su trayectoria. La creación de instituciones clave, como la Comisión Colombiana del Espacio (CCE) en 2006, ha sido fundamental para coordinar las actividades espaciales en el país. Un momento emblemático de este progreso fue el lanzamiento del FACSAT-1 en 2018, el primer satélite colombiano desarrollado por la Fuerza Aérea Colombiana (FAC). Este evento no solo representó un hito histórico, sino que también inició una nueva era en la investigación y exploración espacial de Colombia.

Los desarrollos en tecnología satelital, incluidos el FACSAT-2 “Chiribiquete” y las investigaciones realizadas por universidades colombianas, destacan la evolución del país en este campo. Instituciones como la Universidad Nacional de Colombia y la Universidad del Valle se encuentran a la vanguardia en proyectos que abarcan desde la fotogrametría y el uso de drones hasta el desarrollo de simuladores y la aplicación de inteligencia artificial en la educación. Estos avances no solo reflejan los logros tecnológicos, sino también los desafíos persistentes en el camino hacia el desarrollo espacial.

La colaboración internacional ha sido crucial para estos logros. La cooperación con agencias espaciales como la NASA y la ESA, así como con empresas tecnológicas globales, ha permitido a Colombia acceder a tecnologías avanzadas y mejores prácticas en el sector aeroespacial. El Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (MinCiencias) ha desempeñado un papel vital en la promoción y financiamiento de proyectos, apoyando iniciativas que fortalecen la capacidad científica y tecnológica del país.

A pesar de estos avances, el camino hacia el progreso está lleno de desafíos. Garantizar un financiamiento adecuado y continuo para proyectos de investigación y desarrollo es una barrera significativa debido a la alta inversión requerida por la tecnología aeroespacial. Es imperativo contar con un compromiso sostenido tanto del sector público como del privado. Además, atraer y retener talento especializado es crucial para el crecimiento del sector, lo que exige mejorar los programas de formación y crear incentivos para que los profesionales altamente capacitados permanezcan en el país. Asimismo, es necesario fortalecer la infraestructura tecnológica y de investigación para cumplir con los estándares internacionales.

Aún cuando hay obstáculos, el desempeño de Colombia en la investigación aérea y espacial ha sido notable, considerando los recursos disponibles y las dificultades inherentes. La calidad de la investigación en universidades y centros de investigación colombianos ha ganado reconocimiento internacional. Los estudios sobre tecnologías satelitales para el monitoreo ambiental, el

desarrollo de simuladores y la implementación de realidades extendidas son ejemplos de áreas en las que Colombia y la FAC han sobresalido.

Estos avances en ciencia y tecnología espacial tienen un impacto directo en la sociedad colombiana. La capacidad para monitorear desastres naturales, mejorar la educación con tecnologías avanzadas y desarrollar aplicaciones prácticas en diversos sectores subraya el valor de la inversión en este campo. Con el apoyo y colaboración continuos de todos los sectores involucrados, Colombia está bien posicionada para alcanzar nuevos hitos en el ámbito espacial y ciberespacial a nivel regional y nacional.

Para nosotros, como Fuerza Aérea Colombiana y Escuela Militar de Aviación “Marco Fidel Suárez”, que tenemos como propósito la consolidación de una fuerza polivalente e interoperable y estamos alineados con la Estrategia para el Desarrollo Aéreo y Espacial 2042, estamos comprometidos a fomentar la participación y la investigación con calidad y pertinencia en el ámbito aéreo, espacial y ciberespacial. Cada octubre, nos reunimos para conmemorar la Semana Mundial del Espacio y, a través de la celebración de la Semana Universitaria EMAVI, reunimos al sector académico, científico, tecnológico e industrial para compartir y socializar los conocimientos e investigaciones que componen su dominio. La ciencia y la tecnología son caminos hacia el conocimiento y el desarrollo, y como institución de educación superior con varios Centros de Investigación en Tecnologías Aeroespaciales, estamos dedicados a avanzar en este camino, contribuyendo al crecimiento y bienestar de la sociedad y a su seguridad.

Basado en las experiencias de nuestra Semana Universitaria EMAVI 2023, este libro recoge las mejores ponencias y artículos de investigación que exploran una amplia gama de temas, desde el monitoreo de desastres naturales hasta la integración de tecnologías emergentes en la educación y la formación profesional.

Cada capítulo aquí compilado refleja el arduo trabajo y la dedicación de investigadores comprometidos con la búsqueda de soluciones innovadoras y efectivas para problemas contemporáneos.

El primer capítulo nos transporta a las alturas de los Andes Centrales de Colombia, donde la tecnología satelital juega un papel esencial en el seguimiento de la actividad del Volcán Nevado del Ruiz. Este estudio subraya la importancia de las observaciones remotas para proteger a las comunidades vulnerables ante amenazas volcánicas.

A medida que avanzamos, encontramos investigaciones sobre la integración de herramientas digitales en la enseñanza de modelos dinámicos en el álgebra booleana, un aspecto crucial en la formación de ingenieros aeroespaciales. Estas herramientas no solo mejoran la comprensión de conceptos complejos, sino que también preparan a los estudiantes para los desafíos del mundo real.



La inteligencia artificial, un tema de gran interés, se examina en el contexto de la formación de cadetes de policía, destacando tanto las oportunidades como los desafíos de incorporar tecnologías avanzadas en la educación.

La auditoría ambiental, de creciente relevancia, se presenta como una herramienta estratégica para la toma de decisiones empresariales. Este capítulo ofrece una visión profunda de cómo las empresas pueden implementar prácticas sostenibles y responsables.

El diseño de sistemas mecánicos para simuladores de helicópteros y la experiencia en el lanzamiento de nanosatélites ilustran el ingenio y la innovación en el ámbito aeroespacial. Estas investigaciones buscan mejorar la capacitación y reducir costos, avanzando en el conocimiento técnico y práctico necesario para operar en este campo.

La influencia de las realidades extendidas en el uso de simuladores y la gestión del aprendizaje para la innovación destacan cómo las tecnologías emergentes están transformando la forma en que aprendemos y aplicamos el conocimiento. Estos capítulos ofrecen una visión del futuro de la educación y la formación profesional.

Finalmente, el procesamiento de fotografías aéreas para la creación de modelos tridimensionales demuestra una de las aplicaciones más fascinantes de la tecnología moderna. Este estudio muestra cómo la fotogrametría puede mejorar la comprensión y el reconocimiento de espacios físicos, facilitando la adaptación de nuevos miembros a la comunidad académica.

Cada capítulo contribuye a un mosaico de avances científicos y tecnológicos que nos acercan más a nuestras metas en la exploración del espacio y la mejora de la vida en nuestro planeta. Espero que esta obra inspire a futuros investigadores, profesionales y oficiales de la FAC a continuar explorando y fortaleciendo el Sistema de Ciencia, Tecnología e Innovación, promoviendo alianzas y la transferencia de conocimiento con la misión de tener la ciencia, mi ruta, y mi meta, el espacio.

**Coronel OSCAR MAURICIO GÓMEZ MUÑOZ**  
**Director**  
**Escuela Militar de Aviación “Marco Fidel Suárez”**





# CAPÍTULO

# 1

## USO DE TECNOLOGÍA SATELITAL PARA EL SEGUIMIENTO DE LA EMERGENCIA DEL VOLCÁN NEVADO DEL RUIZ

**Daniel Agudelo**

daniel.agudelo@fac.mil.co

**CT. Laura Guerra**

laura.guerra@fac.mil.co

**Oscar Morales**

oscar.moralesf@fac.mil.co

**T1. John Osorio**

john.osorio@fac.mil.co

**T2. José Herrera**

jose.herrera@fac.mil.co

/ Fuerza Aérea Colombiana

Centro Nacional de Observación Aeroespacial

**Resumen.** Esta investigación se centra en el uso de la tecnología satelital para el monitoreo de la actividad vulcanológica del volcán Nevado del Ruiz. Situado en los Andes Centrales de Colombia, el área de interés tiene un historial de actividad volcánica que representa riesgos significativos para las regiones circundantes y sus poblaciones. En particular, la erupción catastrófica de 1985 resultó en uno de los desastres naturales más mortales registrados en Colombia, destacando la necesidad imperativa de un monitoreo frecuente de la actividad geológica en la región.

El área de estudio, parte del Parque Nacional Natural de los Nevados, se encuentra ubicada en las coordenadas 4°53'43" N y 75°19'21" O, a aproximadamente 28 kilómetros al sureste de la ciudad de Manizales y a 140 kilómetros de la ciudad de Bogotá D.C., capital del país. Este estratovolcán presenta un cráter principal activo conocido como Arenas, con un diámetro de aproximadamente 750 metros y una profundidad de 200 metros. El Ruiz forma parte del complejo volcánico Ruiz-Tolima, que se extiende por 60 kilómetros a lo largo de los Andes Centrales de Colombia.

Este estudio emplea tecnología satelital de teledetección para monitorear la actividad volcánica. La alta resolución temporal de los datos satelitales es fundamental, lo que permite el seguimiento antes, durante y después de eventos volcánicos. Los volcanes activos, como el Nevado del Ruiz, representan una amenaza continua para poblaciones e infraestructura. Por lo tanto, el monitoreo constante es necesario, y las observaciones remotas son invaluable por su capacidad para proporcionar información integral sobre la dinámica volcánica. Esta investigación subraya la importancia de la observación terrestre basada en satélites en la vulcanología y su papel crucial en la protección de regiones en riesgo.



**Abstract.** This research focuses on the use of satellite technology to monitor the emergency of the Nevado del Ruiz Volcano. Located in the Central Andes of Colombia, the area of interest has a history of volcanic activity that poses significant risks to the surrounding regions and their populations. In particular, the catastrophic eruption of 1985 resulted in one of Colombia's deadliest natural disasters, highlighting the urgent need for frequent monitoring of geological activity in the region. The study area, part of the Nevados National Natural Park, is located at coordinates  $4^{\circ}53'43''\text{N}$  and  $75^{\circ}19'21''\text{W}$ , approximately 28 kilometers southeast of Manizales and 140 kilometers from Bogotá. This stratovolcano features an active main crater known as Arenas, with a diameter of approximately 750 meters and a depth of 200 meters. The Ruiz is part of the Ruiz-Tolima volcanic formation, spanning 60 kilometers along the Central Andes of Colombia. This study employs satellite remote sensing technology to monitor volcanic activity. The high temporal resolution of satellite data is crucial, allowing for monitoring before, during, and after volcanic events. Active volcanoes, like Nevado del Ruiz, represent an ongoing threat to populations and infrastructure. Therefore, constant monitoring is necessary, and remote observations are invaluable for their capacity to provide comprehensive insights into volcanic dynamics. This research underscores the importance of satellite-based Earth observation in vulcanology and its crucial role in safeguarding at-risk regions.

**Palabras clave:** Tecnología satelital, Monitoreo volcánico, Volcán Nevado del Ruiz, Interacciones glaciares-volcanes, Teledetección, Gestión de riesgos naturales.

**Keywords:** Satellite technology, Volcanic monitoring, Nevado del Ruiz Volcano, Glacier-volcano interactions, Remote sensing, Natural disaster management.

## 1. Introducción

A nivel mundial, aproximadamente 250 volcanes tienen una formación glacial en sus alrededores. Por este motivo, las interacciones entre los volcanes y los glaciares son frecuentes, resultando en situaciones mortales para las poblaciones cercanas y acarreamo fuertes consecuencias para la economía de las regiones aledañas. Mejorar el entendimiento de las interacciones entre los glaciares y los volcanes resulta importante a nivel científico, social y medioambiental [1]. El área de estudio del volcán Nevado del Ruiz cuenta con el glaciar y volcán más reconocido del país, especialmente por su actividad volcánica en las últimas décadas [2].

Con base en la alerta decretada por el gobierno nacional a través de la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGDR), se realiza el seguimiento a esta emergencia haciendo uso de las tecnologías satelitales de sensorización remota desde la órbita baja. Estas tecnologías son cada día más utilizadas para evaluar y hacer seguimiento de los procesos volcánicos y los riesgos asociados a su actividad, debido a la capacidad de los sensores de proporcionar un espectro de observación y medición para monitorear la dinámica, magnitud, frecuencia e impactos de la actividad volcánica en los dominios ultravioleta (UV), visible (VIS), infrarrojo (IR) y microondas.

La aplicación de la tecnología de observación de la Tierra basada en satélites en la vulcanología permite a los analistas determinar anomalías, monitorear los flujos de calor y de lava [3] [4] [5] [6] [7] [8], medir la emisión de gases [9] [10] [11] y determinar la deformación del terreno [12] [13] [14] [15] [16] [17] [18]. La resolución temporal es uno de los factores más importantes debido a que la actividad volcánica es impredecible y es de vital importancia poder realizar seguimiento antes, durante y después de que inicie. Una alta frecuencia de adquisición de información permite [19]. Para sobreponerse a esta situación, la información obtenida de los satélites es complementada a través de sensores terrestres y aerotransportados que permiten desarrollar soluciones [3] [20].

Los volcanes activos representan una amenaza para las poblaciones e infraestructura, por tal motivo se efectúa monitoreo constante [21]. Las observaciones remotas son muy útiles para este propósito gracias a su capacidad de proveer un amplio espectro de oportunidades para medir de forma precisa las dinámicas, magnitud, frecuencia y consecuencias de las erupciones volcánicas en diferentes dominios del espectro de señales visibles e invisibles para el ojo humano. Sus capacidades para monitorear volcanes son cruciales, en especial en aquellas zonas donde [22] [23]. Los volcanes se encuentran entre los pocos accidentes geográficos que requieren un monitoreo frecuente gracias a la escala y velocidad con la que ocurren cambios en su topografía [24].

## 2. Área de estudio

En esta investigación se analizó el volcán Nevado del Ruiz. El 13 de noviembre de 1985, este volcán, ubicado a 5,200 metros sobre el nivel del mar en la cordillera central colombiana, entró en erupción a través de su cráter principal. Aproximadamente el 10% de su cobertura de hielo cuspidal, alrededor de 21 kilómetros cuadrados, se desprendió, generando una avalancha de escombros y materia vegetal a través de los ríos Azufrado, Lagunilla, Gualí, Claros y Molinos. Las lluvias torrenciales de ese momento impactaron la magnitud del fenómeno. Como consecuencia, sucumbieron puentes y viviendas a su paso. En zonas llanas, la ciudad de Armero sufrió las peores consecuencias. Se reportaron destrozos igualmente en Chinchiná y en menor proporción en Mariquita y Honda. El número total de muertos superó los 23,000 y es considerada la mayor catástrofe causada por una erupción volcánica en la historia de Colombia [25].

El volcán Nevado del Ruiz forma parte del Parque Nacional Natural de los Nevados, localizado en las coordenadas 4°53'43" N y 75°19'21" O, entre los departamentos de Tolima y Caldas, ubicado a 28 kilómetros al sureste de la ciudad de Manizales y a 140 kilómetros de la ciudad de Bogotá, como se muestra en la imagen a continuación. Tiene una altura de 5,321 metros sobre el nivel del mar, es un estratovolcán con un cráter principal activo denominado Arenas, con aproximadamente 750 metros de diámetro y 200 metros de profundidad. El Ruiz hace parte del complejo volcánico Ruiz-Tolima que se extiende por 60 kilómetros a lo largo de la cordillera central de Colombia. Es un volcán activo de forma elíptica con un área de 200 kilómetros cuadrados. Sus laderas tienen pendientes entre 20° y 35°, y en la cima se encuentra el cráter [26].

De acuerdo con un boletín de la amenaza del volcán emitido por el Servicio Geológico Colombiano, en una futura erupción es posible la ocurrencia de uno o varios de los siguientes fenómenos: corrientes de densidad piroclástica de escoria, pómez y ceniza, bloques y cenizas; caídas de ceniza y lapilli, proyectiles balísticos, lahares y avalanchas de escombros. Los lahares son una mezcla de fragmentos de roca (que pueden tener más de 10 metros de diámetro), arena, limo, arcilla y agua que se desplazan por los cauces de las quebradas y ríos. Son eventos muy peligrosos y la probabilidad de sobrevivir a su impacto es mínima [27]. Esto confirma la importancia del monitoreo constante de la zona.

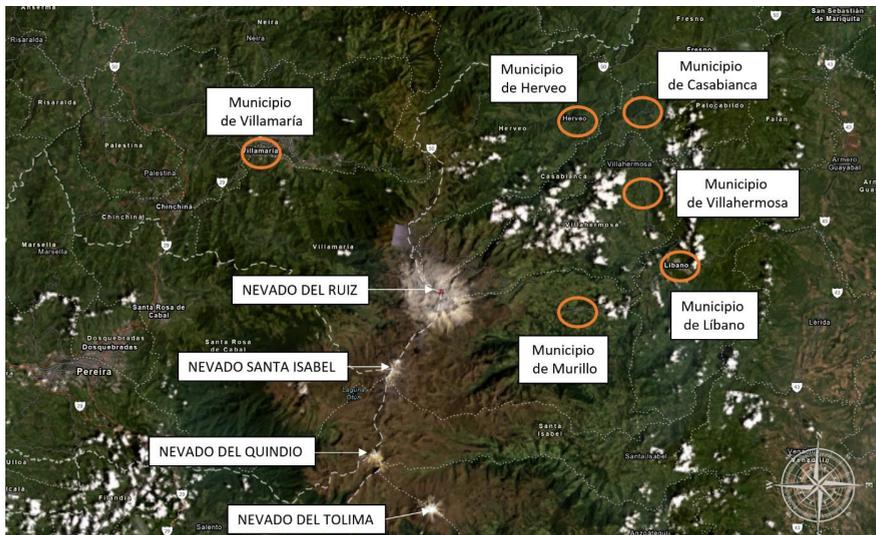
**Figura 1.** Mapa de localización geográfica general del Volcán Nevado del Ruiz



Fuente: Servicio Geológico Colombiano, 2015.

Alrededor del Nevado del Ruiz se encuentra la ciudad de Manizales y las poblaciones de Herveo (25 kilómetros), Casablanca (28 kilómetros), Villahermosa (25 kilómetros), Líbano (29 kilómetros), Armero Guayabal y Murillo. Además, el Nevado de Santa Isabel y el Nevado del Tolima hacen parte del sistema montañoso circundante. La población más cercana es Murillo, a tan solo 15 kilómetros del cráter del volcán. El volcán Nevado del Ruiz representa un riesgo latente para estas poblaciones aledañas que en total suman más de medio millón de habitantes.

**Figura 2.** Municipios cercanos al Volcán Nevado del Ruiz



Fuente: Tomada con PlanetScope entre enero y marzo de 2023.

### 3. Metodología

Para llevar a cabo este estudio, se utilizaron imágenes adquiridas a través de sensores instalados en satélites en órbita. Estos sensores tienen la capacidad de capturar información en diferentes regiones del espectro electromagnético, y cada una de estas regiones se denomina canal o banda [28].

Los sensores que generan imágenes radar se caracterizan por ser sensores activos, lo que significa que emiten su propia radiación y la registran cuando rebota en la superficie terrestre. En este proceso, el sensor emite una señal desde el satélite hacia la Tierra, recopilando la información reflejada por la topografía. A partir de esta señal, se crea una representación pseudográfica del terreno. Además, es posible combinar los datos obtenidos de estos sensores satelitales con modelos digitales de elevación (DEM, por sus siglas en inglés) para generar un modelo tridimensional del área de interés (AOI). La principal ventaja de este tipo de sensor radica en que su señal posee una longitud de onda considerablemente mayor que el tamaño de las partículas de agua presentes en la atmósfera, lo que impide que sea absorbida por estas partículas. De esta manera, no dependen de las condiciones climáticas ni de la iluminación, permitiendo la adquisición de datos las 24 horas del día, los 7 días de la semana [29].

Por otro lado, las imágenes ópticas se obtienen mediante sensores pasivos que captan la radiación emitida o reflejada por la Tierra. Una vez adquiridas, estas imágenes se someten a un proceso de ortorectificación y se almacenan para su posterior procesamiento y análisis. Las imágenes ópticas se caracterizan por tener cuatro atributos principales:

- **Resolución espacial:** Este parámetro se refiere al tamaño del píxel en la imagen. A menor valor, mayor cantidad de detalles se pueden observar en la imagen.
- **Resolución espectral:** Indica el número y ancho de las bandas espectrales en las que el sensor puede captar radiación electromagnética. Un mayor número de bandas permite obtener más información de la toma.
- **Resolución radiométrica:** Se relaciona con la sensibilidad del sensor y su capacidad de discriminar entre pequeñas variaciones en la radiación que capta. Suele expresarse mediante el número de bits necesarios para almacenar cada píxel. Cuanto mayor sea la precisión radiométrica, mayor número de detalles podrán captarse en la imagen.
- **Resolución temporal:** Se refiere al intervalo de tiempo entre las adquisiciones de imagen por parte del sensor a bordo del satélite [28].

Una desventaja del uso de imágenes ópticas para desarrollar estudios de cambios en morfología y coberturas en volcanes es la disponibilidad de escenas con la resolución espacial y temporal requeridas, y que se encuentren libres de nubosidad y columnas de humo que permitan visualizar el terreno [1].

### **Constelaciones satelitales utilizadas**

Para llevar a cabo esta investigación, se emplearon las constelaciones de satélites pertenecientes a las empresas Maxar, Planet y e-Geos.

La constelación de la empresa Maxar incluye los siguientes satélites: GeoEye-1, WorldView-1, WorldView-2 y WorldView-3. Estos describen una trayectoria heliosincrónica (SSO) y de inclinación media (MIO) con un periodo orbital de 94,6 minutos alrededor de la Tierra. Orbitan el planeta a una altura de 496 kilómetros sobre el nivel medio del mar y tienen la capacidad para mapear 4 millones de kilómetros cuadrados (km<sup>2</sup>) por día. Cada uno de estos satélites está equipado con 8 bandas en la región espectral del Infrarrojo Cercano y Visible (VNIR) y del Infrarrojo de Onda Corta (SWIR). Estas ocho bandas, en orden, son: Coastal, Blue, Green, Yellow, Red, Red Edge, Near Infrared1 (NIR1) y Near Infrared2 (NIR2). Estas bandas ofrecen una resolución espacial submétrica de 0.5 m [30].

La constelación PlanetScope es una fuente que ofrece una resolución de 3.7 metros y una mayor cobertura sobre el terreno, con capacidad de generación de mapas que cubren un área mayor para evaluar el área circundante del volcán. Esta constelación de satélites sigue una órbita heliosincrónica (SSO) con una inclinación orbital de 98°. Orbitan la Tierra a una altitud que varía entre 475 kilómetros y 525 kilómetros sobre el nivel medio del mar. La constelación PlanetScope consta de más de 130 satélites DOVE, los cuales, en conjunto, tienen la capacidad de capturar imágenes de más de 200 millones de kilómetros cuadrados (km<sup>2</sup>) de la superficie terrestre cada día. Esta constelación cuenta con tres tipos de satélites: el primer conjunto tiene sensores de tres bandas, el segundo cuenta con sensores de cuatro bandas y el último set integra sensores de ocho bandas [31].

La tercera constelación empleada pertenece a la empresa e-Geos y corresponde a la primera y segunda generación COSMO-SkyMed. Estos satélites están equipados con sensores radar de apertura sintética, lo que les permite adquirir información en todas las condiciones de visibilidad, independientemente del clima o la hora del día. La constelación COSMO-SkyMed orbita la Tierra en una trayectoria heliosincrónica (SSO) con una órbita inclinada a 97.86°, con un periodo orbital de 97,1 minutos alrededor de la Tierra, y orbitan el planeta a una altura de 619,6 kilómetros sobre el nivel medio del mar. La resolución que pueden brindar los sensores es de 0.5 metros [32].

Considerando el seguimiento de este fenómeno, es esencial disponer tanto de datos históricos como de información actualizada. Esto es fundamental para llevar a cabo un estudio multitemporal que abarque el área de influencia del volcán Nevado del Ruiz. Para este propósito, se utilizaron imágenes radar y ópticas que abarcan diversas bandas y modos de captura.

### Imágenes satelitales:

- **Imágenes Ópticas de 50 cm en el Infrarrojo Cercano (NIR):** Estas imágenes proporcionan una alta resolución espacial, permitiendo la identificación de detalles precisos en la superficie terrestre. El uso de NIR es importante para evaluar la vegetación y otros elementos en el espectro infrarrojo cercano.
- **Imágenes Radar Spotlight de 50 cm:** Las imágenes de radar en modo Spotlight ofrecen una alta resolución espacial similar a las imágenes ópticas, pero con la ventaja de ser independientes de las condiciones climáticas y la iluminación, lo que permite la adquisición de datos incluso en condiciones adversas.
- **Imágenes Radar Stripmap de 1.2 m:** Esta imagen radar con resolución moderada proporciona una vista más amplia del área de estudio y puede utilizarse para contextos más generales.

Esta metodología se basa en técnicas de procesamiento de imágenes y análisis espacial para obtener información precisa y detallada sobre el Volcán Nevado del Ruiz y su entorno. La metodología empleada en este estudio se llevó a cabo en varias etapas, cada una con un propósito específico y se detalla a continuación:

### Postprocesamiento y ortorrectificación de imágenes ópticas

**Objetivo:** Preparar las imágenes para su análisis y corregir las distorsiones causadas por la proyección terrestre.

#### Pasos:

- Se obtuvieron las imágenes ópticas originales.
- Se corrigieron las distorsiones geométricas y de posición para lograr una representación precisa de la superficie terrestre. Para ello, se tomaron insumos más precisos y se seleccionaron puntos a lo largo de la zona de la imagen. A estos puntos se les calcularon las coordenadas, que se utilizaron en un programa SIG para ajustar las imágenes y garantizar la exactitud en la posición de las mismas.

## Clasificación supervisada con el método de máxima verosimilitud

**Objetivo:** Asignar clases a las áreas de interés en las imágenes, identificando características específicas.

**Pasos:**

- Se realizó una primera clasificación utilizando las imágenes originales.
- Se llevó a cabo una segunda clasificación utilizando los componentes principales de las imágenes.

## Validación de las clasificaciones

**Objetivo:** Evaluar la precisión de las clasificaciones realizadas en los pasos anteriores.

**Pasos:**

- Se seleccionaron dos nuevas series de áreas de validación siguiendo criterios similares a los utilizados para el entrenamiento.
- Se calculó la precisión, los coeficientes Kappa y se generó una matriz de confusión para cada clasificación, comparando los resultados con las áreas de validación.

## Evaluación de la Precisión de la Clasificación de Imágenes

Cuando se lleva a cabo una clasificación de imágenes, es fundamental evaluar la precisión de esa clasificación. Para hacerlo, se utilizan al menos tres métricas principales:

- **Precisión:** La precisión indica qué tan acertada fue la clasificación en términos porcentuales. Mide cuántos de los píxeles clasificados fueron correctamente asignados a su categoría real. Por ejemplo, si se clasificaron 100 píxeles como “vegetación” y 90 de ellos realmente son vegetación, entonces la precisión sería del 90%.
- **Coefficiente Kappa ( $\kappa$ ):** El coeficiente Kappa es una medida estadística que evalúa la concordancia entre la clasificación realizada y la verdad de referencia (en este caso, las áreas de validación). Es una medida más robusta que la precisión, ya que tiene en cuenta el acuerdo que podría ocurrir por azar. Un valor de  $\kappa$  cercano a 1 indica un alto acuerdo, mientras que un valor cercano a 0 indica un acuerdo similar al azar.
- **Matriz de Confusión:** La matriz de confusión es una tabla que compara la clasificación realizada con la verdad de referencia. Esta tabla muestra cuatro valores clave:

- **Verdaderos positivos (VP):** La cantidad de píxeles correctamente clasificados como positivos (por ejemplo, áreas de vegetación).
- **Falsos positivos (FP):** La cantidad de píxeles incorrectamente clasificados como positivos (clasificados como vegetación, pero no lo son).
- **Verdaderos negativos (VN):** La cantidad de píxeles correctamente clasificados como negativos (por ejemplo, áreas no vegetadas).
- **Falsos negativos (FN):** La cantidad de píxeles incorrectamente clasificados como negativos (clasificados como no vegetación, pero son vegetación).

Al comparar los resultados de la clasificación con las áreas de validación utilizando estas métricas, se obtiene una evaluación completa de la precisión y el rendimiento del algoritmo de clasificación. Esto permite determinar cuán confiables son los resultados de la clasificación y si es necesario ajustar o mejorar el proceso para obtener resultados más precisos.

## Mejora de Textura en Imágenes Radar para Identificación de Fuentes Hídricas

**Objetivo:** Realzar la textura en las imágenes radar para facilitar la identificación de fuentes hídricas.

### Pasos:

- Se aplicó un aumento en la textura a las imágenes radar para resaltar características relevantes relacionadas con cuerpos de agua.

## Aumento en la Textura en Imágenes Radar para Identificación de Fuentes Hídricas

El aumento en la textura aplicado a las imágenes radar se refiere a un proceso de realce utilizado para resaltar las características importantes en relación con los cuerpos de agua. Técnicamente, esto implica manipular la apariencia de las imágenes de radar para hacer que las características de los cuerpos de agua sean más visibles y distintivas. A continuación se detalla este proceso:

- **Textura en Imágenes Radar:** Las imágenes radar capturan información sobre la reflectividad de las superficies en función de las ondas de radar que rebotan en ellas. La textura se refiere a la variabilidad en las reflectividades dentro de una imagen. En el contexto de cuerpos de agua, la textura puede indicar áreas con superficies lisas (como cuerpos de agua) y áreas con superficies rugosas (como tierra firme o nieve).

- **Aumento en la Textura:** Esto implica resaltar la variabilidad en las reflectividades dentro de la imagen radar mediante técnicas de procesamiento de imágenes que realzan las diferencias en las características de la superficie. Para identificar cuerpos de agua de manera efectiva, se busca resaltar la uniformidad de las áreas de agua en contraste con las áreas circundantes, que pueden tener una textura más variada debido a la vegetación, las estructuras o el terreno.

El aumento en la textura se utiliza para hacer que los cuerpos de agua sean más evidentes y fáciles de identificar en las imágenes radar. Los cuerpos de agua generalmente tienen una reflectividad más uniforme en comparación con la tierra circundante, lo que significa que en las imágenes originales pueden no destacar claramente. Al aumentar la textura, se resaltan las áreas de superficie uniforme, facilitando su identificación y análisis.

## **Análisis Espacial del Área de Estudio**

**Objetivo:** Realizar un análisis detallado del área de estudio aprovechando la información multitemporal del área.

### **Pasos:**

- **Proceso de Vectorización:** Se llevó a cabo la vectorización de los elementos identificados dentro de las imágenes, transformando las características detectadas en formas geométricas y líneas que facilitan el análisis espacial.
- **Generación de Curvas de Nivel y Cálculo de Pendientes:** Se generaron curvas de nivel y se calculó la pendiente del terreno para comprender la topografía y la morfología del área de estudio.

Esta metodología permitió obtener una comprensión detallada del área de estudio, identificar características específicas en las imágenes, evaluar la precisión de las clasificaciones realizadas, mejorar la identificación de fuentes hídricas y analizar exhaustivamente la topografía del terreno.

## **4. Resultados**

Mediante los procedimientos y tratamientos realizados a las imágenes, se logró identificar el contorno de la cobertura de nieve y se generó la visualización inicial de la imagen óptica. La imagen resultante muestra la delimitación del área cubierta por nieve, capturada en una imagen satelital óptica el 6 de julio de 2019.

A continuación, se presenta la imagen que ilustra el resultado de la delimitación del área cubierta por nieve.

**Figura 3.** *Imagen satelital óptica del Volcán Nevado del Ruiz*

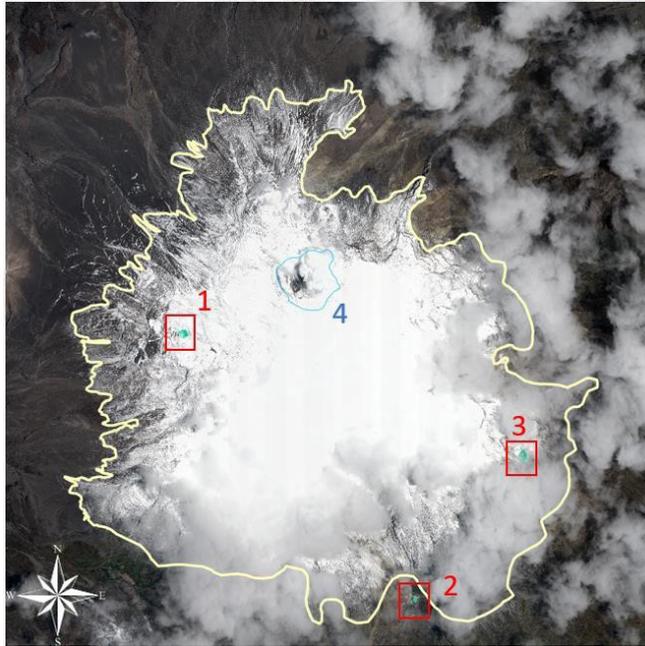


*Fuente: Tomada 06 julio 2019 con la constelación World View 3 de Maxar.*

Adicionalmente, en la imagen resultante, se aplicó una técnica de mejora de textura utilizando métodos estadísticos y el histograma de la imagen. Esta mejora permitió identificar con mayor claridad las características del terreno, incluyendo las lagunas glaciales. Los métodos estadísticos utilizados ajustaron la representación visual de la imagen para resaltar las diferencias en la textura de la superficie.

Como resultado de este proceso, las lagunas glaciales se distinguen de manera más nítida en contraste con el fondo circundante. Esta técnica es esencial para una identificación precisa y confiable de las características del terreno. La mejora de textura se utilizó en conjunto con otras metodologías mencionadas previamente, como la ortorrectificación y la generación de bases de datos geospaciales (GEO data base), para obtener un análisis más detallado y preciso del área de estudio.

**Figura 4.** Imagen satelital óptica del Volcán Nevado del Ruiz y zonas de interés identificadas



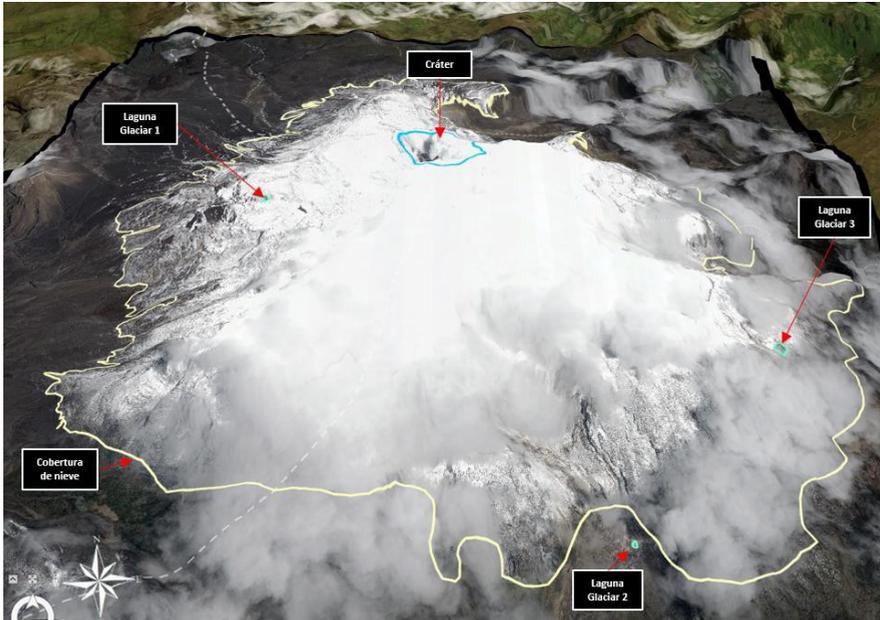
*Fuente: Tomada 06 julio 2019 con la constelación World View 3 de Maxar.*

En la imagen resultante, se aplicó una técnica de mejora de textura utilizando métodos estadísticos y el histograma de la imagen. Esta mejora facilitó la identificación de características del terreno, incluyendo las lagunas glaciales, al resaltar las diferencias en la textura de la superficie.

Los métodos estadísticos ajustaron la representación visual de la imagen para acentuar las variaciones en la textura, permitiendo que las lagunas glaciales se distingan con mayor claridad en contraste con el fondo circundante. Esta técnica resulta crucial para una identificación precisa y confiable de las características del terreno.

La mejora de textura se utilizó en combinación con otras metodologías previamente mencionadas, como la ortorrectificación y la generación de bases de datos geoespaciales (GEO data base), para lograr un análisis más detallado y preciso del área de estudio.

**Figura 5.** Visualización tridimensional del Volcán Nevado del Ruiz. Áreas de interés identificadas



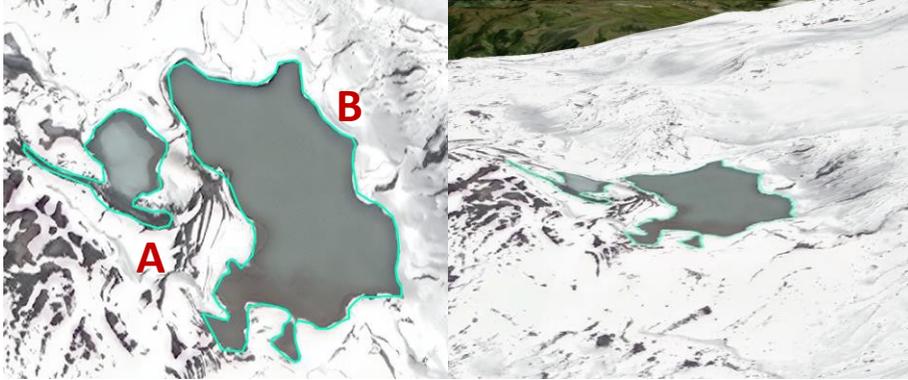
*Fuente: Constelación World View 3 de Maxar.*

Gracias a la alta resolución de las imágenes obtenidas, se posibilita una magnificación detallada tanto en el plano ortogonal como en el tridimensional de cada una de las áreas de interés, permitiendo un análisis exhaustivo. En el caso de la laguna glacial 1, se identifican dos formaciones distintas:

- La primera, de menor tamaño, marcada con la letra **A** en la imagen, abarca un área aproximada de 734 metros cuadrados.
- La segunda, identificada con la letra **B**, se extiende por un área aproximada de 4,266 metros cuadrados.

Ambas lagunas se encuentran a una altitud de 5,071 metros sobre el nivel medio del mar. Esta revisión destaca cómo la alta resolución de las imágenes permite una visualización y análisis detallados de las áreas de interés, proporcionando información valiosa para la caracterización de las lagunas glaciales y su ubicación altimétrica.

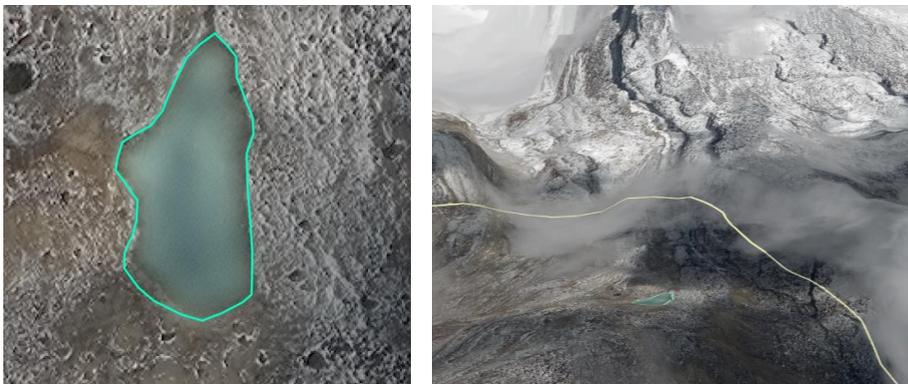
**Figura 6.** Vista 2D y vista 3D de la formación de lagunas número 1



*Fuente: World View 3 de Maxar.*

Respecto a la laguna número 2, la imagen a continuación muestra tanto las vistas en dos dimensiones (2D) como en tres dimensiones (3D) de esta formación de agua. La laguna cubre aproximadamente 1,263 metros cuadrados de superficie y se encuentra a una altitud inferior en comparación con las lagunas previamente mencionadas, situándose a 4,449 metros sobre el nivel medio del mar. Esta visualización en 2D y 3D proporciona una comprensión más clara de la extensión y ubicación de la laguna en el contexto del entorno circundante.

**Figura 7.** Vista 2D y vista 3D de la laguna número 2



*Fuente: World View 3 de Maxar.*

La laguna número 3, ubicada al este de la cobertura de nieve, se distingue como la más grande entre las tres lagunas identificadas. Esta laguna abarca un área aproximada de 6,956 metros cuadrados y se encuentra a una altitud de 4,660 metros sobre el nivel medio del mar. La información sobre su tamaño y ubicación altimétrica es crucial para entender la distribución y características de las formaciones de agua en el área de estudio.

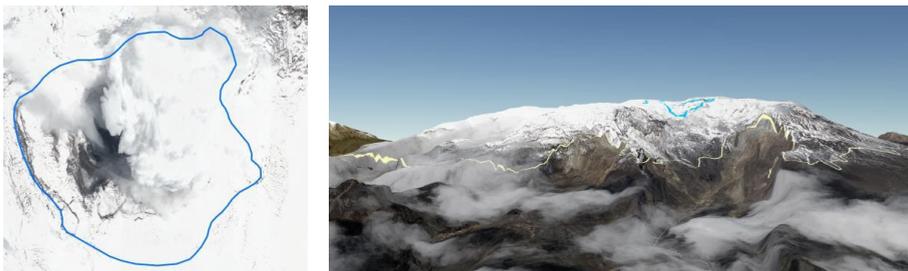
**Figura 8.** Vista 2D y vista 3D de la laguna número 3



*Fuente: World View 3 de Maxar.*

En la imagen proporcionada, se muestra el cráter del volcán, con un diámetro aproximado de 738 metros según las dimensiones capturadas en la imagen bidimensional. A la derecha, se observa una imagen tridimensional que ofrece una visión detallada del punto más alto del volcán, así como de la extensión de la cobertura de nieve circundante. Esta perspectiva tridimensional proporciona una comprensión más completa de la topografía y la morfología del volcán y su entorno.

**Figura 9.** Modelo digital bidimensional y tridimensional del cráter del Volcán del 6 de julio de 2019



*Fuente: World View 3 de Maxar.*

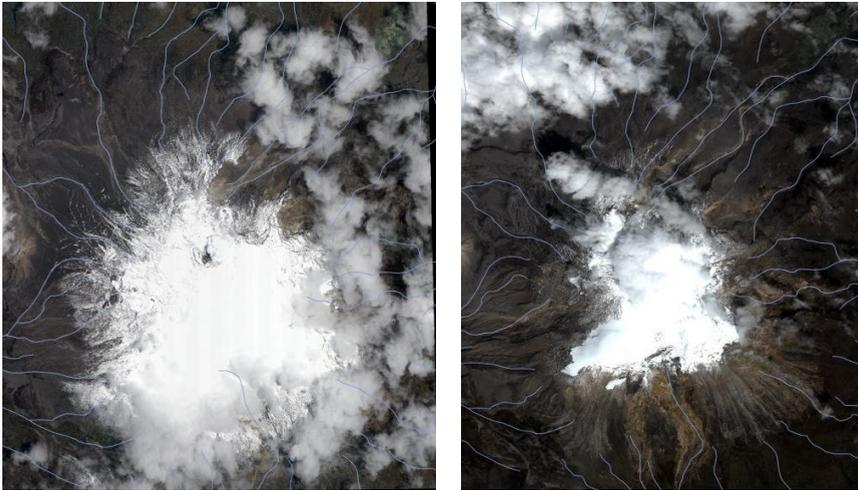
Las imágenes satelitales resultan fundamentales para realizar estudios de temporalidad, que permiten evaluar cómo cambian las áreas de interés a lo largo del tiempo. En este caso, se ha analizado la evolución de la cobertura de nieve en la cima del Volcán Nevado del Ruiz entre julio de 2019 y enero de 2021. Para la segunda fecha, se utilizó una imagen óptica libre de nubosidad, lo que facilitó un análisis detallado.

Durante ambos periodos de tiempo analizados, el volcán se encontraba en estado activo, según los reportes del Servicio Geológico Colombiano (SGC). El boletín del 9 de julio de 2019 indicaba un nivel amarillo de actividad, con un aumento en la actividad sísmica y pequeñas emisiones de gases y ceniza. En contraste, el boletín del 19 de enero de 2021 también reportaba un nivel amarillo, pero con una disminución en la sismicidad y una inestabilidad continua en el volcán. Aunque la actividad sísmica había disminuido, se reportaron cambios en la dinámica de fluidos en el interior de los conductos volcánicos.

Las imágenes satelitales permitieron correlacionar la mayor actividad volcánica con una menor cobertura de nieve en la cumbre del volcán. Sin embargo, esta correlación también podría estar influenciada por fenómenos climáticos que podrían haber promovido el deshielo. Aunque la investigación no aborda esta posible influencia climática de manera exhaustiva, se destaca la importancia de estas imágenes para evaluar la evolución temporal de la cobertura de nieve en el volcán y su relación con la actividad volcánica.

Este análisis demuestra cómo la combinación de imágenes satelitales y datos de actividad volcánica proporciona una visión integral de los cambios en el entorno volcánico, y subraya la importancia de considerar múltiples factores en la interpretación de estos datos.

**Figura 10.** *Imágenes ópticas satelitales del cráter del Volcán Nevado del Ruiz*



a) 6 de julio de 2019

b) 15 de enero de 2021

*Fuente: World View 3 de Maxar.*

La imagen óptica captada por la constelación WorldView-3 el 27 de enero de 2023 muestra un estado despejado del cráter del Volcán Nevado del Ruiz, con un 0% de nubosidad en el área. Se observa una drástica disminución en la cobertura de nieve alrededor del cráter, con una extensión de nieve visible de aproximadamente 1,95 kilómetros cuadrados.

Esta reducción en la cobertura de nieve puede deberse a varios factores:

1. **Depósito de ceniza:** La ceniza expulsada por el cráter podría haber cubierto la nieve, ocultando su color blanco característico y haciendo que la cobertura de nieve visible parezca reducida.
2. **Temperaturas altas:** Las altas temperaturas en la región, posiblemente relacionadas con fenómenos climáticos, podrían haber contribuido al derretimiento de la nieve.
3. **Actividad volcánica:** La actividad del volcán y la liberación de energía podrían haber incrementado la temperatura alrededor del cráter, promoviendo el derretimiento de la cobertura glacial.

Actualmente, el equipo de investigación no dispone de herramientas para corroborar estas hipótesis mediante observaciones satelitales detalladas. Estas cuestiones serán objeto de futuras investigaciones para comprender mejor los factores que afectan la cobertura de nieve en la región.

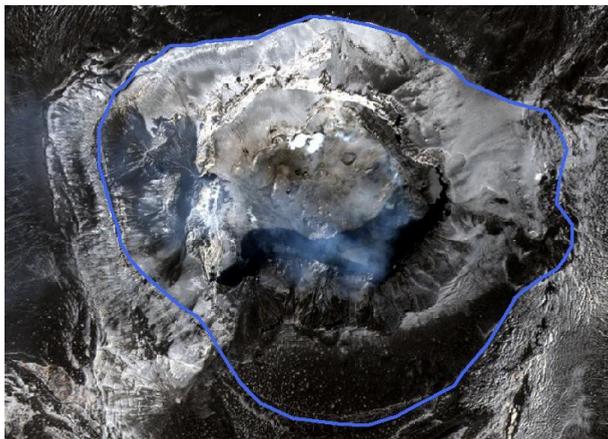
**Figura 11.** Imagen satelital óptica del 27 de enero de 2023



*Fuente: World View 3 de Maxar.*

En la imagen satelital del 27 de enero de 2023, el cráter del Volcán Nevado del Ruiz es claramente visible. La zona delineada en color azul muestra un diámetro aproximado de 730 metros en su punto más ancho, destacándose la forma y extensión del cráter. Esta medición proporciona una visión detallada del tamaño del cráter y su relación con la disminución observada en la cobertura de nieve.

**Figura 12.** Imagen satelital óptica del 27 de enero de 2023

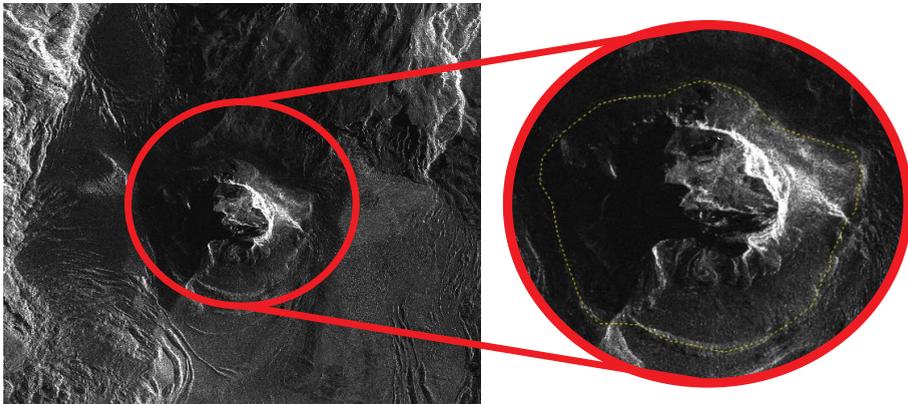


*Fuente: World View 3 de Maxar.*

Para profundizar en el análisis del Volcán Nevado del Ruiz, las imágenes radar ofrecen una ventaja significativa al superar las limitaciones impuestas por condiciones climáticas adversas como nubosidad o presencia de ceniza volcánica. La imagen tomada el 20 de febrero de 2023 con una resolución de hasta 50 cm por píxel proporciona una visión detallada de la zona.

Estas imágenes radar son valiosas porque permiten el monitoreo continuo del volcán, sin importar la hora del día o las condiciones meteorológicas. Este acceso constante a datos precisos es crucial para la evaluación de cambios en la estructura del volcán, la cobertura de nieve y cualquier actividad volcánica reciente. La capacidad de obtener imágenes detalladas y actualizadas contribuye a una mejor comprensión y gestión de los riesgos asociados con el volcán.

**Figura 13.** *Imagen satelital radar del 20 de febrero de 2023.*



*Fuente: Tomada con la constelación COSMOSky-Med de E-Geos.*

La técnica de sinergismo que describes, al combinar imágenes radar y ópticas, es muy efectiva para mejorar la precisión y el detalle en el análisis de coberturas del terreno. Al superponer las imágenes radar y ópticas, los analistas pueden aprovechar las ventajas de ambas tecnologías:

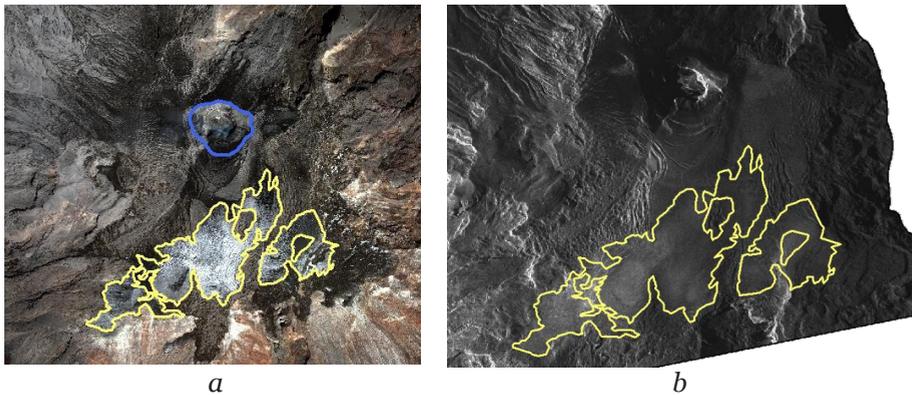
- **Imagen óptica:** Ofrece detalles visuales y coloridos que ayudan a identificar características específicas del terreno, como el tipo de cobertura (nieve, vegetación, etc.).
- **Imagen radar:** Proporciona datos sobre la textura y las características superficiales, incluso en condiciones adversas, como nubosidad o ceniza volcánica.

Al combinar ambas imágenes, el sinergismo permite:

1. **Mejorar la resolución final:** La alta resolución de la imagen radar se combina con los detalles y colores de la imagen óptica, proporcionando una visualización más clara y precisa.
2. **Identificar cambios sutiles:** Aunque las imágenes tienen una diferencia de 22 días, el sinergismo ayuda a detectar cualquier cambio sutil en la cobertura de nieve y otras características del terreno.
3. **Facilitar la extracción de información:** El contraste de colores y texturas en la imagen combinada ayuda a los analistas a identificar y diferenciar áreas con mayor precisión.

En el análisis comparativo que realizas, al observar que el área delimitada en la imagen óptica presenta una textura diferente en la imagen radar, se puede confirmar la presencia y extensión de la cobertura de nieve. La sinergia entre ambas imágenes mejora la confianza en los resultados obtenidos y permite una evaluación más completa del estado del Volcán.

**Figura 14.** Imagen óptica satelital e Imagen radar satelital

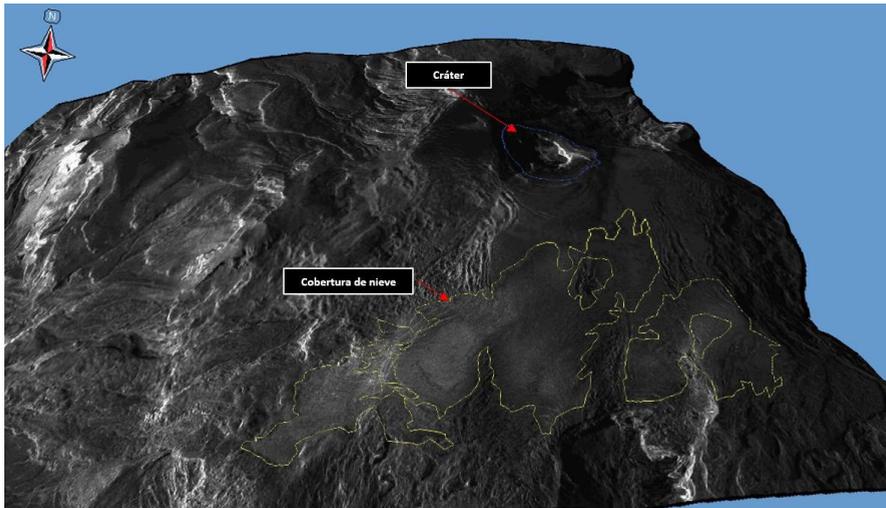


*Nota.* a) Imagen óptica satelital del 27 de enero de 2023, tomada con la constelación COSMOSky-Med Second Generation y b) Imagen radar satelital del 20 febrero 2023, tomada con la constelación World View 3.

Con las imágenes obtenidas mediante radar, también es posible desarrollar un proceso de construcción de modelos digitales de terreno, como el que se presenta en la imagen a continuación. Estos modelos son especialmente

útiles para extraer información sobre la situación actual de la zona geográfica. En este caso, es posible proyectar el perímetro de la cobertura de nieve y plasmarlo sobre la ladera del volcán con el fin de determinar la distribución de la zona y, de esta manera, evaluar los impactos y posibles riesgos en caso de una erupción y posterior derretimiento del glaciar, estableciendo la dirección de un posible lahar y los municipios en riesgo.

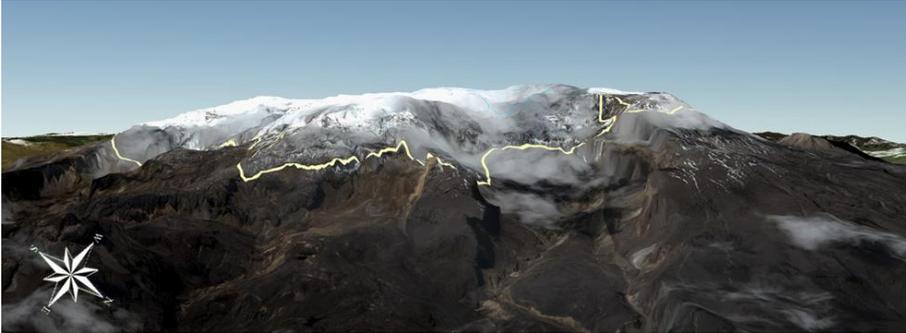
**Figura 15.** *Modelo digital de terreno del Volcán Nevado del Ruiz.  
Imagen radar satelital del 20 febrero 2023*



*Fuente: World View 3 de Maxar.*

El análisis de cambios también permite comparar la evolución del área objeto de estudio a lo largo del tiempo mediante una visualización tridimensional. Por ejemplo, la imagen a continuación fue captada el 15 de enero de 2021 con imágenes ópticas. En ella se aprecia la cobertura de la cumbre del Nevado.

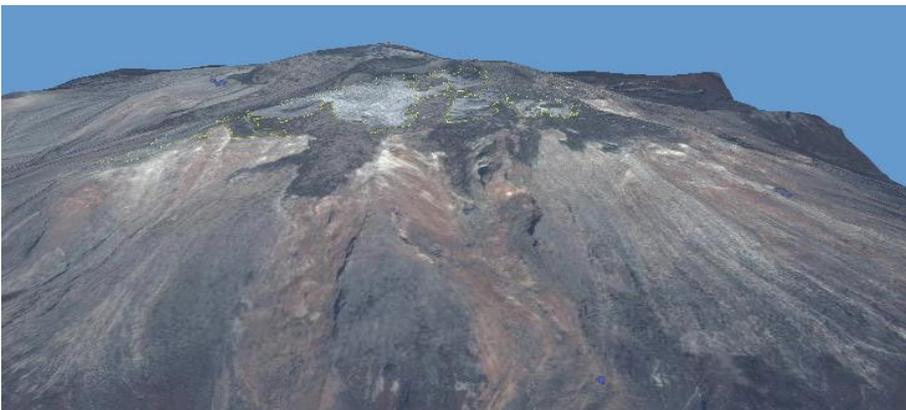
**Figura 16.** *Modelo digital de terreno del Volcán Nevado del Ruiz. Imagen óptica del 15 de enero de 2021*



*Fuente: World View 3 de Maxar.*

En contraste, la imagen óptica mostrada a continuación fue captada el 27 de enero de 2023 y permite apreciar la cobertura de nieve en el ecosistema, mostrando una preocupante disminución del área con respecto a la imagen anterior. El modelo tridimensional permite a los analistas desplazarse alrededor del área de interés en un ángulo de 360 grados. Esto facilita la toma de decisiones y la planificación de acciones para mitigar las consecuencias en las poblaciones circundantes al volcán en caso de una erupción.

**Figura 17.** *Modelo digital de terreno del Volcán Nevado del Ruiz del 27 enero 2023*



*Fuente: World View 3 de Maxar.*

Finalmente, el 20 de junio de 2023 se obtuvo la siguiente imagen óptica. En ella se aprecia que la cobertura de nieve está muy cerca de la cumbre del volcán, continuando hasta el cráter. Respecto a la imagen del 27 de enero, se observa una disminución en el área cubierta de nieve.

**Figura 18.** *Modelo digital de terreno del Volcán Nevado del Ruiz del 20 de junio de 2023*



Fuente: World View 3 de Maxar.

## 5. Discusión

El Centro Nacional de Observación Aeroespacial de la Fuerza Aérea Colombiana tiene la capacidad de programar, adquirir y procesar de forma autónoma imágenes tomadas por sensores satelitales. Esta información está disponible para que las diferentes dependencias de la institución puedan tomar decisiones en tiempo real a partir de datos certeros y actualizados. De igual forma, las entidades públicas del gobierno e instituciones privadas pueden acceder a esta información a través de los canales de comunicación adecuados.

Los resultados de este estudio proporcionan una visión detallada de la actividad volcánica del Volcán Nevado del Ruiz y las interacciones entre los glaciares y el volcán en la región. Esto es de gran importancia para la vulcanología y la gestión de riesgos derivados de desastres naturales. La información obtenida mediante tecnología satelital permite una vigilancia continua, lo que a su vez mejora la capacidad para pronosticar y responder a eventos volcánicos potencialmente devastadores.

La investigación se centró en el uso de la tecnología satelital de la Fuerza Aérea Colombiana para el seguimiento de la emergencia del Volcán Nevado del Ruiz. Los resultados revelan que la tecnología satelital es una herramienta invaluable para evaluar la dinámica, magnitud y frecuencia de la actividad volcánica, con el fin de predecir los posibles impactos en su área de influencia. Así, se demostró que el monitoreo satelital es esencial para identificar y comprender los cambios geográficos alrededor del volcán, lo que permite planificar y gestionar eficazmente los riesgos en la región.

Los resultados obtenidos demostraron la utilidad de la tecnología satelital para detectar cambios en la superficie del volcán, aportando información valiosa a los organismos de control y gestión del riesgo para establecer planes de acción y contingencia ante eventos volcánicos. Además, los hallazgos de este estudio son coherentes con investigaciones anteriores que han utilizado tecnología satelital para monitorear volcanes en otras partes del mundo. Esto refuerza la idea de que la tecnología satelital es una herramienta valiosa y generalizable en el campo de la vulcanología. También se alinea con la comprensión previa de que los volcanes activos, como el Nevado del Ruiz, requieren un monitoreo constante debido a su capacidad para generar eventos peligrosos.

## 6. Conclusiones

El estudio de las interacciones entre volcanes y glaciares es de gran interés para la comunidad científica nacional e internacional, así como para las entidades gubernamentales encargadas de la gestión del riesgo y los estudios geológicos. La importancia de este enfoque ha quedado demostrada a partir de los daños y fatalidades registradas debido a erupciones volcánicas en todo el mundo. Para mitigar las consecuencias, el estudio de las dinámicas del sistema volcánico debe abordar la determinación de patrones de comportamiento que puedan alertar a las poblaciones sobre la inminente actividad volcánica. La tecnología de observación terrestre mediante sensores transportados en satélites permite a las instituciones gubernamentales implementar planes de seguimiento de zonas geográficas que impliquen riesgos para las poblaciones, como es el caso del Volcán Nevado del Ruiz. Con la información recopilada, es posible identificar los cambios en las coberturas del terreno y predecir el comportamiento a corto y mediano plazo de estos accidentes geográficos.

Las condiciones meteorológicas sobre el área de interés tienen una gran influencia en la selección del tipo de sensor a utilizar para adquirir información. En presencia de nubosidad y de columnas de humo producto de la actividad volcánica, las imágenes ópticas no son la opción más adecuada para obtener datos del área de interés. Por el contrario, los sensores radar son la alternativa indicada, ya que la adquisición de información no se ve afectada por eventos climatológicos en la zona.

## 7. Referencias

- [1] M. Martin, I. Barr, B. Edwards, M. Spagnolo, S. Vajedian y E. Symeonakis, «Assessing the Use of Optical Satellite Images to Detect Volcanic Impacts on Glacier Surface Morphology,» *Remote Sensing*, vol. 13, p. 3453, 2021.
- [2] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, «Monitoreo de ecosistemas,» 2022. [En línea]. Available: <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/volcan-nevado-ruiz>. [Último acceso: 5 septiembre 2023].
- [3] F. Cigna, D. Tapete y Z. Lu, «Remote Sensing of Volcanic Processes and Risk,» *Remote sensing*, p. 19, 2020.
- [4] A. Carter, M. Ramsey y A. Belousov, «Detection of a new summit crater on Bezymianny Volcano lava dome: Satellite and field-based thermal data,» *Bulletin of Volcanology*, vol. 69, p. 811–815, 2007.
- [5] R. Vaughan, L. Keszthelyi, J. Lowenstern, C. Jaworowski y H. Heasler, «Use of ASTER and MODIS thermal infrared data to quantify heat flow and hydrothermal change at Yellowstone National Park,» *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 233, pp. 72-89, 2012.
- [6] R. Wessels, R. Vaughan, M. Patrick y M. Coombs, « High-resolution satellite and airborne thermal infrared imaging of precursory unrest and 2009 eruption at Redoubt Volcano, Alaska,» *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 259, pp. 248-269, 2013.
- [7] «Some observations regarding the thermal flux from Earth's erupting volcanoes for the period of 2000 to 2014,» *Geophysical Research Letters*, vol. 42, p. 282–289, 2014.
- [8] G. Norini, G. Groppelli, R. Sulpizio, G. Carrasco-Núñez, P. Dávila-Harris, C. Pelliccioli, F. Zucca y R. De Franco, «Structural analysis and thermal remote sensing of the Los Humeros Volcanic complex: Implications for volcano structure and geothermal exploration.,» *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 301, pp. 221-237, 2015.
- [9] S. Carn, A. Krueger, N. Krotkov, K. Yang y K. Evans, «Tracking volcanic sulfur dioxide clouds for aviation hazard mitigation,» *Natural Hazards*, vol. 51, p. pages325–343, 2009.
- [10] R. Champion, M. Martinez-Cruz, T. Lecocq, C. Caudron, J. Pacheco, G. Pinardi, C. Hermans, S. Carn y A. Bernard, «Space-and ground-based measurements of sulphur dioxide emissions from Turrialba Volcano (Costa Rica),» *Bulletin of Volcanology*, vol. 74, p. 1757–1770, 2012.

- [11] S. Carn, L. Clarisse y A. Prata, «Multi-decadal satellite measurements of global volcanic degassing,» *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 311, pp. 99-134, 2016.
- [12] R. Lanari, P. Lundgren y E. Sansosti, «Dynamic deformation of Etna Volcano observed by satellite radar interferometry,» *Geophysical Research Letters*, vol. 25, p. 1541–1544, 1998.
- [13] A. Hooper, H. Zebker, P. Segall y B. Kampes, «A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers,» *Geophysical Research Letters*, vol. 31, p. 23, 2004.
- [14] M. Ramsey y J. Fink, «Estimating silicic lava vesicularity with thermal remote sensing: A new technique for volcanic mapping and monitoring,» *Bulletin of Volcanology*, vol. 61, p. 32–39, 1999.
- [15] M. Kervyn, G. Ernst, R. Goossens y P. Jacobs, «Mapping volcano topography with remote sensing: ASTER vs. SRTM.,» *International Journal of Remote Sensing*, vol. 29, p. 6515–6538, 2008.
- [16] K. Joyce, S. Belliss, S. Samsonov, S. McNeill y P. Glassey, «A review of the status of satellite remote sensing and image processing techniques for mapping natural hazards and disasters,» *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, vol. 33, n<sup>o</sup> 2, p. 183–207, 2009.
- [17] M. Arnous y D. Green, «GIS and remote sensing as tools for conducting geo-hazards risk assessment along Gulf of Aqaba coastal zone, Egypt.,» *Journal of Coastal Conservation*, vol. 15, p. 457–475, 2011.
- [18] J. Pallister, D. Schneider, J. Griswold, R. Keeler, W. Burton, C. Noyles, C. Newhall y A. Ratdompurbo, «Merapi 2010 eruption—Chronology and extrusion rates monitored with satellite radar and used in eruption forecasting,» *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 216, pp. 144-152, 2013.
- [19] Z. Zhu, «Change detection using landsat time series: A review of frequencies, preprocessing, algorithms, and applications,» *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 130, p. 370–384, 2017.
- [20] S. Loughlin, S. Sparks, S. Brown, S. Jenkins y C. Vye-Brown, *Global Volcanic Hazards and Risk*, Cambridge, UK,: Cambridge University Press, 2015, p. 80.



- [21] A. Aldeghi, S. Carn, R. Escobar-Wolf y G. Groppelli, «Volcano Monitoring from Space Using High-Cadence Planet CubeSat Images Applied to Fuego Volcano, Guatemala,» *Remote sensing*, vol. 11, n<sup>o</sup> 18, p. 18, 2019.
- [22] S. Ebmeier, B. Andrews, M. Araya, D. Arnold, J. Biggs, C. Cooper, E. Cottrell, M. Furtney, J. Hickey, J. Jay, R. Lloyd, A. L. Parker, M. E. Pritchard, E. V. E. Robertson y J. L. Williamson, «Synthesis of global satellite observations of magmatic and volcanic deformation: implications for volcano monitoring & the lateral extent of magmatic domains,» *Journal of Applied Volcanology*, vol. 7, 2018.
- [23] D. Pyle, T. Mather y J. Biggs, «Remote sensing of volcanoes and volcanic processes: Integrating observation,» *Geological Society, London, Special Publications*, vol. 380, pp. 1-13, 2013.
- [24] P. Francis, «Remote sensing of volcanoes,» *Advances in Space Research*, vol. 9, n<sup>o</sup> 1, pp. 89 - 92, 1989.
- [25] G. Alvarado y S. Paniagua, «La catástrofe del volcán Nevado del Ruiz (1985), Colombia: una perspectiva hacia la realidad volcánica en Costa Rica,» *Tecnología en marcha*, vol. 9, n<sup>o</sup> 1, p. 17, 1987.
- [26] Servicio Geológico Colombiano, *Geología y estratigrafía del complejo volcánico Nevado del Ruíz / Servicio Geológico Colombiano (SGC)*, Bogotá: Gobierno de Colombia, 2014.
- [27] Servicio Geológico Colombiano, «Mapa de amenaza volcánica del Volcán Nevado del Ruiz,» Gobierno de Colombia, Bogotá, 2015.
- [28] Universidad de Murcia, «Sistemas de Información Geográfica de la licenciatura de Ciencias Ambientales e Introducción a los Sistemas de Información Geográfica de la licenciatura de Geografía. Plataformas, sensores y canales,» Universidad de Murcia, Murcia, 2003.
- [29] National Geospatial Intelligence Agency, «Specification of the design of SICD data products for SAR complex images,» NATIONAL CENTER FOR GEOSPATIAL INTELLIGENCE STANDARDS, Springfield, VA, 2021.
- [30] European Space Agency, «WorldView,» Eduspace, [En línea]. Available: [https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace\\_ES/SEM7Oo7SXIG\\_o.html](https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_ES/SEM7Oo7SXIG_o.html). [Último acceso: 6 Septiembre 2023].
- [31] European Space Agency, «Planetscope Instruments,» [En línea]. Available: <https://earth.esa.int/eogateway/missions/planetscope>. [Último acceso: 6 Septiembre 2023].

- [32] European Space Agency, «COSMO-SkyMed instruments,» [En línea]. Available: <https://earth.esa.int/eogateway/missions/cosmo-skymed>. [Último acceso: 6 Septiembre 2023].
- [33] Servicio Geológico Colombiano, «Boletín semanal de actividad volcán Nevado del Ruiz 09 de julio de 2019 (17:40 Hora Local),» Gobierno de Colombia, Manizales, 2019.
- [34] Servicio Geológico Colombiano, «Boletín semanal de actividad volcán Nevado del Ruiz 19 de enero de 2021 (20:30 hora local),» Gobierno de Colombia, Manizales, 2021.



# INTEGRACIÓN DE HERRAMIENTAS DIGITALES EN LA ENSEÑANZA DE MODELOS DINÁMICOS EN EL ÁLGEBRA BOOLEANA, UN EJEMPLO EN MODELACIÓN AEROESPACIAL

**Nelson Andrés Cabrera Narváez<sup>1</sup>**

Orcid: 0009-0008-9234-259  
ncabrera@admoon.uniajc.edu.co

**Mario Germán Domínguez Pombo<sup>2</sup>**

Orcid: 0009-0005-7441-063X  
mgdominguez@admon.uniajc.edu.co

/Institución Universitaria Antonio José Camacho

## CAPÍTULO 2

1 Licenciado en Matemáticas y Física de la Universidad del Valle, Magíster en Educación de la Corporación Universitaria UNIMINUTO. Con 18 años de experiencia en la docencia. Actualmente me desempeño como docente de tiempo completo de matemáticas del Departamento de Ciencias Básicas de la Institución Universitaria Antonio José Camacho. Líder del Semillero de investigación SEMOSIMA y director del Proyecto de investigación en Movilidad y transporte universitario en la UNIAJC adjudicado al semillero. Asignaturas dictadas (Matemáticas Discretas, Cálculo Diferencial, Integral y vectorial, Álgebra Lineal, Programación lineal, Lógica y Razonamiento, Matemáticas financieras y Matemáticas I y II).

2 Tecnólogo Mecatrónico, Ingeniero Electrónico de la Institución Universitaria Antonio José Camacho. Magíster en Enseñanza de la Matemática de la Universidad Tecnológica de Pereira. Con 6 años de experiencia en el campo de la educación universitaria, profesor tiempo completo del área de Matemáticas en la Institución Universitaria Antonio José Camacho, investigador del Programa de Mecánica y profesor hora cátedra de la Escuela Militar de Aviación “Marco Fidel Suárez”.

**Resumen.** La integración de herramientas digitales en la enseñanza y el aprendizaje de conceptos de ingeniería es fundamental para la formación de los estudiantes, especialmente en Álgebra Booleana y sus modelos dinámicos. Estas herramientas facilitan la comprensión de la utilidad de los conceptos aprendidos en sus aplicaciones prácticas, brindando la oportunidad de poner en práctica lo desarrollado en clase. Diversos estudios han demostrado que la incorporación de herramientas digitales en la enseñanza motiva a los estudiantes y tiene un impacto positivo en el rendimiento académico. Por lo tanto, este trabajo de investigación tiene como objetivo implementar una serie de herramientas digitales (Thatquiz, Educaplay y Crocodile Clips) para los estudiantes de Ingeniería Electrónica de la UNICAMACHO, en séptimo semestre del período académico 2023-1, en la enseñanza de modelos dinámicos mediante ejemplos de modelación aeroespacial basados en Álgebra Booleana. La investigación busca mejorar la comprensión y aplicación de conceptos complejos mediante el uso de tecnología educativa, preparando así a los estudiantes para enfrentar los desafíos del mundo real en su futura carrera profesional en ingeniería electrónica.

**Abstract.** The integration of digital tools for the teaching and learning of engineering concepts is of most importance in the education of students, especially in Boolean Algebra and its dynamic models. These tools allow understanding the usefulness of the concepts learned in their fields of action, providing the opportunity to practice what has been developed in the classes. Thus, in different studies have shown that the incorporation of digital tools in teaching motivates students, having a positive impact on academic performance. Therefore, this research work aims to implement a series of digital tools (Thatquiz, Educaplay and Crocodile Clips) to Electronic Engineering students of UNICAMACHO of seventh semester of the academic period 2023-1, in the teaching of dynamic models, using examples of aerospace modeling based on Boolean Algebra. This research seeks to improve the understanding and application of complex concepts through the use of educational technology, thus preparing students to face the challenges of the real world in their future professional career in electronic engineering.

**Palabras clave:** Álgebra Booleana, Herramientas digitales de aprendizaje, modelación aeroespacial, ingeniería Electrónica, Modelos dinámicos.

**Keywords:** Boolean algebra, Digital learning tools, mathematical modeling, aerospace engineering, electronic engineering, Dynamic models.



## 1. Introducción

La ingeniería de sistemas con enfoques aeroespaciales es una disciplina altamente especializada que requiere una comprensión profunda de los principios de la electrónica digital y el álgebra booleana (Serna, 2011). La aplicación de herramientas digitales en la enseñanza de estos conceptos es esencial para preparar a los estudiantes para enfrentar los desafíos tecnológicos en esta industria en constante evolución. Esta propuesta de investigación tiene como objetivo explorar cómo la integración de herramientas digitales en la enseñanza del álgebra booleana puede mejorar la comprensión de los estudiantes y cómo estos conocimientos pueden aplicarse en la creación de modelos dinámicos relevantes para la ingeniería aeroespacial.

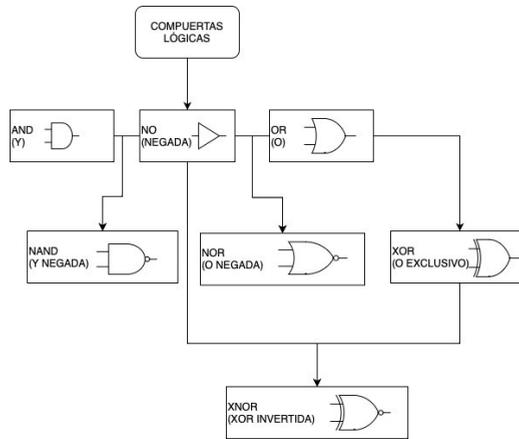
La inteligencia artificial (IA) se ha convertido en una disciplina fundamental en la actualidad, con aplicaciones que abarcan desde el procesamiento de lenguaje natural hasta la visión por computadora y la toma de decisiones. A medida que los modelos de IA se vuelven más complejos, la capacidad de interpretar y explicar sus decisiones se convierte en un desafío importante. El álgebra booleana proporciona una base sólida para la representación y la lógica, lo que podría ser valioso para mejorar la interpretación y explicación de los modelos de IA. Esta investigación busca explorar cómo el álgebra booleana puede integrarse en modelos de aprendizaje automático para mejorar la comprensión de los conceptos desarrollados en un curso de matemáticas discretas.

Asimismo, se evaluará la efectividad de las herramientas digitales en la enseñanza del álgebra booleana, el impacto de la comprensión del álgebra booleana en la capacidad de los estudiantes para abordar problemas prácticos en ingeniería aeroespacial, y el efecto de desarrollar modelos dinámicos basados en los conceptos de álgebra booleana para aplicaciones en ingeniería aeroespacial.

## 2. Fundamentos del Álgebra Booleana en la IA

El álgebra booleana se basa en la lógica binaria, que utiliza los valores "verdadero" (1) y "falso" (0) para representar y manipular información. Estos conceptos son esenciales en la programación de sistemas de inteligencia artificial (IA). Uno de los pilares del álgebra booleana es la compuerta lógica AND, que permite la conjunción de múltiples condiciones. En el contexto de la IA, esto se traduce en la combinación de múltiples criterios para tomar decisiones. En la Figura 1 se ilustran las compuertas lógicas utilizadas en el álgebra booleana y sus respectivas notaciones.

**Figura 1.** *Compuertas Lógicas*



*Fuente: Elaboración propia.*

### **Combinando Lógica y Aprendizaje Automático:**

Un ejemplo claro de la influencia del álgebra booleana en la inteligencia artificial (IA) es la construcción de reglas lógicas para la toma de decisiones en sistemas de aprendizaje automático. Autores como Russell y Norvig (2018) en “Inteligencia Artificial: Un Enfoque Moderno” destacan cómo las reglas booleanas se utilizan para definir condiciones y acciones en sistemas basados en reglas, como los sistemas expertos. Estos sistemas pueden realizar diagnósticos médicos, análisis financieros y tomar decisiones complejas al combinar lógica y datos empíricos.

### **Simuladores y su Rol en la Educación:**

- Los simuladores se han convertido en una herramienta poderosa para la enseñanza de compuertas lógicas y álgebra booleana. Estos programas permiten a los estudiantes interactuar con conceptos abstractos de manera tangible y visual, facilitando la comprensión y retención del material. Algunos simuladores avanzados ofrecen entornos de aprendizaje en 3D, donde los estudiantes pueden diseñar, probar y depurar circuitos lógicos en tiempo real, brindando una experiencia práctica que simula la realidad sin necesidad de equipos costosos o laboratorios físicos.
- **Práctica interactiva:** Las tecnologías ofrecen oportunidades para que los estudiantes practiquen y experimenten con el álgebra booleana de manera interactiva. Pueden realizar simulaciones y resolver problemas en línea, lo que refuerza su comprensión y habilidades.

- **Retroalimentación inmediata:** Las herramientas tecnológicas pueden proporcionar retroalimentación instantánea sobre los pasos incorrectos en la resolución de problemas, permitiendo a los estudiantes corregir sus errores de manera eficiente y aprender de ellos.
- **Personalización del aprendizaje:** Con la tecnología, los profesores pueden adaptar el contenido y las actividades a las necesidades individuales de los estudiantes. Esto es especialmente beneficioso en una clase universitaria donde los niveles de conocimiento pueden variar ampliamente.
- **Preparación para la práctica en ingeniería aeroespacial:** El álgebra booleana es fundamental en la ingeniería aeroespacial, ya que se utiliza en el diseño y análisis de sistemas digitales y circuitos electrónicos. El uso de herramientas tecnológicas en la enseñanza de esta materia prepara a los estudiantes para aplicar estos conceptos en situaciones reales de ingeniería.
- **Flexibilidad de tiempo y lugar:** Las herramientas tecnológicas permiten a los estudiantes acceder a recursos y actividades relacionadas con el álgebra booleana en cualquier momento y desde cualquier lugar, facilitando el aprendizaje autodirigido y la revisión.

Actualización constante: Las tecnologías evolucionan rápidamente, lo que significa que las herramientas utilizadas en la enseñanza pueden mantenerse al día con los avances en el campo del álgebra booleana y la ingeniería aeroespacial.

En resumen, el uso de herramientas mediadas por tecnología para enseñar el álgebra booleana en una clase de matemáticas discretas para estudiantes de ingeniería aeroespacial ofrece ventajas significativas en términos de comprensión, práctica, retroalimentación y preparación para aplicaciones prácticas en el campo, mejorando así la calidad de la educación y la preparación de los estudiantes.

Un referente bibliográfico importante en este contexto es el trabajo de Thomas Floyd en su libro "Digital Fundamentals" (2016), donde presenta ejemplos prácticos y ejercicios que pueden ser realizados en simuladores para ilustrar conceptos de compuertas lógicas y álgebra booleana. Su enfoque en la aplicación práctica de estos conceptos ha influido en la pedagogía actual al resaltar la importancia de la experimentación y la simulación.

## **Inteligencia Artificial y su Papel Transformador**

La inteligencia artificial (IA), en particular el aprendizaje automático, ha abierto una nueva dimensión en la enseñanza de compuertas lógicas y álgebra booleana. Los sistemas de IA pueden adaptarse al ritmo de aprendizaje de cada estudiante, identificar áreas de dificultad y ofrecer ejercicios personalizados para abordar esas deficiencias. Esto crea una experiencia de aprendizaje altamente individualizada que maximiza la eficacia de la enseñanza.

Un ejemplo relevante en este contexto es el trabajo de George Siemens (2013) en *“Learning Analytics: The Emergence of a Discipline”*. Siemens aborda cómo la IA y el análisis de datos pueden utilizarse en la educación para mejorar la comprensión de los estudiantes y personalizar su aprendizaje. La aplicación de estas ideas al ámbito de las compuertas lógicas y el álgebra booleana está llevando a la creación de sistemas de tutoría virtual altamente eficientes.

## **Álgebra Booleana en la Ciberseguridad**

En el artículo “Systems Engineering of Cybersecured Digital and Information Measuring Systems Based on the Signature Boolean-Polynomial Algebra Synthesis Apparatus”, los autores Tupkalo y Cherepkov (2023) refieren el uso de polinomios con álgebra booleana para identificar ataques de ciberseguridad, utilizando métodos de simplificación y construyendo matrices que permiten el cálculo rápido de posibilidades de ataques.

## **Álgebra Booleana y Redes Neuronales**

Además de los sistemas basados en reglas, el álgebra booleana también es relevante en las redes neuronales artificiales. En su obra “Deep Learning” (Goodfellow, Bengio, Courville, 2016), los autores señalan cómo las neuronas artificiales utilizan funciones de activación, como la función “step”, que se asemeja a una operación booleana, para modelar relaciones no lineales en los datos. Esto permite a las redes neuronales aprender representaciones complejas de los datos, lo que es esencial en muchas aplicaciones de IA, como el reconocimiento de imágenes y el procesamiento de texto.

## **Compuertas Lógicas: La Base de la Electrónica Digital**

Las compuertas lógicas son elementos fundamentales en la electrónica digital. Estas pequeñas unidades de lógica realizan operaciones booleanas y son la base de la construcción de circuitos digitales complejos. Comprender cómo funcionan las compuertas lógicas y cómo se combinan para realizar tareas específicas es esencial para cualquier estudiante de disciplinas relacionadas con la tecnología.

## Desafíos Tradicionales en la Enseñanza de Compuertas Lógicas

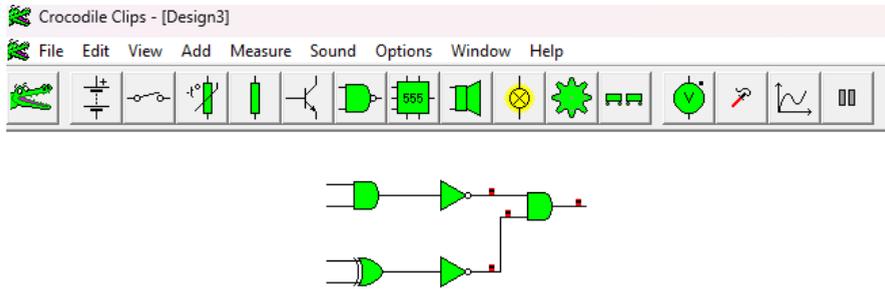
Antes de la aparición de simuladores como Crocodile Clips, la enseñanza de compuertas lógicas solía ser un desafío. Los estudiantes a menudo se enfrentaban a conceptos abstractos difíciles de visualizar. Además, la construcción de circuitos reales requería tiempo y recursos, y los errores podían ser costosos en términos de componentes dañados y tiempo perdido.

## Crocodile Clips: Una Herramienta de Aprendizaje Transformadora

- Crocodile Clips ha revolucionado la enseñanza de compuertas lógicas al proporcionar una plataforma interactiva y visual que aborda muchos de los desafíos tradicionales. Aquí están algunas de las razones por las que Crocodile Clips es una herramienta de aprendizaje transformadora:
- **Visualización Clara:** Crocodile Clips permite a los estudiantes ver de manera clara y concisa cómo funcionan las compuertas lógicas. La representación visual de las compuertas y los circuitos digitales hace que los conceptos abstractos sean más accesibles y comprensibles.
- **Experimentación Sin Riesgos:** Una de las ventajas más destacadas de Crocodile Clips es que permite a los estudiantes experimentar sin riesgos. Pueden construir y probar circuitos lógicos sin preocuparse por dañar componentes físicos o incurrir en costos adicionales.
- **Retroalimentación Inmediata:** Crocodile Clips proporciona retroalimentación instantánea. Cuando los estudiantes construyen circuitos incorrectos, el simulador los alerta de manera inmediata, lo que les permite identificar y corregir errores de manera eficiente. Esto refuerza la comprensión de los conceptos.
- **Exploración de Múltiples Escenarios:** Los estudiantes pueden utilizar Crocodile Clips para explorar una variedad de escenarios. Pueden diseñar circuitos lógicos con diferentes configuraciones y observar cómo afecta al comportamiento general del circuito. Esto promueve la experimentación activa y la resolución de problemas.

**Aplicación en el Mundo Real:** Crocodile Clips permite a los estudiantes relacionar los conceptos de compuertas lógicas con aplicaciones del mundo real. Pueden diseñar circuitos que simulen problemas prácticos, como sistemas de alarma, sistemas de control y más. Esto les ayuda a ver la relevancia de lo que están aprendiendo, como se evidencia en la figura 2, donde los estudiantes desarrollaron circuitos lógicos para la solución de problemas en contextos cotidianos.

**Figura 2.** Actividad desarrollada en Crocodile Clips



Fuente: Crocodile Clips 3.5.

## Implementación de Compuertas Lógicas en la Automatización de Aeronaves

- La implementación de compuertas lógicas en la automatización de aeronaves es crítica en la industria aeroespacial, ya que permite el control y la gestión de diversas funciones y sistemas dentro de una aeronave. A continuación, se presentan algunas formas en que se utilizan las compuertas lógicas en la automatización de aeronaves:
- **Control de Sistemas de Vuelo:** Las compuertas lógicas se utilizan para determinar las condiciones bajo las cuales ciertos sistemas de vuelo deben activarse o desactivarse. Por ejemplo, una compuerta lógica puede decidir si se deben desplegar los flaps de las alas o el tren de aterrizaje según la velocidad, la altitud y otros parámetros de vuelo.
- **Sistemas de Navegación:** En la navegación aérea, las compuertas lógicas pueden utilizarse para tomar decisiones en función de la información de los sensores y los sistemas de posicionamiento. Por ejemplo, una compuerta lógica podría determinar si es necesario cambiar de ruta o ajustar la altitud en función de los datos de un sistema de navegación por satélite (GNSS).
- **Sistemas de Comunicación:** En la automatización de aeronaves, las compuertas lógicas pueden gestionar las comunicaciones de la aeronave, decidir cuándo transmitir o recibir datos y cuándo cambiar entre diferentes frecuencias de comunicación, como las utilizadas para la comunicación con la torre de control y otros aviones.
- **Gestión de Sistemas de Seguridad:** Las compuertas lógicas también se utilizan en la gestión de sistemas de seguridad críticos, como el sistema antihielo. Pueden tomar decisiones sobre cuándo activar o desactivar los sistemas de descongelación de las superficies del avión en función de las condiciones ambientales y la información de los sensores.

- **Control de Sistemas de Entretenimiento y Confort:** En aeronaves comerciales, las compuertas lógicas pueden utilizarse para controlar sistemas de entretenimiento y confort para los pasajeros. Por ejemplo, pueden gestionar la iluminación de la cabina, el control de temperatura y la distribución de audio y video.
- **Sistemas de Monitoreo y Diagnóstico:** Las compuertas lógicas también se utilizan en sistemas de monitoreo y diagnóstico de la aeronave. Pueden tomar decisiones sobre cómo gestionar los sistemas de diagnóstico y alertar a la tripulación en caso de fallos o problemas técnicos.

**Control de Sistemas de Carga y Descarga:** En aviones de carga, las compuertas lógicas pueden ser esenciales para controlar el proceso de carga y descarga de la aeronave, asegurando que se realice de manera segura y eficiente.

Es importante destacar que las compuertas lógicas en la automatización de aeronaves son solo una parte de sistemas mucho más complejos que involucran sensores, controladores y sistemas de software avanzados. Estos sistemas se diseñan y prueban rigurosamente para garantizar la seguridad y el rendimiento de las aeronaves en una variedad de condiciones de vuelo.

En el campo aeroespacial se pueden encontrar investigaciones como la de Issury et al. (2013) en el uso de álgebra booleana como un método novedoso para el diagnóstico de fallas en naves espaciales durante misiones de la Agencia Espacial Europea (ESA) y el IMS Laboratory and Thales Alenia Space. Este enfoque minimiza la cantidad de diagnósticos realizados y listas, resolviendo el aislamiento de fallos.

### **Simuladores Interactivos y Teorías del Aprendizaje**

Los simuladores han demostrado ser una herramienta invaluable para la enseñanza y capacitación en la ingeniería aeroespacial. La complejidad de los sistemas aeroespaciales hace que la experiencia práctica sea costosa y potencialmente peligrosa. Los simuladores permiten a los estudiantes y profesionales experimentar y depurar diseños y algoritmos en un entorno virtual antes de implementarlos en el mundo real. Esta simulación reduce riesgos, costos y tiempo, al mismo tiempo que fomenta una comprensión más profunda de los sistemas aeroespaciales.

Para comprender por qué la implementación de simuladores interactivos es un enfoque educativo eficaz en la enseñanza del álgebra booleana, es importante considerar algunas teorías fundamentales del aprendizaje. Entre ellas, se destaca la teoría constructivista, que sugiere que los estudiantes

construyen su conocimiento activamente a través de la interacción con su entorno y la resolución de problemas. Los simuladores interactivos se alinean perfectamente con esta teoría al proporcionar a los estudiantes una experiencia de aprendizaje activa y participativa.

Según Piaget (1952), los estudiantes avanzan a través de etapas de desarrollo cognitivo, y su comprensión de los conceptos se desarrolla a medida que interactúan con su entorno y resuelven problemas. Los simuladores interactivos ofrecen una plataforma que permite a los estudiantes explorar y experimentar con conceptos de álgebra booleana de una manera visual y práctica. Al manipular lógicamente los elementos en el simulador, los estudiantes pueden observar instantáneamente cómo las diferentes operaciones afectan a los resultados. Esto fomenta la observación reflexiva y la conceptualización abstracta, dos componentes clave del aprendizaje según Kolb (1984).

El desarrollo de simuladores interactivos para la enseñanza del álgebra booleana implica la creación de herramientas digitales que representen conceptos y operaciones de álgebra booleana de manera visual y accesible. Estos simuladores deben ser intuitivos y adaptarse a diferentes niveles de habilidad de los estudiantes. Uno de los principales desafíos en el desarrollo de simuladores es equilibrar la simplicidad para principiantes con la capacidad de proporcionar desafíos más complejos para estudiantes avanzados.

Un referente bibliográfico significativo en este contexto es el libro *“Digital Design and Computer Architecture”* de David Money Harris y Sarah L. Harris, que proporciona una sólida introducción a los principios de diseño digital, incluyendo compuertas lógicas y álgebra booleana. A medida que la ingeniería aeroespacial se vuelve cada vez más digital y basada en sistemas, esta obra se ha convertido en un recurso esencial para los estudiantes y profesionales que buscan comprender y aplicar estos conceptos en su trabajo.

Los simuladores pueden incluir representaciones gráficas de puertas lógicas, tablas de verdad interactivas, ejercicios prácticos y problemas para resolver. Estos elementos permiten a los estudiantes experimentar con las operaciones booleanas y ver cómo afectan los resultados en tiempo real. Además, los simuladores pueden proporcionar retroalimentación inmediata, lo que es esencial para el proceso de aprendizaje. Por ejemplo, si un estudiante intenta construir un circuito lógico que no cumple con una cierta condición, el simulador puede alertar al estudiante y proporcionar pistas para corregir el error.



## Beneficios Educativos de los Simuladores Interactivos

- La implementación de simuladores interactivos en la enseñanza del álgebra booleana ofrece una serie de beneficios educativos significativos:
- **Experiencia de Aprendizaje Activa:** Los simuladores permiten a los estudiantes participar activamente en el proceso de aprendizaje. Pueden experimentar directamente con los conceptos y operaciones, facilitando la comprensión y la retención del conocimiento.
- **Visualización de Conceptos Abstractos:** El álgebra booleana implica conceptos abstractos como puertas lógicas y tablas de verdad. Los simuladores proporcionan representaciones visuales que hacen que estos conceptos sean tangibles y accesibles.

**Retroalimentación Inmediata:** Los simuladores pueden ofrecer retroalimentación instantánea sobre la corrección de las soluciones y los errores cometidos por los estudiantes, lo que mejora la capacidad para aprender de los errores y ajustar el enfoque de estudio.

## Inteligencia Artificial y su Contribución Transformadora

La inteligencia artificial, incluida la tecnología de aprendizaje automático, ha comenzado a desempeñar un papel fundamental en la enseñanza y aplicación de conceptos de compuertas lógicas y álgebra booleana en la ingeniería aeroespacial. Los sistemas de IA pueden analizar el progreso y las áreas problemáticas de los estudiantes, proporcionando retroalimentación personalizada y ejercicios adaptativos. Esto permite a los ingenieros aeroespaciales en formación adquirir habilidades de manera más rápida y eficiente.

Un punto de referencia en este contexto es el trabajo de Richard M. Felder y Rebecca Brent en "*The Intelligence of the Artificial Variety.*" El artículo explora cómo la IA se está utilizando para mejorar la educación en ingeniería, adaptando el contenido y las estrategias de enseñanza para satisfacer las necesidades individuales de los estudiantes, especialmente en el ámbito de la ingeniería aeroespacial.

- **Referentes Teóricos en Álgebra Booleana.**
- **George Boole (1854) - "An Investigation of the Laws of Thought":** George Boole es el matemático pionero en el desarrollo del álgebra booleana. Su obra es fundamental para entender los principios lógicos subyacentes al álgebra booleana y su aplicación en la representación de sistemas lógicos en herramientas digitales.

- **Claude Shannon (1938)** - “**A Symbolic Analysis of Relay and Switching Circuits**”: Conocido como el “padre de la teoría de la información,” Shannon realizó un trabajo seminal en la aplicación del álgebra booleana a la electrónica digital, demostrando cómo las funciones lógicas pueden representarse mediante álgebra booleana y aplicarse a la construcción de circuitos digitales.
- **Donald Knuth (1968)** - “**The Art of Computer Programming**”: En su influyente serie de libros, Knuth explora en detalle el uso del álgebra booleana en la programación y el diseño de algoritmos, ofreciendo una perspectiva teórica y práctica sobre cómo las herramientas digitales se basan en principios booleanos.
- **Michael Sipser (2012)** - “**Introduction to the Theory of Computation**”: Este libro es una referencia importante para entender cómo los conceptos del álgebra booleana se aplican en la teoría de la computación, explicando cómo las máquinas de Turing y otros modelos computacionales se relacionan con la lógica booleana.

**Thomas H. Cormen, Charles E. Leiserson, Ronald L. Rivest, y Clifford Stein (2009)** - “**Introduction to Algorithms**”: Este libro, ampliamente utilizado en cursos de algoritmos y estructuras de datos, ofrece una perspectiva sólida sobre cómo los principios del álgebra booleana influyen en el diseño y análisis de algoritmos en herramientas digitales.

Estos referentes teóricos son fundamentales para comprender la relación entre el álgebra booleana y la implementación de herramientas digitales en campos como la electrónica, la informática y la teoría de la computación. Proporcionan una base sólida para el desarrollo y la comprensión de sistemas digitales y algoritmos.

En resumen, la implementación de simuladores interactivos y la integración de la inteligencia artificial están revolucionando la enseñanza y aplicación de las compuertas lógicas y el álgebra booleana en la ingeniería aeroespacial. Estas tecnologías están potenciando a la próxima generación de ingenieros aeroespaciales, equipándolos con las habilidades necesarias para enfrentar los desafíos y oportunidades en un mundo impulsado por la tecnología espacial y la aviación. En este documento, exploraremos más a fondo cómo estas innovaciones están transformando la educación y la práctica en la ingeniería aeroespacial y cuál es su impacto en el desarrollo de soluciones avanzadas en este emocionante campo.

### 3. Metodología

La metodología de investigación-acción se revela como un enfoque altamente efectivo para abordar la implementación de herramientas computacionales con el objetivo de mejorar el aprendizaje del álgebra booleana en un curso de matemáticas discretas universitario. Este enfoque implica una colaboración estrecha entre el docente y los estudiantes, siguiendo ciclos de planificación, acción, reflexión y adaptación continua.

- 1. Fase de Planificación:** En esta fase, se identifica un desafío específico relacionado con la comprensión y el interés de los estudiantes en el álgebra booleana. Se seleccionan cuidadosamente las herramientas computacionales, como simuladores o software interactivo, que pueden ayudar a abordar este desafío.
- 2. Fase de Acción:** La implementación de estas herramientas se lleva a cabo en el entorno de enseñanza con el objetivo de mejorar la comprensión de los conceptos del álgebra booleana. Los estudiantes interactúan con estas herramientas, resuelven problemas y exploran conceptos de una manera más activa y visual.
- 3. Fase de Reflexión y Adaptación:** Se recopilan datos sobre el uso de las herramientas y se obtiene retroalimentación de los estudiantes, proporcionando una visión valiosa sobre la eficacia de la estrategia. En esta fase, el docente y los estudiantes analizan los resultados y ajustan la implementación según sea necesario para optimizar el proceso de aprendizaje. Esta metodología permite una mejora constante y personalizada en la enseñanza del álgebra booleana, asegurando que los estudiantes adquieran una comprensión sólida de estos conceptos clave en matemáticas discretas.

#### Aplicación del Estudio

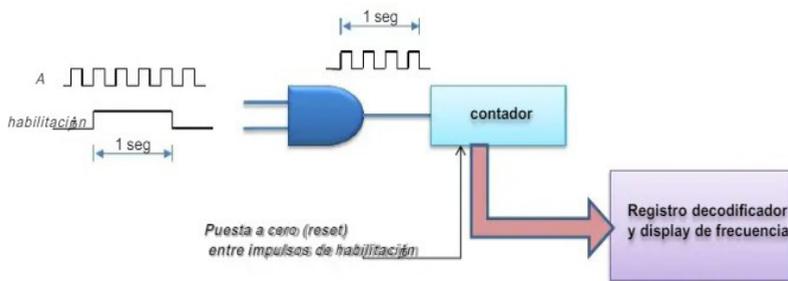
El estudio se aplicó a estudiantes de la Universidad Antonio José Camacho, específicamente del séptimo semestre de ingeniería electrónica, en el curso de matemáticas discretas del período 2023-1. Se tomó una muestra de 23 estudiantes de un total de 200 estudiantes que cursan matemáticas discretas en un semestre regular. Estos estudiantes contaban con conocimientos previos en programación en lenguajes básicos como Python y Excel.

### Fases del Trabajo:

- **Fase 1: Enseñanza del Álgebra Booleana:** Se llevaron a cabo clases que utilizaron herramientas digitales, como simuladores y software de diseño, para enseñar el álgebra booleana a los estudiantes. Se recopilaron datos sobre la efectividad de estas herramientas en la comprensión de los conceptos.
- **Fase 2: Desarrollo de Modelos Dinámicos:** Basándose en los conceptos del álgebra booleana, se desarrollaron modelos dinámicos que representan sistemas de interés en ingeniería aeroespacial, como sistemas de control de vuelo, sistemas de navegación y sistemas de comunicación satelital.

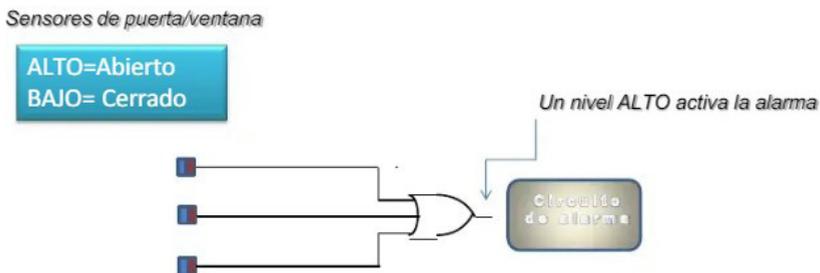
En las Figuras 4, 5 y 6, se ilustran ejemplos de compuertas lógicas utilizadas en el desarrollo de las clases, con el propósito de fortalecer la visualización y contextualización del álgebra booleana en sistemas dinámicos.

**Figura 3.** La compuerta And como circuito de habilitación/inhibición



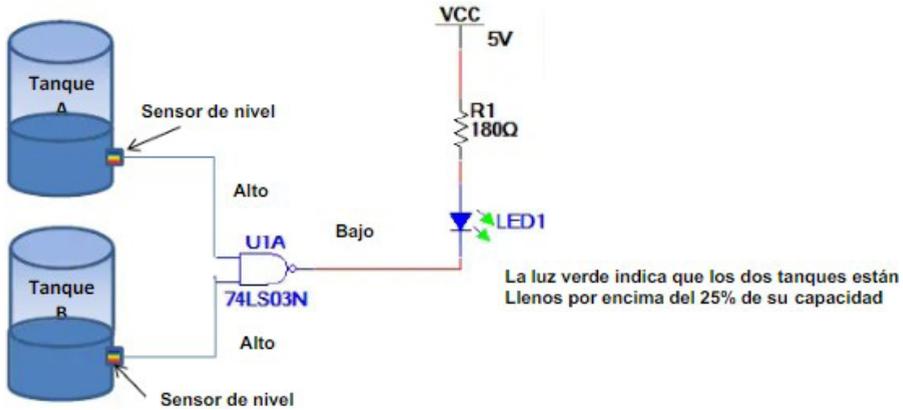
Fuente: Automatización, M. (2015). Álgebra de Boole. [https://www.academia.edu/15232420/Algebra\\_de\\_Boole](https://www.academia.edu/15232420/Algebra_de_Boole)

**Figura 4.** Sistema de alarma y detección de intrusos



Fuente: Automatización, M. (2015). Álgebra de Boole. [https://www.academia.edu/15232420/Algebra\\_de\\_Boole](https://www.academia.edu/15232420/Algebra_de_Boole)

**Figura 5.** Planta que almacena líquidos químicos para el reciclaje de sus productos

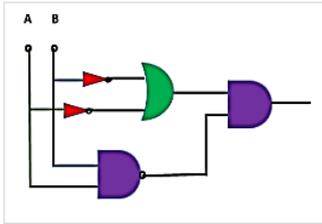


Fuente: Automatización, M. (2015). *Álgebra de Boole*.  
[https://www.academia.edu/15232420/Algebra\\_de\\_Boole](https://www.academia.edu/15232420/Algebra_de_Boole)

- **Fase 3:** Los modelos dinámicos desarrollados serán evaluados mediante simulaciones y pruebas en situaciones prácticas de ingeniería electrónica. Se recopilarán datos sobre su aplicabilidad y eficacia en la resolución de problemas del mundo real.
- Esta fase empleó herramientas digitales educativas (Thatquiz, Educaplay) para la evaluación, permitiendo evidenciar los resultados de las actividades metodológicas implementadas. El recurso Educaplay se utilizó como plataforma para el entrenamiento y mecanización de algoritmos. Esta actividad consistió en 10 preguntas, distribuidas de la siguiente manera:
- Tres preguntas sobre la identificación de elementos básicos de las compuertas lógicas.

Tres preguntas que relacionan la articulación entre la expresión algebraica booleana, la valoración a través de las tablas lógicas y la representación gráfica respectiva, como se muestra en la Figura 6.

**Figura 6.** Pregunta del test implementado a los estudiantes en la etapa de entrenamiento



Algebra de Boole

La expresión lógica para el siguiente circuito es:

$(AB)' + (A' + B')$

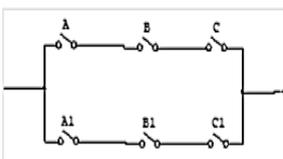
$(AB)'(A'B')$

$(AB)'(A' + B')$

Fuente: [https://es.educaplay.com/recursos-educativos/4165109-algebra\\_de\\_boole.html](https://es.educaplay.com/recursos-educativos/4165109-algebra_de_boole.html)

- Las cuatro últimas preguntas sobre aplicaciones de las compuertas lógicas en modelos dinámicos (circuitos, modificación del clima, sistemas de posición global, y modelos de aprehensión y reconocimiento de elementos básicos de las aeronaves), como se evidencia en la Figura 7.

**Figura 7.** Pregunta del test implementado a los estudiantes en la etapa de entrenamiento



Algebra de Boole

El polinomio asociado al circuito de la figura es:

$ABC + A_1B_1C_1$  Opción 1

$ABCA_1B_1C_1$  Opción 2

$(AB)'(A'+B')$  Opción 3

Fuente: [https://es.educaplay.com/recursos-educativos/4165109-algebra\\_de\\_boole.html](https://es.educaplay.com/recursos-educativos/4165109-algebra_de_boole.html)

Por otro lado, el recurso de Thatquiz se utilizó para la evaluación y seguimiento de las fases uno y dos, aplicando 19 preguntas que seguían la misma estructura que las preguntas desarrolladas en la plataforma Educaplay. En las Figuras 8 y 9, se intenta evaluar la simplificación de códigos booleanos utilizando propiedades del álgebra booleana, para posteriormente verificarlos con la herramienta Crocodile Clips.

**Figura 8.** *Pregunta del test implementado a los estudiantes en la etapa de evaluación*

5. Q) Antonio tiene un fichero de proveedores con 1.000 proveedores registrados. Y quiere llevarlo todo a una estructura de árbol binario de búsqueda.

¿Qué nivel mínimo tendría que alcanzar el árbol binario? A) 9

Fuente: <https://www.thatquiz.org/es/teacher.html>

**Figura 9.** *Pregunta del test implementado a los estudiantes en la etapa de evaluación*

Se pretende construir un circuito combinacional de control de paro automático del motor de un ascensor de un edificio. El funcionamiento del motor depende de 3 variables. En primer lugar, de que la puerta del ascensor está abierta o cerrada (A); en segundo lugar, del peso de las personas que suben en el ascensor (P); y en tercer lugar, de que alguna persona haya pulsado los pulsadores de las distintas plantas (B). El motor se parará automáticamente siempre que la puerta del ascensor esté abierta, o bien se sobrepase el peso máximo, que es de 800 Kg. (considerar motor parado 1).¶

Construye la tabla de verdad.¶

Obtenga la función.¶

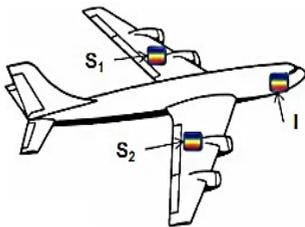
Dibuje el diagrama de puertas¶

Fuente: <https://www.thatquiz.org/es/teacher.html>

## El álgebra booleana ejemplo aplicativo en la ingeniería aeroespacial

La ingeniería aeroespacial es un campo en el que la precisión y la fiabilidad son vitales. Desde el diseño de sistemas de navegación y control de satélites hasta la programación de drones y la supervisión de vuelos espaciales tripulados, los conceptos de compuertas lógicas y álgebra booleana constituyen la base sobre la cual se construyen sistemas críticos para la seguridad y la exploración espacial. Por lo tanto, una formación efectiva en estos conceptos es imperativa.

**Figura 10.** Subsistema de monitoreo funcional de un avión

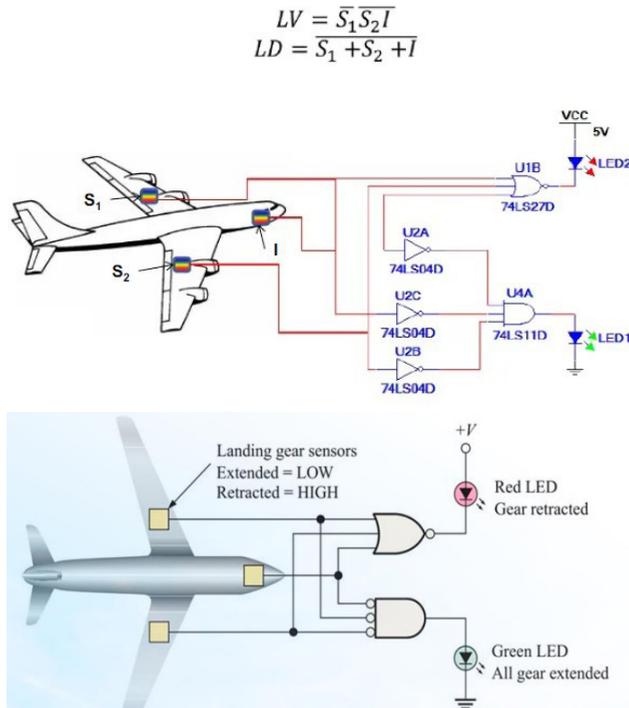


- $S_1, S_2$ : sensores del tren de aterrizaje (S)
- I: interruptor bajar tren de aterrizaje

- Si  $S = 0$  el mecanismo del tren de aterrizaje se extiende
- Si  $S = 1$  el mecanismo del tren de aterrizaje se retrae
- Si  $I = 0$  el interruptor baja el tren de aterrizaje,  $I = 1$  el interruptor no baja el tren de aterrizaje
- ✓ Se debe activar un led verde (LV), en el tablero de comando, si los tres mecanismos de aterrizaje (sensores e interruptor) están correctamente extendidos.
- ✓ Se debe activar un led rojo (LR), en el tablero de comando, si cualquiera de los mecanismos falla al extenderse antes de aterrizar.

Fuente: Automatización, M. (2015). *Álgebra de Boole*. [https://www.academia.edu/15232420/Algebra\\_de\\_Boole](https://www.academia.edu/15232420/Algebra_de_Boole)

**Figura 11.** Subsistema de monitoreo funcional de un avión  $LD=S_1+S_2+I$



Fuente: Automatización, M. (2015). *Álgebra de Boole*. [https://www.academia.edu/15232420/Algebra\\_de\\_Boole](https://www.academia.edu/15232420/Algebra_de_Boole)

La comprensión de las funciones de un avión a través del álgebra booleana es esencial para la seguridad y eficiencia en la aviación. Por ejemplo, consideremos el sistema de luces de la aeronave como un caso dinámico de modelado. Utilizando variables booleanas, podemos representar el estado de las luces de navegación, aterrizaje y posición. Si queremos determinar si las luces de aterrizaje están encendidas durante un aterrizaje, podemos crear una expresión booleana que dependa de varios factores, como el tren de aterrizaje desplegado y la fase de vuelo. Esto asegura que las luces de aterrizaje solo se enciendan cuando sea necesario, reduciendo el consumo de energía.

Otro ejemplo importante es el sistema de control de vuelo. Utilizando el álgebra booleana, podemos modelar las condiciones que activan o desactivan los sistemas de control, como el piloto automático. En este caso, se utilizaron variables combinatorias para abordar diez preguntas y árboles de decisión con binarios de búsqueda, con nueve preguntas adicionales. En total, se desarrollaron 19 preguntas para evaluar estos conceptos.

**Tabla 1.** *Resultados de estudiantes*

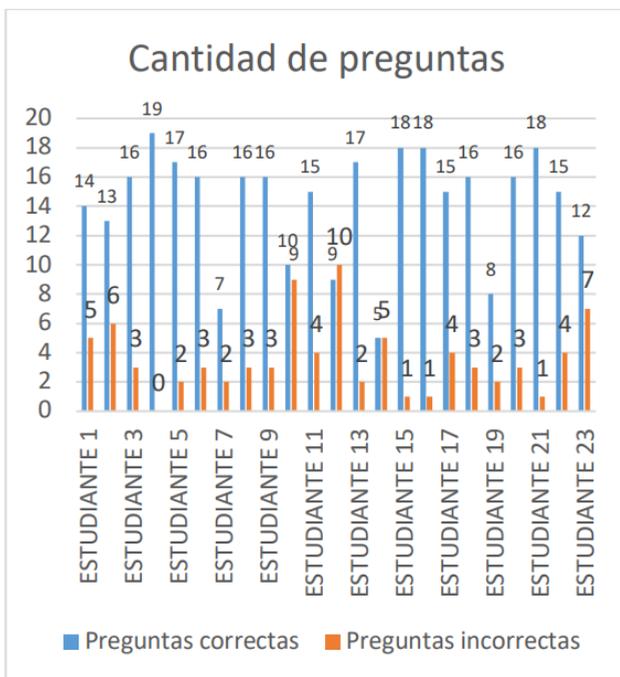
Estudiantes / Tema	Análisis combinatorio	Arboles de decisión y binarios de búsqueda	Promedio
ESTUDIANTE 1	2,5	5	3,8
ESTUDIANTE 2	4	2,8	3,4
ESTUDIANTE 3	4	4,5	4,3
ESTUDIANTE 4	5	5	5,0
ESTUDIANTE 5	5	3,9	4,5
ESTUDIANTE 6	3,5	5	4,3
ESTUDIANTE 7	0	3,9	2,0
ESTUDIANTE 8	4,5	3,9	4,2
ESTUDIANTE 9	3,5	5	4,3
ESTUDIANTE 10	3,5	1,7	2,6
ESTUDIANTE 11	3	5	4,0
ESTUDIANTE 12	1,5	3,4	2,5
ESTUDIANTE 13	4	5	4,5
ESTUDIANTE 14	2,5	0	1,3
ESTUDIANTE 15	4,5	5	4,8
ESTUDIANTE 16	4,5	5	4,8
ESTUDIANTE 17	4	3,9	4,0
ESTUDIANTE 18	3,5	5	4,3
ESTUDIANTE 19	4	0	2,0
ESTUDIANTE 20	4,5	3,9	4,2
ESTUDIANTE 21	5	4,5	4,8
ESTUDIANTE 22	4	3,9	4,0
ESTUDIANTE 23	3	3,4	3,2

*Fuente: Resultados ThatQuiz*

Como se puede observar en la tabla anterior, el promedio de los estudiantes en la actividad evaluativa fue alto, ya que solo el 22% de ellos obtuvo un puntaje inferior a la nota de superación (3,0). En contraste, el 61% de los estudiantes logró una nota superior a 4,0, lo que indica un excelente desempeño con la metodología utilizada para la enseñanza y aprendizaje del álgebra booleana.

Del mismo modo, se realizó un análisis de la cantidad de preguntas correctas e incorrectas, como se muestra en la Figura 11.

**Figura 11.** Cantidad de preguntas



Fuente: Resultados ThatQuiz

En la Figura 11 se observa que la cantidad de respuestas correctas es superior (80%) a la de respuestas incorrectas. Asimismo, se debe destacar que tres estudiantes (7, 14 y 19) mostraron un bajo rendimiento durante la prueba, ya que no respondieron a la primera parte de la actividad y/o a la segunda parte, como se muestra en la Tabla 1. En el análisis, se observa que los estudiantes 4, 15, 16 y 21 obtuvieron notas superiores a las de sus compañeros, ya que solo cometieron un error o ninguno.

La integración de inteligencia artificial para el modelamiento de funciones lógicas de un avión también arrojó resultados positivos. Los modelos dinámicos desarrollados permitieron a los estudiantes comprender cómo se aplican los conceptos del álgebra booleana en aplicaciones prácticas de la ingeniería aeroespacial. Estos modelos proporcionaron una representación precisa del comportamiento de sistemas electrónicos en aeronaves y permitieron a los estudiantes simular y analizar situaciones de control y comunicación en tiempo real.

En general, los resultados destacan la efectividad de la combinación de herramientas digitales y modelos dinámicos en la enseñanza de compuertas lógicas y su aplicación en la industria aeroespacial. La mejora en la comprensión de los estudiantes y la capacidad de aplicar estos conocimientos en situaciones reales son indicadores claros del éxito de esta estrategia de enseñanza-aprendizaje. Además, estos resultados sugieren que esta metodología podría ser valiosa en la formación de futuros profesionales de la ingeniería aeroespacial.

#### 4. Conclusiones

El álgebra booleana es una disciplina fundamental en matemáticas y lógica que desempeña un papel esencial en la informática, la electrónica y la inteligencia artificial. Sin embargo, su comprensión puede resultar desafiante para muchos estudiantes, ya que involucra conceptos abstractos y operaciones lógicas. Para abordar este desafío educativo, se ha propuesto la implementación de simuladores interactivos como una herramienta innovadora en la enseñanza del álgebra booleana. Estos simuladores permitieron a los estudiantes explorar y experimentar con los conceptos de manera visual y práctica, facilitando así su comprensión y aplicación. En esta investigación se analizó en detalle la importancia de los simuladores interactivos en la enseñanza y comprensión del álgebra booleana, evaluando sus beneficios educativos y su impacto potencial en el proceso de aprendizaje.

La investigación sobre la integración del álgebra booleana en modelos de inteligencia artificial ofrece oportunidades emocionantes para abordar desafíos relacionados con la interpretación y explicación de las decisiones de la IA. Estos avances pueden tener un impacto significativo en la adopción y confianza en la IA en aplicaciones críticas, como la atención médica, la seguridad y la toma de decisiones autónomas.

En la era digital en la que vivimos, la comprensión de los conceptos fundamentales de la electrónica digital es esencial para una amplia gama de disciplinas, desde la informática hasta la ingeniería. Uno de estos conceptos clave son las compuertas lógicas, que son la base de la construcción de circuitos digitales. Se exploró la importancia del simulador Crocodile Clips en la enseñanza y aprendizaje de compuertas lógicas para estudiantes universitarios. Esta herramienta facilita la comprensión de conceptos complejos, promueve la experimentación activa y prepara a los estudiantes para enfrentar desafíos en campos relacionados con la tecnología digital y la electrónica.

En resumen, la combinación de simuladores y la inteligencia artificial está revolucionando la enseñanza de compuertas lógicas y álgebra booleana en la actualidad. Estas tecnologías ofrecen un enfoque práctico y personalizado que facilita la adquisición de conocimientos fundamentales en informática. En este documento, se explorará más a fondo cómo estas innovaciones están cambiando la educación y cuáles son los desafíos y oportunidades que plantean en el proceso de enseñanza y aprendizaje de estos conceptos clave.

## 5. Recomendaciones

**Conexión con el mundo real:** Visualizar el álgebra booleana en contextos cotidianos, como el comportamiento electrónico de los aviones, ayuda a los estudiantes a conectar conceptos abstractos con aplicaciones prácticas y relevantes en su futura carrera en la aviación.

**Comprender sistemas electrónicos:** En la aviación moderna, los aviones dependen en gran medida de sistemas electrónicos para su operación. Comprender el álgebra booleana es esencial para entender cómo funcionan y se interconectan estos sistemas, desde sistemas de navegación hasta sistemas de comunicación y control.

**Mantenimiento y solución de problemas:** Los técnicos y profesionales de la aviación deben ser capaces de realizar mantenimiento y solucionar problemas en los sistemas electrónicos de aeronaves. El álgebra booleana es fundamental para diagnosticar y resolver problemas en estos sistemas, lo que garantiza la seguridad y la operación eficiente de las aeronaves.

**Optimización de sistemas:** La comprensión del álgebra booleana permite a los estudiantes de aviación optimizar sistemas electrónicos en aviones. Pueden diseñar circuitos de manera eficiente y asegurarse de que los sistemas cumplan con los estándares de seguridad y rendimiento.

**Preparación para emergencias:** En situaciones de emergencia, comprender cómo funcionan los sistemas electrónicos y cómo se comunican entre sí es crucial. Los estudiantes que comprenden el álgebra booleana están mejor preparados para tomar decisiones informadas y rápidas en situaciones críticas.

**Seguridad en la aviación:** La seguridad es una prioridad máxima en la aviación. La capacitación en álgebra booleana puede contribuir a la formación

de profesionales más conscientes de la importancia de la seguridad en los sistemas electrónicos y la detección de posibles fallas.

**Desarrollo y actualización de tecnología:** Los estudiantes que comprenden el álgebra booleana están mejor equipados para contribuir al desarrollo y mejora de la tecnología en la aviación. Pueden participar en la innovación y adaptación de sistemas electrónicos avanzados en la industria.

En resumen, la visualización del álgebra booleana en contextos cotidianos, especialmente en relación con el comportamiento electrónico de los aviones, es esencial para que los estudiantes de aviación adquieran las habilidades y conocimientos necesarios para su futura carrera. Les permite comprender y trabajar de manera efectiva con sistemas electrónicos en aeronaves, lo que contribuye a la seguridad y eficiencia en la aviación moderna.

## 6. Referentes bibliográficos

- Automatización, M. (2015). *Algebra de Boole*. [https://www.academia.edu/15232420/Algebra\\_de\\_Boole](https://www.academia.edu/15232420/Algebra_de_Boole)
- Boole, G. (1854). *An investigation of the laws of thought: on which are founded the mathematical theories of logic and probabilities* (Vol. 2). Walton and Maberly.
- Cormen, T. H., Leiserson, C. E., Rivest, R. L., & Stein, C. (2009). *Introduction to algorithms* (3rd ed.). MIT Press.
- Crocodile Clip .(2023). Descargar Crocodile Clip: <https://crocodileclips.net/descargar-crocodile-clips/>
- Duarte, V. (2019). *Estrategia didáctica mediada por Crocodile clip para mejorar el aprendizaje de la ley de ohm en programas técnicos en Sistemas*. Edu.co. Recuperado el 26 de septiembre de 2023, de [https://repository.libertadores.edu.co/bitstream/handle/11371/2606/B%C3%A1ez\\_%20V%C3%ADctor\\_2019.pdf?sequence=1](https://repository.libertadores.edu.co/bitstream/handle/11371/2606/B%C3%A1ez_%20V%C3%ADctor_2019.pdf?sequence=1)
- Floyd, T. (2006). *Digital Fundamentals*. Pearson Education Inc
- Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). *Deep Learning*. MIT Press.
- Harris, Sarah L., and David Money Harris. (2016). *Digital Design and Computer Architecture*. Amsterdam
- Issury, I., Henry, D., Charbonnel, C., Bornschlegl, E., & Olive, X. (2013). A Boolean algebraic-based solution for multiple fault diagnosis: Application to a spatial mission. *Aerospace Science and Technology*, 28(1), 214–226. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2012.11.002>
- Knuth, D. E. (1968). *The art of computer programming: Volume 1: Fundamental algorithms* (3rd ed.). Addison Wesley.



- Kolb, D. A. (2014). *Experiential learning: Experience as the source of learning and development*. FT press.
- Mano, M. M., & Ciletti, M. D. (2017). *Digital Design*. Pearson.
- Piaget, J. (1952). Jean Piaget. In E. G. Boring, H. Werner, H. S. Langfeld, & R. M. Yerkes (Eds.), *A History of Psychology in Autobiography*, Vol. 4, pp. 237–256. Clark University Press. <https://doi.org/10.1037/11154-011>
- Russell, S. J., & Norvig, P. (2018). *Inteligencia Artificial: Un Enfoque Moderno*. Pearson Educación.
- Rajaraman, V. (2006). *Fundamentals of Digital Logic and Microcontrollers*. PHI Learning Pvt. Ltd.
- Shannon, Claude. (1938). A Symbolic Analysis of Relay and Switching Circuits Simulation-Based Learning Tool for Digital Logic Design Education. *IEEE Transactions on Education*, 60(3), 224–231.
- Sipser, M. (2012). *Introduction to the Theory of Computation*. Cengage Learning. International edition.
- Serna Montoya, E. (2011). Métodos formales e Ingeniería de Software. *Revista Virtual Universidad Católica del Norte*, 1(30), 158–184. Recuperado a partir de <https://revistavirtual.ucn.edu.co/index.php/RevistaUCN/article/view/62>
- Siemens, G. (2013). Learning Analytics: The Emergence of a Discipline. *American Behavioral Scientist*, 57(10), 1380–1400. <https://doi.org/10.1177/0002764213498851>
- Tobagi, F. A., & Kleinrock, L. (2013). "Packet switching in radio channels: Part I—Carrier sense multiple-access modes and their throughput-delay characteristics." *IEEE Transactions on Communications*, 28(4), 553–565.
- Tupkalo, V., & Cherepkov, S. (2023). Systems engineering of cybersecured digital and information measuring systems based on the signature Boolean- polynomial algebra synthesis apparatus. *Measurements Infrastructure*, 5. [https://doi.org/10.33955/v5\(2023\)-024](https://doi.org/10.33955/v5(2023)-024)





# CAPÍTULO 3

## DESAFÍOS Y OPORTUNIDADES EN INTELIGENCIA ARTIFICIAL PARA DOCENTES DE LA ESCUELA DE CADETES DE POLICÍA

**MY. Andrés Camilo Hidalgo Arciniegas**  
camilo.hidalgo@correo.policia.gov.co  
Orcid: 0009-0009-3259-9760

**MY. Luis Carlos Cervantes Estrada**  
luis.cervante@correo.policia.gov.co  
Orcid: 0000-0002-5706-3251

/ Escuela de Cadetes de Policía  
General Francisco de Paula Santander

**Resumen.** La inteligencia artificial tiene la capacidad de analizar vastas cantidades de información y ofrecer datos útiles a los docentes, permitiéndoles tomar decisiones fundamentadas respecto a la elaboración del currículo y la enseñanza. La capacitación en tecnología es fundamental para que los docentes integren la tecnología de manera efectiva en su práctica docente y mejoren la calidad de la educación.

Se realizó un estudio con el objetivo general de identificar los principales desafíos y oportunidades que presenta la inteligencia artificial para los docentes de la Escuela de Cadetes de Policía General Francisco de Paula Santander (ECSAN). La implementación de la inteligencia artificial puede proporcionar nuevas herramientas y recursos para mejorar la calidad de la formación y el desempeño de los policías.

El estudio empleó un enfoque cualitativo y cuantitativo (mixto) y un diseño no experimental. El uso de la inteligencia artificial está transformando la educación a nivel mundial, y uno de los principales desafíos es la falta de comprensión y conocimiento acerca de ella. Es indispensable desarrollar programas de formación docente para integrar la inteligencia artificial en la práctica pedagógica.

**Palabras clave:** Desafíos, Enseñanza, Formación Policial, Inteligencia Artificial, Oportunidades.

**Abstract.** Artificial intelligence has the ability to analyze vast amounts of information and provide useful data to teachers, enabling them to make informed decisions regarding curriculum development and instruction. Training in technology is essential for teachers to effectively integrate technology into their teaching practice and improve the quality of education. The general objective of the study was to identify the main challenges and opportunities presented by Artificial Intelligence for teachers at the General Francisco de Paula Santander Police Cadet School (Escuela de Cadetes de Policía General Francisco de Paula Santander- ECSAN). The implementation of Artificial Intelligence can provide new tools and resources to improve the quality of training and performance of police officers. Using a qualitative and quantitative approach (mixed) and non-experimental design. The use of Artificial Intelligence is transforming education worldwide, one of the main challenges is the lack of understanding and knowledge about it which makes some teachers resist its use. AI has a great potential to improve higher education by allowing a more personalized and adaptive approach to learning;



but it is essential to develop teacher training programs to integrate artificial intelligence into pedagogical practice.

**Keywords:** Challenges, Teaching, Police Training, Artificial Intelligence, Opportunities

## 1. Introducción

La inteligencia artificial ha demostrado ser de gran utilidad en diversas disciplinas y entornos, incluyendo el ámbito educativo, donde se ha identificado un fortalecimiento en los procesos de enseñanza y aprendizaje. Esto representa un crecimiento tanto para el docente como para el estudiante. Cada una de estas herramientas innovadoras permite que el proceso educativo sea más interactivo y genere mejores estrategias de dinamización, facilitando así la aplicación práctica de los conceptos estudiados.

Dado este contexto, la importancia de esta investigación radica en identificar de manera clara y concisa los desafíos y oportunidades que la inteligencia artificial presenta para los docentes de la Escuela de Cadetes de Policía General Francisco de Paula Santander (ECSAN). La tecnología avanza a pasos agigantados, y los futuros oficiales de la Policía Nacional de Colombia se enfrentarán a problemáticas que requieren toma de decisiones efectivas, claras y contundentes. La utilización, implementación y ejecución de estrategias de IA ayudarán a resolver estas situaciones basándose en dinámicas confiables.

Además, el propósito de este manuscrito no solo se orienta hacia la visión futura del servicio policial que tendrán los oficiales, sino también al fortalecimiento de las estrategias de IA actualmente utilizadas en la Escuela de Cadetes de Policía. En países como Colombia, la implementación de la IA ha sido un verdadero reto; por lo tanto, seguir fortaleciendo lo que ya existe y proponer el uso de otras herramientas en el campo educativo es de vital importancia para mejorar el proceso de formación actual. Así, la investigación en IA aplicada a la educación policial es esencial para asegurar que los docentes puedan proporcionar una formación relevante, ética y efectiva, preparando mejor a los cadetes para los desafíos del futuro y contribuyendo a la modernización y eficacia del sistema de seguridad pública en su conjunto.

La sociedad actual está experimentando un proceso de amplia tecnificación, y diversos sectores se están adaptando a esta realidad en constante evolución. El ámbito educativo enfrenta la necesidad de reformar los sistemas educativos para preparar a los jóvenes para los futuros entornos académico-laborales, que se verán influenciados por la transformación digital vinculada a la cuarta revolución industrial o revolución tecnológica (Fredy y Calderón, 2020;

Martínez-Ruiz, 2019). La cuarta revolución industrial se caracteriza por la interconexión inteligente de diversas tecnologías digitales, como el Internet de las cosas y la inteligencia artificial (Chávez et al., 2020). En consecuencia, surge el concepto de educación 4.0, que promueve el autoaprendizaje mediante la reflexión en un entorno educativo respaldado por la tecnología y su utilización para abordar los contenidos educativos. Este enfoque tiene como objetivo principal mitigar las disparidades en el desarrollo social.

La inteligencia artificial (IA) se refiere a la capacidad de las máquinas y sistemas informáticos para llevar a cabo tareas que previamente requerían habilidades humanas, como la percepción, el razonamiento, el aprendizaje y la solución de problemas. Desde 2018, ha habido un aumento notorio en la conciencia y adopción de la IA en diversas industrias y sectores, abarcando áreas como la educación, la atención médica, la banca, la fabricación y el transporte. La IA se concibe como una disciplina científica que involucra la configuración de máquinas para que sean inteligentes y capaces de resolver problemas mediante la anticipación de acciones en su entorno, gracias a su capacidad de adaptación y al aprendizaje de patrones (Tuomi, 2018; Wang et al., 2015; Ma et al., 2014).

Actualmente, algunas instituciones educativas han empleado la inteligencia artificial, particularmente a través de chatbots o tutores virtuales, para interactuar con los estudiantes y mejorar su proceso de aprendizaje. Esto se logra al monitorear su avance, evaluar sus tareas y brindarles apoyo de forma inmediata (Wang et al., 2018; Yang, 2018; Kaklauskas, 2015). Asimismo, se está utilizando la IA para promover la accesibilidad y la inclusión en la educación, como, por ejemplo, mediante la creación de herramientas de traducción de lenguaje de señas y programas de aprendizaje personalizados para estudiantes con necesidades especiales.

En el ámbito educativo, se ha reconocido ampliamente el potencial de la inteligencia artificial para elevar la calidad de la enseñanza y el proceso de aprendizaje. Esto se ha traducido en un aumento notable en la inversión en este sector y en la implementación de soluciones innovadoras basadas en IA. Una de las aplicaciones más frecuentes de la inteligencia artificial en la educación es la tutoría personalizada, que se ha utilizado para mejorar el aprendizaje y la comprensión de los estudiantes en diversas áreas, como lectura, matemáticas y ciencias. Asimismo, la IA se emplea en la evaluación y retroalimentación de los estudiantes, lo que permite a los docentes identificar de manera ágil las áreas que presentan dificultades y brindar orientación y apoyo personalizado. Gisbert y Esteve (2011) plantean la necesidad de reformular los procesos de formación en la educación universitaria para promover la alfabetización digital en los estudiantes durante toda su trayectoria académica. Esto implica el desarrollo de habilidades, conocimientos y actitudes requeridas para emplear de manera efectiva las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC).

No obstante, Martín y Grudziecki (2015) argumentan que es esencial ir más allá de la "competencia digital" y tomar en cuenta dos niveles adicionales de alfabetización digital: el "uso digital" (nivel II) y la "transformación digital" (nivel III). El nivel II hace referencia a la correcta aplicación de las habilidades digitales para abordar tareas o desafíos, resultando en que una persona sea calificada como competente en alfabetización digital.

Sin embargo, León y Viña (2017) señalan que, aunque la inteligencia artificial (IA) tiene el potencial de cambiar la manera en que los docentes imparten clases y los estudiantes adquieren conocimientos, la meta principal debe ser alcanzar un aprendizaje significativo. Además, impartir enseñanzas éticas relacionadas con la IA representa otro desafío importante, con el fin de que los estudiantes consideren estos aspectos en sus propios proyectos (Eaton et al., 2018). Por lo tanto, es esencial que las instituciones educativas reflexionen sobre sus enfoques pedagógicos y diseñen entornos de aprendizaje flexibles que incorporen el uso de la IA de manera apropiada.

Los procesos de formación policial requieren igualmente la puesta al día y adaptación de estas tecnologías de vanguardia. En la Escuela de Cadetes de Policía General Santander (ECSAN), la introducción de la IA podría significar una oportunidad para elevar la formación de los cadetes y la eficiencia de los oficiales en el terreno. La ECSAN es una institución de educación superior cuyo propósito es preparar líderes completos para servir en la Policía Nacional de Colombia. La incorporación de la IA podría brindar nuevas herramientas y recursos para mejorar la calidad de la enseñanza y el rendimiento de los miembros de la fuerza policial. Sin embargo, también plantea retos y desafíos que deben ser enfrentados durante su implementación. Uno de los principales retos es el desarrollo de soluciones adaptadas a las necesidades específicas de la formación policial, ya que los procesos de enseñanza y aprendizaje en educación policial difieren significativamente de los procesos educativos convencionales. Además, la implementación de la IA en la escuela implicaría un cambio cultural en la institución y una actualización en las habilidades y competencias de los docentes y el personal administrativo.

Por lo anterior, se formuló la pregunta problematizadora: ¿Cuáles son los principales desafíos y oportunidades que enfrentan los docentes de la Escuela de Cadetes de Policía al implementar la inteligencia artificial en su enseñanza, y cómo pueden ser abordados de manera efectiva para mejorar la formación de los futuros oficiales de policía? Para dar respuesta a dicho interrogante, se propuso como objetivo general: Identificar los principales desafíos y oportunidades que presenta la inteligencia artificial para los docentes de la Escuela de Cadetes de Policía.

La revisión de la literatura enfatiza la relevancia de establecer acuerdos que permitan a los sistemas educativos de cada nación definir cómo utilizarán los datos generados por los actores involucrados en la implementación de la inteligencia artificial, incluyendo a docentes y estudiantes. Asimismo, se subraya la importancia de crear un Plan de Alfabetización en Inteligencia Artificial que capacite a los profesores en una gama de competencias que abarcan no solo las habilidades técnicas, sino también las consideraciones éticas y filosóficas relacionadas. Este enfoque reconoce que la IA modificará sustancialmente el papel del docente, anticipando que estos profesionales asumirán la mayoría de las responsabilidades en la enseñanza y la evaluación centrada en la adquisición de conocimientos. Este cambio permitirá que el cuerpo docente se concentre en los aspectos más relacionados con la dimensión social de la educación.

## **2. Metodología**

El estudio se desarrolló bajo un enfoque mixto, combinando el análisis estadístico con la perspectiva interpretativa de los docentes que imparten clases en la Escuela de Cadetes de Policía General Francisco de Paula Santander. Según Hamui (2013), la investigación con métodos mixtos va más allá de la mera combinación de métodos cuantitativos y cualitativos, ya que permite superar las limitaciones de ambos enfoques, ofreciendo un panorama más amplio que fortalece la interpretación y el análisis de los resultados. El diseño aplicado fue no experimental y de alcance descriptivo, basado en estudios previos que examinaron las tres categorías en estudio: 1) Inteligencia Artificial en la Educación, 2) Inteligencia Artificial y docencia, y 3) Impacto de la Inteligencia Artificial en la formación policial.

### ***2.1. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Información***

Se diseñó un cuestionario para docentes, constituido por 11 ítems de preguntas tipo escala Likert (Muy frecuentemente, Frecuentemente, Ocasionalmente, Raramente y Nunca), administrado a través de Google Forms. Este cuestionario estaba enfocado en caracterizar los conocimientos previos de los docentes en relación con la Inteligencia Artificial y sus posibles aplicaciones en el ámbito de la formación policial. Como lo afirma Hernández et al. (2010), el cuestionario “consiste en un conjunto de ítems presentados en forma de afirmaciones o juicios, ante los cuales se pide la reacción de los participantes”. Además, se realizó una entrevista semiestructurada a dos expertos, que ofrece mayor flexibilidad al comenzar con una pregunta que se puede adaptar a las respuestas de los entrevistados (Díaz et al., 2013). El objetivo fue analizar las potencialidades de las herramientas de Inteligencia Artificial en la educación superior para integrarlas adecuadamente en los procesos de enseñanza y aprendizaje. El perfil profesional de los entrevistados fue el siguiente: Entrevistado (E1): Doctor en Educación, Asesor pedagógico

y de Investigación Científica categoría Junior ante COLCIENCIAS, y docente actual en Educación Superior; Entrevistado (E2): Licenciado en Ingeniería de Sistemas con Maestría en Gestión de la Tecnología Educativa, docente en Educación Superior con especialización en el manejo de las TIC.

## **2.2. Población y Muestra**

La población de estudio comprendió a los 55 docentes que imparten clases en el pregrado de Administración Policial, tanto uniformados como no uniformados. Para determinar el tamaño muestral, se aplicó un muestreo probabilístico simple utilizando la fórmula:  $Tamaño\ de\ Muestra = Z^2 * (p) * (1-p) / c^2$ , donde  $Z =$  Nivel de confianza (95%),  $p = 0.5$ , y  $c =$  Margen de error (5%). De acuerdo con esto, el tamaño muestral fue de 49 docentes.

## **2.3. Fases de la Investigación**

En la primera fase, se realizó una revisión de fuentes primarias y secundarias utilizando palabras clave y descriptores relacionados con la inteligencia artificial, la educación, los docentes, la educación policial y las metodologías de personalización de contenidos con IA. En la segunda fase, se creó una matriz categorial para analizar las potencialidades de las herramientas de IA en la educación superior y su integración en los procesos de enseñanza y aprendizaje. En la tercera fase, se realizó un análisis descriptivo y una triangulación interpretativa de los datos estadísticos obtenidos de SPSS Statistics V.25 y los suministrados a partir de Atlas.Ti V.23, para caracterizar los conocimientos previos de los docentes sobre la IA y el uso que hacen de las herramientas de IA disponibles en la Escuela de Cadetes de Policía General Santander. Para abordar el desafío de la falta de comprensión y conocimiento en el tema de la IA, se sugiere ofrecer capacitación y programas de desarrollo profesional a los docentes para mejorar su comprensión de la IA y su habilidad para colaborar con profesionales de diferentes disciplinas. Es fundamental centrarse en la formación de los educadores a través de planes de capacitación adecuados.

## **2.4. Técnicas de Análisis y Procesamiento de la Información**

### *Análisis descriptivo y Triangulación Interpretativa*

En este contexto, Arias (2000) sostiene que la principal finalidad de la triangulación es mitigar el potencial sesgo individual de los investigadores y subsanar las limitaciones inherentes a un único investigador, teoría o método, lo que contribuye a fortalecer la validez de los resultados. Al eliminar estos sesgos, se asegura la integridad de la investigación, ya que se supera la influencia personal que podría afectar cualquier estudio. La triangulación posibilita la incorporación de diversas teorías, investigadores, fuentes de datos en diferentes momentos y lugares, así como la combinación de distintas metodologías. En este contexto, el cuestionario fue sometido a un análisis

utilizando el software SPSS, mientras que las entrevistas fueron abordadas mediante el uso de Atlas.Ti y su respectiva codificación.

### **3. Resultados**

A continuación, se presentan los resultados obtenidos a partir de la aplicación de las técnicas de recolección de información: cuestionario y entrevista semiestructurada. Con base en los objetivos planteados, se identificaron las siguientes categorías de análisis: 1) Potencialidades de la Inteligencia Artificial en la Educación Superior; 2) Conocimientos previos de los docentes en relación con la Inteligencia Artificial para la formación policial; 3) Uso que los docentes otorgan a las herramientas de Inteligencia Artificial disponibles en la Escuela de Cadetes de Policía General Santander; 4) Desafíos y oportunidades que representa la Inteligencia Artificial para los docentes de la ECSAN.

A partir de los dos instrumentos aplicados (cuestionario a docentes y entrevista semiestructurada a expertos), se lograron identificar los principales desafíos y oportunidades que presenta la Inteligencia Artificial para los docentes de la Escuela de Cadetes de Policía. La muestra incluyó un 54,3% de mujeres y un 45,7% de hombres, quienes imparten clases en el pregrado de Administración Policial. De estos, el 71,74% son docentes por contrato, el 23,91% son uniformados de la reserva, y el 4,35% son uniformados activos.

La distribución por grupos de edad muestra que las mayores proporciones se encuentran en los rangos de 30-40 años (35%), 41-50 años (43%) y 51-61 años (22%). En cuanto al tiempo de experiencia como docente en Educación Superior, los promedios más predominantes son: 12 años (13%), 10 años (10.9%), 3 años (10.9%), 20 años (6.5%) y 15 años (6.5%). El 65,2% de los docentes cuenta con estudios de Maestría, el 19,6% tiene Formación Doctoral, el 10,9% son Especialistas, y el 4,3% tienen solo el Pregrado. Este nivel de formación representa una oportunidad, en concordancia con lo afirmado por Tuomi (2020), quien señala que el perfil pedagógico y la profesionalización docente son factores determinantes para enfrentar la incorporación de la Inteligencia Artificial (IA) en la educación. La articulación de redes de conocimiento e innovación contribuye a pensar en nuevos diseños y métodos de enseñanza basados en la IA.

#### ***3.1. Potencialidades de la Inteligencia Artificial en la Educación Superior***

Según la UNESCO (2021), la Inteligencia Artificial (IA) desempeña un papel fundamental en la consecución del cuarto Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) establecido por la ONU en 2019. Este objetivo se centra en promover una educación inclusiva, equitativa y de alta calidad, que no solo prepara a

los individuos para satisfacer las demandas actuales de la sociedad, sino que también los equipa para enfrentar los desafíos futuros como miembros activos de una comunidad digital (Sanabria y Cepeda, 2016). Actualmente, existe un debate sobre cómo la IA puede transformar la sociedad; en el contexto educativo, existen tanto ventajas como desventajas. Uno de los beneficios es que los docentes pueden ofrecer instrucción individualizada a cada estudiante, lo que se traduce en mejores resultados de aprendizaje tanto para el docente como para el estudiante.

El avance de las tecnologías digitales está remodelando los sistemas educativos al permitir un acceso ampliado a información y recursos, personalizar el aprendizaje según las necesidades individuales, facilitar la colaboración global, introducir nuevas formas de evaluación y promover competencias digitales. También está transformando la formación docente, impulsando modalidades flexibles de aprendizaje en línea y mejorando la gestión administrativa. En este contexto, la educación se vuelve más adaptable, centrada en el estudiante y globalmente conectada.

Se consultó a los docentes si habían escuchado alguna vez el concepto de "Inteligencia Artificial". El 69,6% respondió "Muy frecuentemente", el 26,1% "Frecuentemente", el 2,2% "Ocasionalmente" y el 2,2% "Nunca". Más del 90% de los docentes identifican la existencia, implementación y uso de la IA en diferentes sectores y en el ámbito educativo. Señalan que es importante utilizar la Inteligencia Artificial en la educación, ya que esta podría analizar datos de rendimiento y preferencias de los estudiantes para establecer planes de clases y evaluaciones personalizadas que se ajusten a los puntos fuertes y débiles de cada uno. Además, la IA en la educación puede cambiar significativamente la práctica del aprendizaje del estudiante y ofrecer a los profesores herramientas para una educación más personalizada, como se evidencia en la nube de palabras de la Figura 1.

**Figura 1.** *La Inteligencia Artificial como herramienta de enseñanza-aprendizaje*



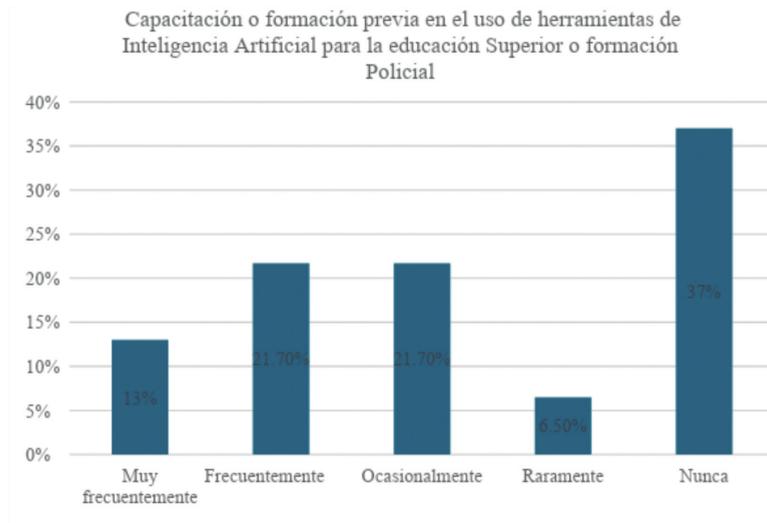
*Nota.* Las palabras resaltadas por la codificación de Atlas Ti, con predominancia en: Estudiante, Inteligencia Artificial, herramienta e información.

Algunas organizaciones han adoptado la Inteligencia Artificial a través de chatbots o asistentes virtuales para interactuar con los alumnos, monitorear su avance, evaluar sus trabajos y proporcionar asistencia de manera inmediata (Wang et al., 2018). La IA en la educación puede cambiar significativamente la práctica del aprendizaje del estudiante y ofrecer a los profesores herramientas para una educación más personalizada.

No obstante, aunque la mayoría de los docentes cuenta con formación posgradual, no tienen experiencia previa en el uso de herramientas de IA. El 37% manifiesta nunca haber recibido capacitación en esta área, y un 21,7% ha recibido capacitación corta de manera ocasional o frecuente (ver Figura 2). La falta de comprensión y conocimiento sobre la inteligencia artificial podría representar un desafío significativo para lograr una implementación exitosa de la IA en la ECSAN. Para abordar este desafío, es necesario ofrecer capacitación y programas de desarrollo profesional a los docentes para mejorar su comprensión de la inteligencia artificial y su habilidad para colaborar con profesionales de diferentes disciplinas. Es fundamental centrarse en la formación de los educadores a través de planes de capacitación adecuados.

La IA en la educación tiene un gran potencial para mejorar el aprendizaje y la interacción entre estudiantes y docentes, pero es necesario considerar los riesgos y desafíos asociados a su uso. En esta línea, tanto investigadores como expertos, así como instituciones y organizaciones (UNESCO, 2022; IRCAI, 2022), proponen la implementación de una ética de la inteligencia artificial que se enfoque en diversos aspectos y principios esenciales, incluyendo la responsabilidad, la privacidad, la equidad y la transparencia (Villas & Camacho, 2022).

**Figura 2.** *Capacitación o Formación en el uso de Inteligencia Artificial para la Educación*



*Nota.* Se presentan los resultados a partir del uso de la escala de Likert expresada en porcentajes.

Frente a la pregunta: **¿Conoce herramientas y tecnologías de Inteligencia Artificial utilizadas en la Educación Superior?** Los resultados fueron los siguientes:

- **Muy frecuentemente:** 26,1%
- **Frecuentemente:** 43,5%
- **Ocasionalmente:** 19,6%
- **Raramente:** 8,7%
- **Nunca:** 2,2%

Estos resultados son pertinentes con uno de los objetivos del proceso de enseñanza-aprendizaje, donde el docente, a partir de su profesionalización y actualización permanente, logra ajustarse a los nuevos desafíos que presentan las nuevas generaciones de estudiantes. Estos estudiantes han crecido con la tecnología como parte integral de su vida diaria, encontrando en la tecnología una herramienta que impacta positivamente el conocimiento y facilita un aprendizaje significativo.

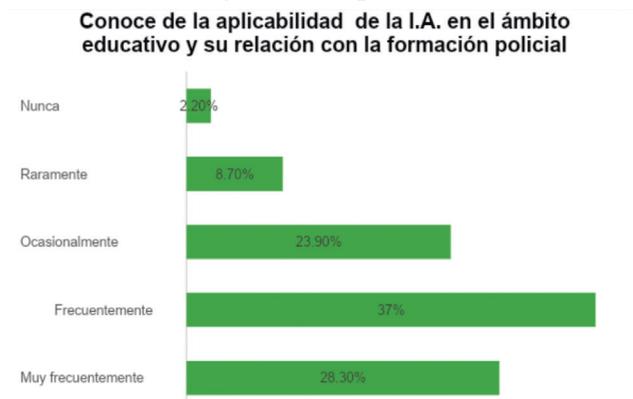
### 3.2. Conocimientos previos de los docentes en relación con la Inteligencia Artificial para la formación policial

Ciertas aplicaciones de Inteligencia Artificial (IA) pueden vincularse a la formación de oficiales de policía, incluyendo el uso de simuladores de entrenamiento para situaciones de combate al crimen, análisis de datos para perfiles criminales y predicción del crimen, reconocimiento facial y de voz para identificación y seguridad, sistemas de vigilancia de video automatizados, chatbots para capacitación y consultas, plataformas de aprendizaje adaptativo, análisis de sentimiento en redes sociales para detección de amenazas, evaluación del desempeño basada en IA y tecnologías de realidad virtual para entrenamiento en el uso de la fuerza. Todas estas herramientas contribuyen a mejorar la preparación de los oficiales para enfrentar desafíos en el campo policial.

Se indagó con los docentes si tenían conocimiento de la IA en el ámbito educativo y su relación con la formación policial. El 37% de los encuestados conoce frecuentemente su aplicabilidad, el 28,3% tiene clara su aplicabilidad a la educación policial, el 23,9% ocasionalmente sabría contextualizar dicho conocimiento en el ámbito educativo, y el 10,9% no conoce sus propiedades para la educación del policía (Figura 3).

Es crucial enfatizar que la tecnología debe considerarse como un instrumento que simplifica y mejora el acceso a la información, no solo en relación con los delitos ya perpetrados, sino, de manera primordial, en lo que respecta a los elementos que contribuyen a la prevención del crimen. Es fundamental destacar que la tecnología no constituye un propósito en sí misma, sino que se trata de herramientas diseñadas para alcanzar el objetivo deseado (Casas et al., 2018).

**Figura 3.** Aplicabilidad de la I.A. en el ámbito educativo y su relación con la formación policial



*Nota.* El 60,9 % de los docentes identifica la aplicabilidad de la IA a los procesos formativos policiales.

Aunque el 86,9% de los docentes manifiesta desafiar intelectualmente a sus estudiantes a emplear recursos tecnológicos desde la asignatura que imparten, a partir del uso de las TIC (material online, wikis, Prezi, Educaplay, entre otros), al realizar la pregunta: "¿Ha utilizado alguna vez herramientas de Inteligencia Artificial en tus clases o actividades formativas en la ECSAN?", solo el 23,9% afirma haberlas empleado en sus clases. No obstante, el 67,4% considera beneficioso implementar herramientas de Inteligencia Artificial, como ChatGPT, ChatSonic, Jasper Chat, Bing Chat, YouChat, Elicit, Socratic, etc. Un 23,9% considera que ocasionalmente podrían ser beneficiosas, y un 8,7% no las considera beneficiosas.

Antes de implementar cualquier herramienta de IA, es fundamental seguir los siguientes pasos:

1. Definir claramente los objetivos educativos que se pretenden lograr.
2. Evaluar las necesidades actuales del sistema educativo y los recursos disponibles.
3. Una vez seleccionadas las herramientas de IA, es importante diseñar contenido educativo compatible con estas tecnologías.
4. Los docentes deben recibir una formación adecuada para entender cómo utilizar las herramientas de IA en su práctica educativa, aprendiendo a integrar la tecnología en el aula, interpretar los datos generados por la IA y adaptar su enfoque pedagógico.
5. Asegurar la recopilación y el uso ético de los datos.
6. Realizar una evaluación periódica en función de los objetivos educativos.

La Inteligencia Artificial posibilita la integración de diversas tecnologías, como el análisis de grandes volúmenes de datos (Big Data), el Internet de las cosas, la robótica, la computación en la nube, la realidad aumentada, la fabricación inteligente y la simulación. Esto tiene como objetivo crear un sistema con capacidades que se asemejen notablemente a las habilidades humanas (Russell y Norvig, 2004).

### ***3.3. Desafíos y oportunidades que representa la Inteligencia Artificial para los docentes de la ECSAN***

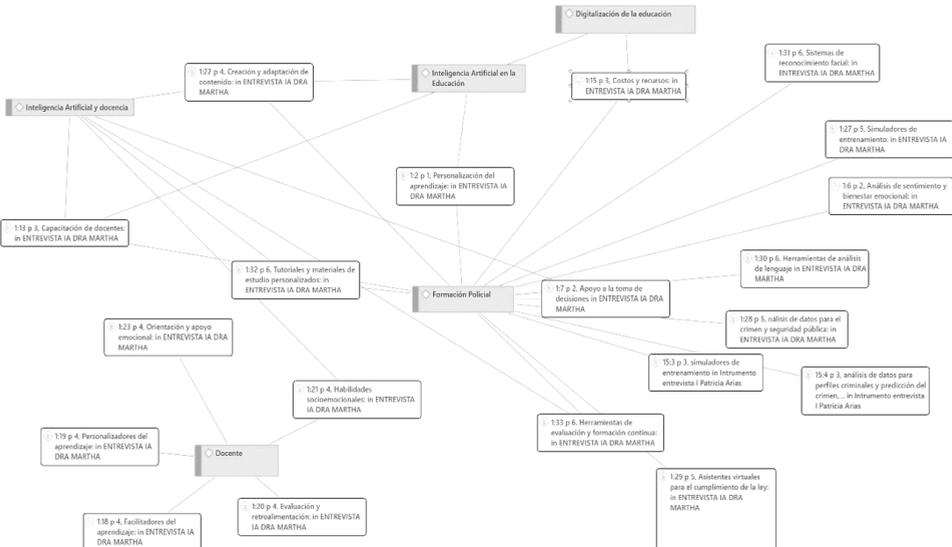
En la educación basada en algoritmos e Inteligencia Artificial, el profesorado desempeña un rol clave como facilitador del aprendizaje, adaptando el contenido, fomentando el pensamiento crítico, brindando retroalimentación personalizada y guiando en aspectos éticos. Sin embargo, esto no implica que el rol del docente se desvanezca, ya que la interacción humana, el estímulo intelectual y el apoyo emocional siguen siendo esenciales. La tecnología es un complemento para la labor docente, no un sustituto. Es importante destacar

que la Inteligencia Artificial no puede servir como una fuente de inspiración en el proceso de aprendizaje, ya que, a diferencia de un docente humano, carece de la capacidad de generar empatía, un elemento crucial en la enseñanza y el aprendizaje (Flores y García, 2023).

El avance de las tecnologías digitales ha ampliado las posibilidades y oportunidades en el sistema educativo, transformando la manera en que los estudiantes acceden al conocimiento, interactúan con la información, se comunican y aprenden. Sin embargo, también ha traído nuevos desafíos y requerimientos en términos de adaptación y preparación para aprovechar plenamente las ventajas que estas tecnologías ofrecen en el ámbito educativo.

El análisis en Atlas Ti demostró que las categorías “Inteligencia Artificial en la Educación”, “Inteligencia Artificial y Docencia”, “Formación Policial” y “Digitalización de la Educación” tienen un enraizamiento fuerte, formándose a partir de la red semántica observada en la Figura 4. Este enraizamiento proviene del cruce entre los códigos, la cantidad de documentos consultados en la revisión de literatura científica, los resultados del cuestionario aplicado y las entrevistas realizadas a los expertos.

Figura 4. Red semántica categorías de análisis



Nota. Se codificaron las categorías de estudio y se analizó el grado de enraizamiento entre ellas a partir de los discursos emitidos por los entrevistados y la revisión de la literatura científica, creándose la red semántica.

En la educación basada en algoritmos e Inteligencia Artificial, el profesorado desempeña un rol clave como facilitador del aprendizaje, adaptando el contenido, fomentando el pensamiento crítico, brindando retroalimentación personalizada y guiando en aspectos éticos. Sin embargo, esto no implica que el rol del docente se desvanezca, ya que la interacción humana, el estímulo intelectual y el apoyo emocional siguen siendo esenciales. La tecnología es un complemento para la labor docente, no un sustituto. Es importante destacar que la Inteligencia Artificial no puede servir como una fuente de inspiración en el proceso de aprendizaje, ya que, a diferencia de un docente humano, carece de la capacidad de generar empatía, un elemento crucial en la enseñanza y el aprendizaje (Flores y García, 2023).

El avance de las tecnologías digitales ha ampliado las posibilidades y oportunidades en el sistema educativo, transformando la manera en que los estudiantes acceden al conocimiento, interactúan con la información, se comunican y aprenden. Sin embargo, también ha traído nuevos desafíos y requerimientos en términos de adaptación y preparación para aprovechar plenamente las ventajas que estas tecnologías ofrecen en el ámbito educativo.

El análisis en Atlas Ti demostró que las categorías “Inteligencia Artificial en la Educación”, “Inteligencia Artificial y Docencia”, “Formación Policial” y “Digitalización de la Educación” tienen un enraizamiento fuerte, formándose a partir de la red semántica observada en la figura 4. Este enraizamiento proviene del cruce entre los códigos, la cantidad de documentos consultados en la revisión de literatura científica, los resultados del cuestionario aplicado y las entrevistas realizadas a los expertos.

La implementación exitosa de la Inteligencia Artificial en la educación requiere colaboración interdisciplinaria y comprensión técnica. Es fundamental destacar que la Inteligencia Artificial es una tecnología altamente compleja, y su aplicación en contextos educativos debe ser comprendida minuciosamente y diseñada de manera precisa para lograr los objetivos de aprendizaje establecidos. Fomentar la colaboración entre expertos en informática y pedagogía es esencial para que los docentes puedan desarrollar estrategias pedagógicas efectivas que aprovechen al máximo la Inteligencia Artificial. Asimismo, proporcionar a los docentes una formación técnica adecuada es fundamental para que puedan comprender en profundidad el lenguaje y los conceptos técnicos relacionados con la Inteligencia Artificial. Los programas de capacitación en tecnología y habilidades digitales deben abarcar una amplia gama de áreas, que incluyen la programación, la interpretación de datos y la seguridad cibernética. Según la investigación realizada por Barros y Ramos (2021), estos programas deben abarcar una amplia gama de áreas. Según la UNESCO (2019), la analítica del aprendizaje involucra diversas disciplinas, como la sociología, la psicología, la ética, la pedagogía y otros campos, y en

la actualidad puede aprovechar la revolución digital para recopilar una gran cantidad de datos que pueden ser analizados para obtener información valiosa o incluso para desarrollar herramientas inteligentes que resulten beneficiosas en contextos educativos o administrativos. Algunos profesores podrían enfrentar limitaciones en cuanto a la disponibilidad de oportunidades de formación, lo que subraya la importancia de ofrecer recursos y programas de capacitación para asegurar el desarrollo adecuado de las habilidades digitales necesarias para la incorporación exitosa de la Inteligencia Artificial en la educación (E2).

Existen diversas aplicaciones de IA que podrían vincularse a la Educación Superior para la formación del oficial de policía. Ejemplos de ello son:

- **Simuladores de entrenamiento:** Los simuladores basados en IA pueden recrear escenarios realistas en los que los oficiales de policía pueden practicar situaciones de alto riesgo, toma de decisiones y técnicas de resolución de conflictos. Estos simuladores ayudan a mejorar las habilidades prácticas y la toma de decisiones bajo presión.
- **Análisis de datos para el crimen y seguridad pública:** La IA puede ser utilizada para analizar grandes conjuntos de datos relacionados con el crimen y la seguridad pública. Los algoritmos de aprendizaje automático pueden identificar patrones, tendencias y áreas de alto riesgo, lo que permite una mejor asignación de recursos y una respuesta más efectiva a la delincuencia.
- **Asistentes virtuales para el cumplimiento de la ley:** Pueden proporcionar información instantánea y precisa sobre leyes, regulaciones y procedimientos policiales. Los oficiales pueden consultar a estos asistentes para obtener respuestas rápidas sobre aspectos legales y operativos (E1).

Incorporar la Inteligencia Artificial (IA) en el sistema educativo puede ser una forma efectiva de mejorar la calidad de la enseñanza-aprendizaje. A continuación, presento algunos procesos que se utilizan con mayor frecuencia:

- **Asistentes de aprendizaje:** Desarrollar asistentes virtuales impulsados por IA que puedan responder preguntas de los estudiantes, proporcionar explicaciones adicionales y ofrecer tutoriales personalizados.
- **Personalización del aprendizaje:** Analizar el progreso y las habilidades individuales de los estudiantes, lo que permite ofrecer planes de estudio personalizados y recomendaciones de contenido adaptadas a las necesidades de cada estudiante.

- **Tutoriales y retroalimentación inteligente:** Evaluar automáticamente las respuestas de los estudiantes y proporcionar comentarios detallados y específicos para ayudarles a mejorar su comprensión.
- **Recopilación y análisis de datos:** Analizar grandes cantidades de datos educativos, lo que puede ayudar a los educadores a identificar patrones y tendencias en el aprendizaje de los estudiantes y mejorar sus estrategias de enseñanza (E2).

La literatura científica también expone el uso de sistemas de reconocimiento facial para identificar y localizar a personas buscadas o sospechosas, lo que puede mejorar la seguridad pública y la prevención de delitos. Además, se mencionan tutoriales y materiales de estudio personalizados basados en recomendaciones de aprendizaje, así como herramientas de evaluación y formación continua para evaluar el desempeño de los oficiales en situaciones simuladas o reales, proporcionando retroalimentación y oportunidades de mejora continua en su formación. Aunque la IA puede ser una herramienta valiosa para la formación y el trabajo de los oficiales de policía, también plantea desafíos éticos y de privacidad. Es fundamental garantizar que se utilice de manera responsable y se salvaguarden los derechos y la privacidad de las personas involucradas, una situación que debe ser tratada a profundidad dentro de la institución policial. Además, es importante tener en cuenta que la integración de la Inteligencia Artificial en la administración educativa plantea ciertos aspectos desfavorables, generando desafíos y amenazas en relación con la protección de la privacidad, lo que representa obstáculos para el sector (Wang, 2021).

**Potenciamiento de E-Learning:** La Inteligencia Artificial también tiene el potencial de mejorar el aprendizaje en línea. Plataformas de autoaprendizaje como Khan Academy o cursos en línea masivos (MOOCs) como EdX y Coursera cuentan con una gran cantidad de usuarios y generan una gran cantidad de datos. Estas plataformas utilizan la Inteligencia Artificial para analizar los datos y descubrir patrones de comportamiento que ayudan a identificar qué lecciones son efectivas y cuáles requieren intervenciones específicas. De la misma manera, la Inteligencia Artificial puede contribuir a motivar a los estudiantes y aumentar las tasas de finalización de cursos, optimizando el proceso de enseñanza (Stanford University, 2016). Otra área de la Inteligencia Artificial aplicada en la educación es el Aprendizaje Automático (Machine Learning), un sistema que desarrolla modelos matemáticos basados en datos para hacer pronósticos y tomar decisiones sin requerir programación previa, imitando así el funcionamiento de la inteligencia humana (Zhang, 2020).

### **Las mayores dificultades a la hora de avanzar de manera más rápida y eficiente en la digitalización de la educación son:**

- **Acceso a la tecnología:** La falta de acceso a dispositivos electrónicos (computadoras, tabletas, smartphones) y a una conexión a internet estable es una de las principales barreras para la digitalización de la educación, especialmente en comunidades con recursos limitados.
- **Capacitación de docentes:** Muchos educadores pueden sentirse abrumados o inseguros frente a la integración de tecnologías digitales en su enseñanza.
- **Contenidos digitales adecuados:** Es crucial asegurar la calidad y relevancia de los contenidos digitales para que sean efectivos en el proceso de enseñanza-aprendizaje.
- **Seguridad y privacidad:** La seguridad y privacidad de los datos y la información de los estudiantes son preocupaciones importantes en el entorno digital.
- **Resistencia al cambio:** La resistencia a adoptar nuevas tecnologías puede ser un obstáculo significativo para la digitalización de la educación.
- **Costos y recursos:** La implementación y el mantenimiento de la infraestructura tecnológica, así como la adquisición de licencias de software y contenido educativo, pueden ser costosos.

La introducción de tecnologías de inteligencia artificial en la educación debe ser considerada un tema de gran complejidad y controversia (Selwyn, 2019), donde la ética y los valores morales deben ser respaldados de manera sólida a través de una regulación con alcance global. Estos desafíos podrían abordarse mediante inversiones en infraestructura, capacitación docente continua, políticas de privacidad claras, desarrollo de contenidos de calidad y enfoques pedagógicos flexibles que integren la tecnología de manera efectiva.

La creación de políticas públicas se vuelve fundamental en este ámbito. En este contexto, resulta esencial abordar y desarrollar marcos de políticas consensuadas que regulen y promuevan el uso ético de la inteligencia artificial en la educación. Esto implica la formulación e implementación de un Plan de Alfabetización en Inteligencia Artificial, teniendo en cuenta que el principal obstáculo para la adopción generalizada de tecnologías de IA radica en la falta de evidencia sólida sobre su eficacia y su impacto en el desempeño académico de los estudiantes. Por lo tanto, es necesario mejorar la gobernanza, la accesibilidad y la confiabilidad de la inteligencia artificial, así como fomentar el desarrollo profesional de los docentes.

#### 4. Discusión

El objetivo general de este estudio era identificar los principales desafíos y oportunidades que presenta la Inteligencia Artificial (IA) para los docentes de la Escuela de Cadetes de Policía General Francisco de Paula Santander (ECSAN). Los docentes de la ECSAN enfrentan una serie de desafíos y oportunidades al implementar la IA en su enseñanza, entre los cuales se destacan:

- **Falta de Conocimiento y Capacitación:** Aunque los docentes están familiarizados con el concepto de IA y utilizan asistentes virtuales en sus teléfonos móviles, carecen de experiencia y conocimientos profundos en IA, lo que limita su capacidad para utilizar eficazmente esta tecnología en el aula.
- **Integración Curricular:** Incorporar la IA de manera efectiva en el plan de estudios requiere ajustes significativos en los programas de formación existentes.
- **Acceso a Recursos y Tecnología:** La adquisición de la infraestructura tecnológica necesaria para implementar la IA puede resultar costosa, lo que limita su accesibilidad para algunas instituciones.

A pesar de que la noción de innovación tecnológica y la IA son conceptos relativamente desconocidos para los docentes y oficiales policiales, los participantes mostraron una alta receptividad hacia estos temas. Reconocen la necesidad de incorporar herramientas tecnológicas que faciliten su trabajo, pero también son conscientes de la falta de herramientas adecuadas y de conocimientos técnicos para implementar estas tecnologías a nivel institucional. Por lo tanto, subrayan la importancia crucial de la formación en este ámbito. Como destacan León y Viña (2017), la integración de la IA plantea desafíos a los que tanto las instituciones educativas como los docentes deben enfrentarse.

Para abordar de manera efectiva estos desafíos, es esencial disponer de:

- **Capacitación Docente:** Proporcionar a los docentes oportunidades de capacitación en IA es fundamental. Talleres, cursos en línea y colaboraciones con expertos pueden mejorar su comprensión y competencia en esta área. Es valioso comenzar por instaurar un cambio cultural en la comunidad educativa y fomentar la formación en tecnologías innovadoras, como realidad virtual, educación robótica, sistemas de tutoría avanzados, plataformas de aprendizaje en línea, analítica del aprendizaje y estrategias de marketing de atracción (Inbound Marketing).

- **Diseño Curricular:** Trabajar en conjunto con expertos en IA para rediseñar el plan de estudios y garantizar que la IA esté integrada de manera efectiva en los cursos relevantes.
- **Asociaciones Estratégicas:** Colaborar con empresas de tecnología y organismos gubernamentales para acceder a recursos y financiamiento que faciliten la implementación de la IA en la formación.
- **Monitoreo y Evaluación Continua:** Evaluar regularmente cómo la IA impacta en la formación policial, tanto en los procesos desarrollados en el aula como en el desempeño de los egresados durante su primer año de servicio.
- **Innovación Policial:** A diferencia de la innovación tecnológica, la renovación policial implica la capacidad de la fuerza policial para reinventarse no solo a través de la tecnología, sino también mediante el desarrollo de habilidades y capacidades de resiliencia interna (Rábade, 2018).
- **Ética y Responsabilidad:** Incorporar discusiones sobre ética y responsabilidad en el uso de la IA en la formación policial, enfocándose en la toma de decisiones éticas y transparentes. La institución debe generar parámetros o políticas internas para su uso.

Es fundamental destacar que la tecnología debe considerarse como un instrumento que simplifica y posibilita un acceso más efectivo a la información, no solo en relación con los delitos ya cometidos, sino también en la prevención del delito. La tecnología no es un objetivo en sí misma, sino una herramienta destinada a alcanzar objetivos específicos (Casas et al., 2018). En línea con Casas et al. (2018), la utilización de herramientas tecnológicas en tácticas policiales será beneficiosa si se incorporan los siguientes criterios:

a) **Capacitación de líderes y miembros de todos los niveles:** Es esencial proporcionar formación en habilidades, especialmente en análisis crítico e inteligencia criminal, a todos los agentes, no solo a aquellos que trabajan en unidades de inteligencia criminal.

b) **Transformación de la cultura organizativa:** La introducción de tecnología implica un cambio en la forma en que se realizan las tareas. Gestionar la teoría del cambio, es decir, definir los comportamientos esperados de una fuerza policial que utiliza innovación tecnológica en sus estrategias, se convierte en un factor crucial (Casas et al., 2018).

Los resultados indican un gran potencial de la IA en diversos aspectos del proceso de enseñanza-aprendizaje, lo que concuerda con la idea planteada por Bouzenada et al. (2018). El contenido de aprendizaje puede ser personalizado

de manera precisa y ajustarse a las necesidades individuales de cada estudiante. Un efecto potencial del aprendizaje apoyado por la IA podría ser la difuminación gradual de la línea que separa la educación convencional en el aula del aprendizaje en línea o autodirigido. Los tutores inteligentes pueden mejorar la búsqueda y el uso de contenidos en un vasto conjunto de recursos disponibles, permitiendo a los estudiantes tomar un mayor control sobre su proceso de aprendizaje.

La Inteligencia Artificial (IA) tiene un potencial significativo para transformar la educación y contribuir al logro de objetivos clave, como la promoción de una educación inclusiva y equitativa. La UNESCO y la ONU reconocen la importancia de la IA en la mejora de la calidad educativa y la preparación de los estudiantes para un mundo cada vez más digitalizado. Entre las principales ventajas de la IA en el ámbito educativo destacan:

- **Enseñanza Personalizada:** La IA permite una enseñanza más personalizada, adaptando los contenidos y métodos a las necesidades y habilidades individuales de cada estudiante, lo que beneficia tanto a docentes como a estudiantes.
- **Acceso Ampliado a la Información:** La IA está remodelando los sistemas educativos al facilitar un acceso más amplio a la información, lo que fomenta la colaboración global y mejora la gestión administrativa.
- **Análisis de Datos:** La posibilidad de utilizar Big Data y herramientas de IA para analizar datos de rendimiento y preferencias de los estudiantes puede llevar a planes de clase y evaluaciones más personalizadas y efectivas.

Los resultados obtenidos entre los docentes de la Escuela de Cadetes de Policía General Francisco de Paula Santander (ECSAN) muestran un alto grado de conciencia y familiaridad con el concepto de IA, sugiriendo una aceptación generalizada de la IA como una herramienta valiosa en la educación. No obstante, existen desafíos significativos que deben ser abordados:

- **Resistencia al Cambio:** Los sistemas educativos suelen resistirse a cambios significativos, y la adopción generalizada de sistemas de toma de decisiones basadas en IA puede enfrentar retrasos y limitaciones, especialmente en instituciones públicas.
- **Acceso a Tecnología:** Los dispositivos móviles inteligentes, computadoras y conectividad a Internet son esenciales en la vida moderna, pero su acceso desigual puede limitar la efectividad de la IA en la educación.

- **Ética y Regulación:** Es crucial desarrollar herramientas de IA con el propósito de mejorar las habilidades de los docentes sin comprometer los valores humanos, la diversidad ni generar nuevas formas de desigualdad. La regulación y ética en el ámbito de la IA deben ser establecidas de manera que respeten estos principios.

Para una implementación exitosa de la IA en la educación, se deben seguir varios pasos importantes:

1. **Definición de Objetivos Educativos:** Clarificar los objetivos educativos que se pretenden lograr con la implementación de la IA.
2. **Evaluación de Necesidades:** Analizar las necesidades del sistema educativo y los recursos disponibles para integrar la IA de manera efectiva.
3. **Formación de Docentes:** Proporcionar capacitación adecuada para que los docentes comprendan y utilicen eficientemente las herramientas de IA.
4. **Uso Ético de los Datos:** Garantizar la recopilación y el uso ético de los datos generados por la IA.
5. **Evaluación Periódica:** Realizar evaluaciones periódicas para asegurar que la IA esté contribuyendo de manera efectiva al logro de los objetivos educativos.

En resumen, la inteligencia artificial ofrece grandes oportunidades para mejorar la educación, pero su implementación debe ser cuidadosamente planificada y ejecutada para superar los desafíos existentes y asegurar que se utilice de manera ética y efectiva.

## 6. Referencias

- Arias V., M. M. (2000). La triangulación metodológica: sus principios, alcances y limitaciones. *Investigación y Educación en Enfermería*, 18(1), 13-26.
- Barrios-Molina, A., et al. (2020). Clasificación de lesiones cutáneas mediante aprendizaje profundo: un estudio de caso en Colombia. *Ciencia en Desarrollo*, 11(2), 105-116. doi: 10.19053/01217488.v11.n2.2020.105.116
- Barros & Ramos. (2021). La brecha digital en la educación superior en Ecuador. *Revista de Investigación Académica*, 45(2), 33-47.



- Boroujeni, MS y Nasrollahi, S. (2019). Los efectos de la inteligencia artificial en la enseñanza y el aprendizaje en la educación superior. *Revista Internacional de Tecnologías Emergentes en el Aprendizaje (iJET)*, 14(18), 122-136. doi: 10.3991/ijet.v14i18.10891
- Bouzenada, S. N. E., Zarour, N. E., & Boissier, O. (2018). An agent-based approach for personalised and adaptive learning. *International Journal of Technology Enhanced Learning*, 10(3), 184. <https://doi.org/10.1504/ijtel.2018.10010193>
- Casas, K., González, P., & Mesías, L. (2018). La transformación policial para el 2030 en América Latina. [https://www.thedialogue.org/wp-content/uploads/2018/11/Kcasas\\_TransformacionPolicial\\_FI-NAL.pdf](https://www.thedialogue.org/wp-content/uploads/2018/11/Kcasas_TransformacionPolicial_FI-NAL.pdf)
- Díaz L, Torruco U, Martínez M, Varela M. (2013). La entrevista, recurso flexible y dinámico. *Inv Ed Med.*;2(7):162-7.
- Eaton, E., Koenig, S., Schulz, C., Maurelli, F., Lee, J., Eckroth, J., Crowley, M., Freedman, R. G., Cardona, R. E., Machado, T., y Williams, T. (2018). Blue Sky Ideas in Artificial Intelligence Education from the EAAI 2017 New and Future AI Educator Program. *AI Matter*, 3(4), 23-31. <https://doi.org/10.1145/3175502.3175509>
- Flores-Vivar, J., & García-Peñalvo, F. (2023). Reflections on the ethics, potential, and challenges of artificial intelligence in the framework of quality education (SDG4). [Reflexiones sobre la ética, potencialidades y retos de la Inteligencia Artificial en el marco de la Educación de Calidad (ODS4)]. *Comunicar*, 74, 37-47. <https://doi.org/10.3916/C74-2023-03>
- Fredy, A., y Calderón, O. (2020). Los retos de la Educación 4.0. frente a los tiempos de confinamiento. *Revista Educación, Cultura y Cambio*, 1(1), 1-18. <https://bit.ly/3u9n3wv>
- García-Peñalvo, FJ, & Cruz-Benito, J. (2018). Inteligencia artificial en la educación superior: estado del arte y retos. *Revista Española de Pedagogía*, 76(271), 375-391.
- García-Peñalvo, FJ, & Cruz-Benito, J. (2019). Educación, tecnologías y desarrollo: el impacto de la inteligencia artificial en la educación superior. *Educación XXI*, 22(1), 67-89. doi: 10.5944/educXXI.21179
- Giró-Gracia, X., & Sancho-Gil, J. M. (2022). La Inteligencia Artificial en la educación: Big data, cajas negras y solucionismo tecnológico. *Revista Latinoamericana de Tecnología Educativa*, 21(1), 129-145. <https://doi.org/10.17398/1695-288X.21.1.129>
- Gisbert, M., y Esteve, F. (2011). Digital Leaners: la competencia digital de los estudiantes universitarios. *La cuestión universitaria*, 7, 48-59. <https://bit.ly/3reJ6Sy>

- Hamui, A. (2013). Un acercamiento a los métodos mixtos de investigación en educación médica. *Investigación en Educación Médica*, 2(8), 211-216.
- Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, P. (2010). *Metodología de la Investigación*. Quinta Edición. Editorial Mc Graw - Hill, Educación. México, D.F. <https://bit.ly/3zxyPmO>. *INNOVA Research Journal*, 2(8), 412-422. <https://doi.org/10.33890/innova.v2.n8.1.2017.399>
- IRCAI (Ed.) (2022). *IRCAI Global Top 100 Report 2021*. UNESCO. <https://bit.ly/3J1qb4k>
- Kaklauskas, T. (2015). Chatbots en educación: una revisión de investigaciones recientes. Conferencia de Educación en Ingeniería Global IEEE (EDUCON), 1055-1063. doi: 10.1109/EDUCON.2015.7096045
- Kulkarni, U. (2018). Inteligencia Artificial en la Educación. *Revista internacional de tendencias emergentes y tecnología en informática*, 7 (5), 64-67.
- León, G. C., y Viña, S. M. (2017). La inteligencia artificial en la educación superior. Oportunidades y Amenazas. *INNOVA Research Journal*, 2(8), 412-422. <https://doi.org/10.33890/innova.v2.n8.1.2017.399>
- León, G. C., y Viña, S. M. (2017). La inteligencia artificial en la educación superior. Oportunidades y Amenazas.
- Ma, X., Liang, Q. y Liu, D. (2014). Una revisión de la investigación sobre inteligencia artificial en la educación. *Revista de Desarrollo e Intercambio de Tecnología Educativa*, 7(2), 1-14. [https://www.researchgate.net/publication/272138554\\_A\\_Review\\_of\\_Research\\_on\\_Artificial\\_Intelligence\\_in\\_Education](https://www.researchgate.net/publication/272138554_A_Review_of_Research_on_Artificial_Intelligence_in_Education)
- Martín, A., y Grudzjecki, J. (2015). DigEuLit: Concepts and Tools for Digital Literacy Development. *Innovation in Teaching and Learning in Information and Computer Sciences*, 5(4), 249-267. <https://doi.org/10.11120/ital.2006.05040249>
- Russel, S., Norving, S. (2004) *Inteligencia Artificial: Un enfoque moderno*. Madrid: Pearson Prentice Hall.
- Sanabria, A. L., y Cepeda, O. (2016). La educación para la competencia digital en los centros escolares: la ciudadanía digital. *Revista Latinoamericana de Tecnología Educativa*, 15(2), 95-112. <https://doi.org/10.17398/1695-288X.15.2.95>
- Selwyn, N. (2019). *¿Debería los robots sustituir al profesorado? La IA y el futuro de la educación*. Ediciones Morata.
- Stanford University (2016). *One Hundred Year Study on Artificial Intelligence (AI100)*. <https://ai100.stanford.edu>.



- Tuomi, I. (2018). El impacto de la inteligencia artificial: pérdidas de empleo generalizadas. *Revista Electrónica SSRN*. doi: 10.2139/ssrn.3271084
- Tuomi, I. (2020). *Research for CULT Committee - The use of Artificial Intelligence (AI) in education*. Concomitant expertise for INI report Policy Department for Structural and Cohesion Policies.
- UNESCO (2021). *Inteligencia Artificial y educación. Guía para las personas a cargo de formular políticas*. UNESCO
- UNESCO (Ed.) (2022). *K-12 AI curricula: A mapping of government-endorsed AI curricula*. UNESCO. <https://bit.ly/3B6f6xi>
- Villas, M., & Camacho, J. (2022). *Manual de ética aplicada en Inteligencia Artificial*. Anaya. <https://bit.ly/3vx7kZF>
- Wang, F., Tan, J. y Huang, Y. (2015). Una encuesta sobre la aplicación de la inteligencia artificial en la educación. *Revista de Desarrollo e Intercambio de Tecnología Educativa*, 8(1), 1-14. [https://www.researchgate.net/publication/282300260\\_A\\_Survey\\_on\\_Application\\_of\\_Artificial\\_Intelligence\\_in\\_Education](https://www.researchgate.net/publication/282300260_A_Survey_on_Application_of_Artificial_Intelligence_in_Education)
- Wang, P., Tchounikine, P., y Quignard, M. (2018). Chao: a framework for the development of orchestration technologies for technology-enhanced learning activities using tablets in classrooms. *International Journal of Technology Enhance Learning*, 10 (1/2), 1-21. <https://doi.org/10.1504/IJTEL.2018.10008583>
- Wang, Y. (2021). Educational management system of colleges and universities based on embedded system and artificial intelligence. *Microprocessors and Microsystems*, 82. <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2021.103884>
- Zhang, X. D. (2020). Machine Learning. En X. D. Zhang (Ed.), *A Matrix Algebra Approach to Artificial Intelligence* (pp. 223-440). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-2770-8\\_6](https://doi.org/10.1007/978-981-15-2770-8_6)





# CAPÍTULO 4

## AUDITORÍA AMBIENTAL. UN RETO EMPRESARIAL

**Albanid Mosquera Castro**

Orcid: 0000-0002-1416-3260

albanid.mosquerac@unilibre.edu.co

/ Universidad Libre - Seccional Cali

**Wilson Eduardo Romero Palacios**

Orcid: 0000-0002-8107-3222

weromero@live.unicuces.edu.co

/ Corporación Universitaria Centro Superior -  
UNICUCES

**Francia Elena Amelines Chamorro**

famelines@admon.uniajc.edu.co

/ Institución Universitaria Antonio José  
Camacho - UNIAJC

**Maria del Pilar Jara Vargas**

Orcid: 0000-0002-9903-0060

decanaturafcea@unicuces.edu.co

/ Corporación Universitaria Centro Superior -  
UNICUCES

**Resumen.** La investigación llevada a cabo entre la Universidad Libre, la Institución Universitaria Antonio José Camacho (UNIAJC) y la Corporación Universitaria Centro Superior (UNICUCES) se centra en la auditoría ambiental como un instrumento estratégico para el control y evaluación en la toma de decisiones ambientales. El objetivo principal es indagar y describir cómo este mecanismo puede ser utilizado eficazmente en la gestión ambiental.

La metodología utilizada en el estudio es de tipo mixta, con un enfoque descriptivo y cualitativo. Se llevó a cabo una revisión exhaustiva de literatura y análisis de información relevante, incluyendo informes, libros y artículos de investigación. La investigación se enfocó en la gestión operativa de datos confiables, evaluando diferentes mecanismos de auditoría ambiental para facilitar la toma de decisiones en las empresas.

A través del análisis de los resultados obtenidos, se definieron los elementos clave de la auditoría ambiental. Con base en esta información, se propone un proceso de auditoría ambiental que funcione como una herramienta efectiva para el control y evaluación de decisiones en organizaciones contemporáneas, adaptadas a los desafíos del nuevo milenio.

**Palabras clave:** Auditoría, cambio, ambiental, normatividad, mejoramiento, acciones.

**Abstract.** The main objective of the present research between the IES Universidad Libre, Institución Universitaria Antonio José Camacho - UNIAJC, y la Corporación Universitaria Centro Superior – UNICUCES is to investigate and describe the environmental audit as a strategic instrument of control and evaluation for making environmental decisions, through a literature review and data analysis; The research had a mixed methodology based on descriptive developments with a qualitative approach. Subsequently, reports, books and research articles on the operational management of reliable data were consulted, analyzing each of the results of the inquiries and investigations carried out on audit mechanisms. environmental that allows effective decision making in companies; In this way, once the elements established in the environmental audit have been strategically defined, an environmental audit process is proposed that serves as an instrument for the control and evaluation of decision-making in the organizations of the new millennium.

**Keywords:** Audit, change, environmental, regulations, improvement, actions.



## 1. Introducción

La crisis ambiental actual, derivada de la relación insostenible entre el ser humano y el medio ambiente, afecta a todos los aspectos de la vida en la Tierra, desde las dimensiones sociales y legales hasta las económicas y espirituales. Este desafío global subraya la urgencia de enfrentar la auditoría ambiental como una tarea crítica para las organizaciones, tanto públicas como privadas (AccountAbility, 2008).

A pesar de la existencia de normativas que obligan a las empresas a proteger el medio ambiente, muchas de estas leyes no son cumplidas adecuadamente debido al desconocimiento o la percepción de que afectan la maximización de las utilidades (Espitia, 2021). En este contexto, la contabilidad, tradicionalmente centrada en aspectos financieros, está evolucionando hacia un enfoque más social y ambiental, buscando demostrar su impacto más allá de los números (Romero, 2023).

El propósito de la auditoría ambiental es proporcionar una herramienta técnica y legal para el control y la evaluación de la sostenibilidad en las organizaciones. Esta auditoría permite medir los impactos ambientales y los costos asociados, proporcionando una base sólida para una gestión empresarial que promueva la sostenibilidad (Congreso de Colombia, 2019). La contabilidad ambiental se convierte así en un medio para revelar y evaluar los efectos acumulados de las actividades empresariales sobre el entorno natural, fomentando un comportamiento más responsable y mitigando los impactos negativos (Leal, 2011; Espitia, 2021; Romero, 2023).

Además, la contabilidad ambiental facilita la reducción de los impactos ambientales mediante el uso de herramientas y técnicas específicas, integrando políticas ambientales en los sistemas financieros y administrativos de las organizaciones (Bischhoffshausen, 2016; Initiative, 2016-2018).

El objetivo de este estudio es responder a la pregunta: ¿Cómo puede la auditoría ambiental convertirse en un reto empresarial y una herramienta efectiva de control para la sostenibilidad? La crisis ambiental actual exige que los profesionales de las ciencias económicas, administrativas y contables propongan mecanismos que den un valor económico y financiero a la preservación de la naturaleza y los recursos ambientales. En este sentido, la auditoría ambiental emerge como una herramienta esencial para mejorar la toma de decisiones y gestionar de manera adecuada el impacto ambiental de las organizaciones (Kimura & Escobar, 2010).

## 2. Metodología

La propuesta de investigación mixta presenta una metodología descriptiva que integra enfoques cualitativos y cuantitativos. Su objetivo es describir cómo la auditoría ambiental se convierte en un reto empresarial para la sostenibilidad, funcionando como una herramienta de control y evaluación que, a corto y largo plazo, ayuda en la toma de decisiones ambientales. Los objetivos específicos a desarrollar son: identificar las características de la auditoría ambiental y su efecto en la gestión contable; determinar los mecanismos legales para la gestión de la auditoría ambiental; y, por último, proponer un proceso de auditoría ambiental basado en encuestas realizadas a futuros profesionales de diferentes IES de la ciudad de Cali. Esta estrategia busca responder al siguiente interrogante: ¿Cómo se convierte la auditoría ambiental empresarial en un reto de control y sostenibilidad?

La investigación descriptiva emplea un enfoque cualitativo, permitiendo la recolección de información de fuentes secundarias como textos, libros y artículos de investigación. Este enfoque facilita la comprensión de la auditoría ambiental como un reto de sostenibilidad, en términos de control y evaluación, y como un instrumento estratégico para los futuros profesionales de varias IES de Cali en la toma de decisiones. Así, la investigación se justifica como una herramienta operativa para obtener datos precisos que fortalezcan la perspectiva de los futuros profesionales (Sánchez, 2015; Espitia, 2021). Se realiza una lectura minuciosa de la bibliografía para obtener información sobre la auditoría ambiental y construir una base de datos para el análisis de contenido. Además, se utiliza un esquema de trabajo y una ficha bibliográfica para registrar la información y construir el documento final.

De acuerdo con lo anterior, en la Tabla 1 se describe la recolección de datos a partir de los objetivos propuestos, el procedimiento a seguir, el instrumento utilizado y el proceso de recolección. En cuanto a las características del campo contable ambiental, se puede afirmar que su principal característica ha sido integrarse en la operatividad de la identificación, el control, la medición, la evidencia, la revelación y la valoración de los hechos ambientales en las partidas contables. Esto permite asignar cuantificación a las actividades, revelando la relación del ser humano con el medio ambiente y la naturaleza, con el fin de evaluar y proponer acciones (Mattessich, 2002).

**Tabla 1.** *Recolección de datos operativos para la gestión de auditoría ambiental un Reto Empresarial*

<b>Objetivos específicos</b>	<b>Procedimiento</b>	<b>Instrumento</b>	<b>Recolección</b>
Identificar las características de la auditoría ambiental y su efecto en la gestión contable.	Se consultará en bases de datos, en informes y en artículos de Investigaciones realizadas sobre la auditoría ambiental.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bases de datos</li> <li>• Archivos varios</li> <li>• Fichas de información</li> <li>• Registros de información</li> </ul>	Cualitativa
Determinar los mecanismos legales para la gestión de la auditoría ambiental	Se realizará una revisión bibliográfica analizando los resultados de investigaciones realizadas sobre mecanismos de auditoría ambiental que permita la toma de decisiones	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ficha bibliográfica</li> <li>• Registros de información</li> <li>• Presentaciones</li> </ul>	Cualitativa
Proponer un proceso de auditoría ambiental desde la mirada de los futuros profiones de diferentes IES de la Ciudad de Cali	A partir del proceso de identificación y determinación de los elementos establecidos de auditoría ambiental, elaborar un proceso de auditoría que ayude a tomar decisiones correctas y favorables desde sus directrices	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Retomando los procesos anteriores de identificación y determinación, consolidar una propuesta de gestión ambiental, para el desarrollo empresarial.</li> </ul>	Cualitativa

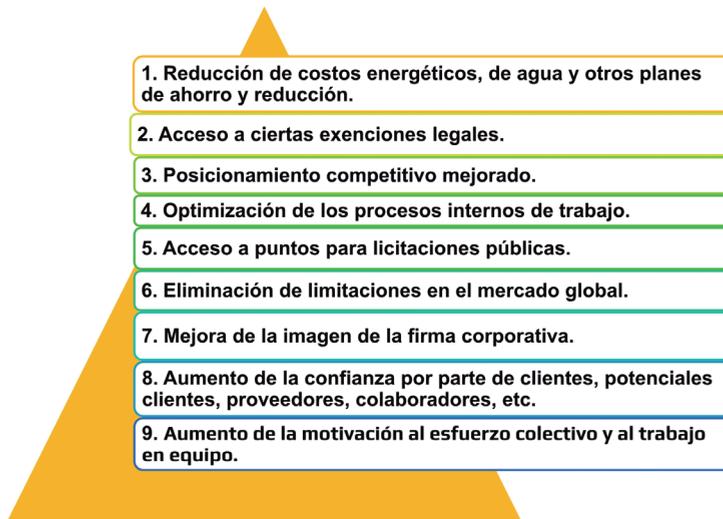
*Fuente: Adaptado del modelo Espitia, (2021).*

### 3. Resultados

En el proceso de gestión investigativa sobre la auditoría ambiental, como lo plantean Mantilla y Vargas (2015, p. 8) y Espitia (2021), se destaca que la contabilidad ambiental es similar a la contabilidad tradicional, con la salvedad de que debe considerar especialmente la naturaleza y el dinamismo de la economía actual. En este contexto, se resalta la importancia de los beneficios económicos en comparación con el aprovechamiento de los recursos naturales, los cuales aportan un gran valor a la sociedad y son esenciales para la vida y el bienestar humano (Molero García, 2016).

Desde una perspectiva empresarial, y tomando como referencia una muestra de 200 futuros profesionales de tres IES de la ciudad de Cali, se consolida la información evidenciando que la contabilidad ofrece diversas formas de medir los recursos naturales. Estos enfoques operativos se centran en aspectos económicos y proporcionan Responsabilidad Social Empresarial (RSE) hacia la gestión de la información necesaria para preparar estados financieros efectivos que reflejen las cuestiones ambientales y cumplan con las nuevas exigencias legales del mercado global, orientadas hacia prácticas ambientales empresariales. La implementación de un Sistema de Calidad Ambiental puede ofrecer hasta nueve beneficios totales y absolutos (Villegas, 2012).

**Figura 1.** *Sistema de Calidad Ambiental*



Adicionalmente, se definen las siguientes características de la contabilidad ambiental:

- **Interdisciplinariedad:** Obliga a los profesionales a salir de sus marcos teóricos y vincularse con otras disciplinas. Al medir los recursos, se puede lograr una disminución en el consumo de materia prima, así como en los costos de tratamiento de los diferentes residuos generados por las organizaciones. Además, la valoración de costos ocultos al convertirse en una empresa socialmente responsable puede llevar a un incremento en las ventas.
- **Disminución de sanciones:** Reducción de multas o tasas retributivas y compensatorias de tipo ambiental.
- **Beneficios tributarios:** Obtención de ventajas fiscales relacionadas con temas ambientales.

Por otra parte, la auditoría ambiental consiste en indagar metódicamente utilizando diversos recursos, como:

- **Pruebas**
- **Programas de auditoría**
- **Confirmaciones**
- **Procesos**
- **Procedimientos**
- **Análisis**

El objetivo es verificar si se están cumpliendo los requerimientos legales o de políticas internas, para evaluar si se está conforme con la buena práctica ambiental (BPA). La auditoría ambiental se convierte en el mejor instrumento y herramienta en el proceso de planificación y gestión ambiental dentro de las organizaciones, permitiendo compatibilizar su adaptación ambiental con el incremento de su nivel competitivo.

La auditoría ambiental, entre otros aspectos, sirve para:

- **Establecer el comportamiento:** Determinar cómo las organizaciones gestionan sus bienes y recursos.
- **Vigilar el cumplimiento:** Supervisar el cumplimiento de las políticas y legislaciones ambientales.
- **Delimitar deficiencias:** Identificar las deficiencias del sistema de control interno establecido por la organización.
- **Minimizar riesgos:** Reducir el nivel de riesgo o errores aplicando las características anteriormente mencionadas.

## 4. Discusión

Todas las actividades se realizan con el fin de alcanzar el objetivo de evaluar el comportamiento medioambiental de la actividad auditada, para determinar si se cumplen los lineamientos establecidos en el Reglamento del Sistema Comunitario de Gestión y Auditoría Medioambientales:

- La legislación medioambiental aplicable.
- La realización de los objetivos y metas establecidos.
- La eficacia y adecuación del sistema de gestión de la organización.

Para llevar a cabo las auditorías, se deben considerar ciertas actividades que se basan en la indagación y búsqueda de información en la organización, así como en la recolección de datos a través de visitas y entrevistas al personal. De esta forma, las actividades se pueden llevar a cabo de manera eficiente:

- Examinar y entender el sistema de control interno de la empresa, enfocándose principalmente en las políticas ambientales.
- Desarrollar una reunión inicial con los encargados de cumplir dicho sistema y políticas, para recibir orientación sobre cómo se están llevando a cabo los procedimientos a auditar.
- Realizar un plan de diagnóstico para identificar debilidades y fortalezas.
- Evaluar el funcionamiento del sistema de control interno en lo relacionado con lo ambiental.
- Evaluar el cumplimiento de la normativa ambiental.
- Evaluar los costos ambientales y los costos ocultos empresariales.

En el desarrollo del proceso investigativo, los estudiantes de IES sugieren implementar siempre una política de cuidado ambiental en las organizaciones. El 89% de ellos evidencian que la gestión de este proceso ayuda a mejorar los procesos organizacionales mediante directrices y lineamientos documentados de forma específica, adjudicando responsabilidades a cada uno de ellos. El 11% manifiesta que no consideran importante la gestión ambiental en las organizaciones y que este reto no es válido.

Las respuestas de la muestra de 200 estudiantes de varias IES muestran que el 64% opina que se debe realizar un documento de aceptación formal del compromiso sobre el cuidado ambiental organizacional, el cual debe ser socializado con todo el personal sin distinción alguna. Además, se



debe realizar periódicamente las capacitaciones necesarias para mejorar continuamente y mantener actualizados a todos los empleados sobre dichos cambios, generando así una conciencia real. El 36% sugiere implementar una política de monitoreo a los indicadores de cumplimiento ambiental, para mitigar el riesgo de robo, fraude o daño ambiental por parte de los empleados o personas que se beneficien económicamente de sus funciones laborales. Además, el 72% de los futuros estudiantes sugiere la creación de manuales de procedimiento y/o manuales de gestión de procesos, para garantizar la debida segregación de funciones y designar responsables en cada área, asegurando el correcto funcionamiento. El 28% opina que la creación de un comité ambiental permite un control adecuado de todos los planes y procedimientos basados en decisiones objetivas, con el fin de salvaguardar el funcionamiento ordinario de las actividades. Esto hace posible que la auditoría ambiental gestione el superar el reto empresarial real y evidenciable.

## 5. Conclusiones

Las auditorías ambientales ofrecen una gran confianza a las organizaciones sobre la eficacia de su sistema de gestión ambiental, el cumplimiento de las normas de referencia y de la legislación ambiental aplicable. Se constituyen, por lo tanto, en una herramienta de mejora basada en los criterios establecidos para detectar los puntos débiles del sistema y subsanarlos. Esta reflexión también pone en evidencia la necesidad de considerar el marco legal del control fiscal ambiental en Colombia y la importancia de definir la auditoría ambiental empresarial como un reto. Preguntas clave que surgen incluyen: ¿Quién realiza la valoración de los costos ambientales? ¿Quién lidera las auditorías ambientales? ¿Qué costos ocultos existen en las auditorías ambientales?

Para el 89% de los encuestados, es indispensable elaborar planes de desarrollo que incluyan las auditorías ambientales con el fin de gestionar cambios organizacionales. No se puede dejar al funcionamiento de los mercados únicamente en manos de las empresas; todos necesitamos de las fuerzas del mercado para estimular comportamientos responsables y avanzar entre el bien individual y el bien común. Así, se debe asegurar que las auditorías ambientales se implementen y se mantengan adecuadamente, de manera que los entes jurídicos y naturales definidos como sociedades responsables continúen existiendo. El 94% de los encuestados considera que, si no se actúa de manera responsable, estas entidades podrían desaparecer en el mediano plazo (Vives & Vara, 2011).

Para el 83% de los participantes, la auditoría ambiental es una herramienta sistemática esencial para la documentación, control y evaluación constante, habitual y periódica de la eficiencia en el uso de los recursos en las organizaciones. Esto es crucial para la toma de decisiones favorables para el

medio ambiente y para mitigar los efectos adversos que afectan la naturaleza, protegiendo el ecosistema y fortaleciendo el desarrollo sostenible en Colombia.

## 6. Referencias

- AccountAbility. (2008). *Norma de Principios de AccountAbility AA1000aps*. Madrid: MAS Business.
- Accountability. (2015). *AA1000 Stakeholder Engagement Standard*. Obtenido de <http://www.mas-business.com/docs/AA1000SESenespanol.pdf>
- Alcaldía de Santiago de Cali, Cali progresa contigo & DAGMA. (2011). *Huella de ciudades*. Obtenido de <https://huelladeciudades.com/AppHHCali/main.html#quees>
- Alier, J. M. (2015). Ecología política del extractivismo y justicia socio-ambiental. *Dossier*, 57-73.
- Colombia, G. d., & Ambiente, M. d. (s.f.). *Guía de aplicación de la valoración económica ambiental*. Colombia: Gobierno de Colombia; Ministerio de Ambiente.
- Congreso de Colombia. (2019). Obtenido de Congreso de la República de Colombia: [http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley\\_0099\\_1993.html](http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley_0099_1993.html)
- Contraloría General de la República. (s.f.). *Marco legal del control fiscal ambiental en Colombia y la valoración de costos ambientales*. Bogotá: Contraloría de Bogotá.
- Corte Constitucional. (2010). Obtenido de Corte Constitucional: <http://www.corteconstitucional.gov.co/relatoria/2010/c-595-10.htm>
- Corte Constitucional República de Colombia. (1992). *Sentencia T-411*. Bogotá: Corte Constitucional República de Colombia.
- Ecured. (s.f.). *EcuRed: Enciclopedia cubana*. Obtenido de [https://www.ecured.cu/Normas\\_ISO\\_14000](https://www.ecured.cu/Normas_ISO_14000)
- Flórez, E. (26 de Agosto de 2011). *Actualícese*. Obtenido de Dr. Edmundo Flórez
- Global Reporting Initiative. (2006). *Guía para la elaboración de memorias de sostenibilidad*. Obtenido de [http://www.mas-business.com/docs/G3\\_SP\\_RG\\_Final\\_with\\_cover.pdf](http://www.mas-business.com/docs/G3_SP_RG_Final_with_cover.pdf)
- Hoekstra, A. (s.f.). Instituto de Educación del Agua-UNESCO.
- Iniciative, G. R. (2016-2018). *GRI Empowering Sustainable Decisions*. Obtenido de <https://www.globalreporting.org/standards>
- Kimura, E. B., & Escobar, D. S. (Octubre de 2010). *Foro Virtual de Contabilidad Ambiental y Social*. Obtenido de [http://www.economicas.uba.ar/wp-content/uploads/2017/04/SUAREZKIMURA\\_ESCOBAR\\_Analisis\\_XBRL\\_GRI.pdf](http://www.economicas.uba.ar/wp-content/uploads/2017/04/SUAREZKIMURA_ESCOBAR_Analisis_XBRL_GRI.pdf)

- Mattessich, R. (2002). *Contabilidad y métodos analíticos: medición y proyección del ingreso y la riqueza en la microeconomía y en la macroeconomía*. Buenos Aires: La Ley.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (12 de Julio de 2019). Obtenido de Minambiente: <http://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article/465->
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (12 de Julio de 2019). *Minambiente*. Obtenido de <http://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article?id=157:plantilla-asuntos-ambientales-y-sectorial-y-urbana-10>
- Ministro de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (13 de Junio de 2018). *ANDI*. Obtenido de <http://www.andi.com.co/Uploads/Resoluci%C3%B3n%201084%20del%2013%20de%20junio%20de%202018.pdf>
- Molero García, G. J. (2016). La responsabilidad social empresarial en el contexto del capital social. *Omnia*, 46-59.
- Normas ISO. (s.f.). *ISO Tools*. Obtenido de <https://www.isotools.org/normas/>
- Oficina de nefocios verdes y sostenibles, Gobierno de Colombia, Ministerio de Ambiente. (2018). *Guía de Aplicación de la Valoración Económica Ambiental*. Bogotá, Colombia.
- ONGAWA. (s.f.). *Fundación Seres*. Obtenido de <https://www.fundacionseres.org/Lists/Informes/Attachments/1093/140115%20La%20Huella%20Social%20de%20las%20Empresas.pdf>
- Porto, J. P., & Merino, M. (2013). *Definición.DE*. Obtenido de <https://definicion.de/reporte/>
- Real Academia Española. (s.f.). *Diccionario Español Jurídico*. Obtenido de <https://dej.rae.es/lema/informe>
- Universidad Gran Colombia Armenia. (2018). *Condiciones de calidad para la renovación de registro calificado*. Armenia: UGCA.
- Villegas, M. G. (2012). Los informes de responsabilidad social empresarial: su evolución y tendencias en el contexto internacional y colombiano. *Cuadernos de Contabilidad*, 121-158.
- Vives, A., & Vara, E. P. (2011). *La responsabilidad social de la empresa en América Latina*. Fondo Multilateral de Inversiones (FOMIN) & Banco Interamericano de Desarrollo.
- Wackernagel, M., & Ree, W. (2001). *Nuestra huella ecológica: Reduciendo el impacto humano sobre la Tierra*. Santiago: IEP/Lom Ediciones.



**CAPÍTULO**  
**5**



**DISEÑO DEL  
SISTEMA  
MECÁNICO DE  
MOVIMIENTOS DE  
UN SIMULADOR DE  
HELICÓPTERO BELL  
212**

**AF. Estrada López Hernán David**  
lvmorenoc@emavi.edu.co

**AF. Moreno Calderón Lida Victoria**  
hdestradal@emavi.edu.co

/ Escuela Militar de Aviación  
“Marco Fidel Suárez”.  
Fuerza Aérea Colombiana

**Resumen.** El presente artículo aborda el diseño de un sistema mecánico de movimiento para un simulador del helicóptero Bell 212. La investigación surgió de la necesidad académica de implementar un simulador de ala rotatoria con el objetivo de reducir los costos de entrenamiento, aumentar los niveles de capacitación y práctica, y mejorar los resultados al pilotar aeronaves de ala rotatoria.

Para diseñar el sistema generador de movimientos del simulador, se realizó un estudio exhaustivo que incluyó la cinemática y el comportamiento dinámico de una plataforma capaz de cubrir un espacio de trabajo esférico. Las dimensiones del robot se calcularon utilizando técnicas de algoritmos genéticos, que facilitaron la cinemática inversa y la determinación del espacio de trabajo. Aunque los algoritmos matemáticos no se simularon en esta investigación, se consultaron revistas de alto impacto en robótica para obtener datos sobre iteraciones y convergencias relevantes para plataformas similares.

Esta plataforma está diseñada para aplicaciones pedagógicas en teleoperación, control, visión y automatización mediante robótica paralela. Se espera que este trabajo sirva como base para la creación de una plataforma experimental que abarque tanto el diseño del sistema mecánico de movimientos como las necesidades básicas de un simulador.

**Palabras Clave:** Simulador, helicóptero Bell 212, robótica.

**Abstract.** This article relates the design of a mechanical movement system of a Bell 212 helicopter simulator, this research started from the academic need for the implementation of a rotary wing simulator equipment, to reduce training costs and increase training and training levels, as well as simulator practice times to improve the results when piloting a rotary-wing aircraft. For the design of the simulator's movement generating system, a detailed investigation was carried out that contemplates the kinematics and dynamic development of a platform that covers a spherical workspace. The calculation of the dimensions of the robot was carried out by means of genetic algorithm techniques that illustrate the calculations of inverse kinematics and the work space, although the mathematical algorithms were not simulated in the scope of this research, they were consulted in high-impact journals in robotics in order to take the data of the most studied iterations and convergences for this type of platform. This platform is designed for pedagogical applications in the areas of remote operation, control, vision and automation using parallel robotics. This work is expected to be the starting point for the creation of the experimental platform that involves the designs of the mechanical movement system and the basic needs for a simulator.

**Keywords:** Simulator, Bell 212 helicopter, robotics.

## 1. Introducción

En el entrenamiento de vuelo básico del helicóptero Bell 212, se observa que muchos oficiales no logran completar el curso debido a la falta de pericia para enfrentar diversas situaciones en vuelo. Este déficit podría mitigarse con más horas de vuelo; sin embargo, estas horas son costosas y requieren de pilotos entrenadores, aeronaves disponibles, mecánicos, entre otros, lo que limita el aumento en el número de pilotos de ala rotatoria en la Fuerza Aérea Colombiana (FAC). El presente proyecto busca mejorar la capacitación y el desempeño de los alumnos mediante el desarrollo e implementación de un simulador de ala rotatoria. Este simulador permitirá reducir los costos de entrenamiento e incrementar tanto los niveles de capacitación y entrenamiento como los tiempos de práctica, mejorando así los resultados al pilotar una aeronave de ala rotatoria.

El macroproyecto "Diseño del simulador para el helicóptero Bell 212" se divide en dos subproyectos: el diseño de la cabina con sus elementos internos y el diseño del sistema generador de movimientos del simulador, incluyendo la selección de sus sistemas actuadores. Este proyecto se enfoca en el diseño del sistema generador de movimientos, con el objetivo principal de establecer las necesidades básicas para un simulador, determinar los requerimientos del sistema de movimiento, diseñar el sistema de movimientos y validar el comportamiento del diseño propuesto.

## 2. Metodología

La investigación se dividió en dos secciones metodológicas:

1. La primera sección consistió en una búsqueda bibliográfica de ecuaciones de diseño fundamentadas en la robótica, con el fin de establecer los puntos de partida para el cálculo de las dimensiones y proponer el diseño para el simulador Bell 212.
2. La segunda parte se centró en definir las dimensiones de la plataforma basadas en los datos matemáticos de robótica utilizados en plataformas similares. Además, se recomendó la selección de materiales adecuados para la construcción de la plataforma.

## 3. Resultados y discusión

### 3.1 Estudios cualitativos

Para los resultados se llevó a cabo la investigación de diferentes plataformas de movimientos, basándonos en antecedentes de otros proyectos de investigación, llevando a cabo la elaboración de diferentes tablas que presentan la declaración de la misión del sistema de movimientos de un simulador Bell 212, como se observa en la Tabla 1.

**Tabla 1.** *Declaración de la misión del sistema de movimientos de un simulador BELL 212*

Declaración de la misión: Sistema de movimientos de un simulador BELL 212.	
Descripción de producto	Sistema de movimientos de simulador que lleva diseño de plataforma giratoria, pistones de movimiento para los 6 ejes de movimiento o grados de libertad.
Objetivos claves del producto	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Emular de manera real la experiencia de pilotar una aeronave.</li> <li>• Utilizar diseños de medios hidráulicos reflejando de tal manera los movimientos en los 6 ejes o grados de libertad.</li> <li>• Entrenamiento y capacitación a futuro personal de vuelo.</li> <li>• Reducir costos en la capacitación del personal de vuelo.</li> </ul>
Objetivos Ambientales	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aportar al medio ambiente reduciendo compra y quema de combustible en las horas de instrucción ayudando por medio de la simulación.</li> </ul>
Suposiciones y restricciones	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desarrollo del diseño con 6 ejes de movimiento.</li> <li>• Falta de apoyo económico para la construcción de simulador.</li> <li>• Horas de trabajo limitadas.</li> </ul>
Personas Interesadas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fuerza Aérea Colombiana</li> <li>• Comando aéreo de combate número 4.</li> <li>• Escuela de pilotos.</li> <li>• Alumnos</li> </ul>
Involucrados	Estudiantes del Programa de Ingeniería Mecánica en EMAVI, Grupo de Investigación en Estudios Aeroespaciales.

En la Tabla 2, se evidencian las necesidades del sistema de movimientos de un simulado de helicóptero con el fin de evidenciar el grado de innovación

del simulador y los puntos estratégicos, aunque esta investigación lleva un enfoque cualitativo es necesario realizarla con el fin de establecer el nivel de importancia.

**Tabla 2.** *Definición de las necesidades del sistema de movimientos de un simulador de helicóptero*

<b>Ítem</b>	<b>Necesidad del diseño del sistema mecánico de movimientos de un simulador de helicóptero BELL 212</b>	<b>Nivel de importancia</b>
<b>1</b>	Selección de materiales óptimos para la fabricación y resistencia a los esfuerzos.	<b>8</b>
<b>2</b>	Sistema de actuadores ideales para el movimiento de la plataforma.	<b>9</b>
<b>3</b>	Selección de diseños preliminares tales que se puedan comparar para elegir el más favorable.	<b>8</b>
<b>4</b>	Software de diseño para realizar el 3D de la plataforma.	<b>7</b>
<b>5</b>	Simulador de helicóptero Bell 212 para la Fuerza Aérea Colombiana.	<b>8</b>
<b>6</b>	Costos de elaboración futura para el diseño mecánico del sistema de movimientos de un simulador de helicóptero Bell 212	<b>7</b>
<b>7</b>	Selección de la configuración de la plataforma móvil y plataforma fija.	<b>8</b>
<b>8</b>	Escoger un color determinado para la estructura de la plataforma.	<b>5</b>
<b>9</b>	<b>Determinar puntos críticos o fallas en la estructura</b>	<b>9</b>

### **3.2 Diseños preliminares del sistema de movimientos de un simulador de helicóptero**

El avance en telecomunicaciones y la tendencia hacia la globalización en diversos sectores, incluidos los educativos, están promoviendo el desarrollo de propuestas educativas que permiten a los estudiantes realizar prácticas o experimentos mediante el uso remoto de laboratorios especializados. Este enfoque no solo maximiza el aprovechamiento de los recursos físicos disponibles en las universidades, sino que también mejora la calidad de la enseñanza al ofrecer oportunidades de práctica experimental de alto nivel a estudiantes que no tienen acceso directo a dichos laboratorios.

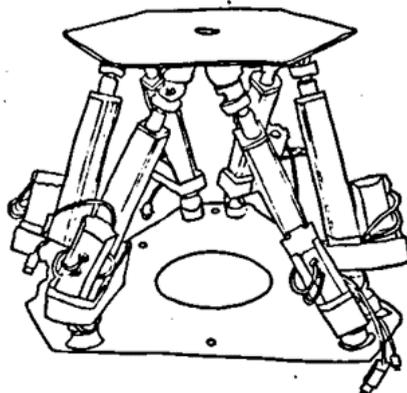
En el marco de la presente investigación, se ha propuesto un diseño preliminar para el sistema de movimientos del simulador de helicóptero Bell 212. Este diseño se compone de los siguientes elementos:

- **Cilindros Eléctricos:** Se utilizan seis cilindros eléctricos para proporcionar el movimiento necesario para el simulador. Estos cilindros permiten ajustar la plataforma de manera precisa y controlada.
- **Bisagras Universales:** Se emplean seis bisagras universales, tres superiores y tres inferiores, para facilitar el movimiento y la flexibilidad del sistema. Estas bisagras permiten que las plataformas se ajusten en diferentes ángulos y posiciones.
- **Plataformas:** El diseño incluye dos plataformas, una superior y una inferior. La plataforma inferior puede fijarse al suelo o a otra estructura, dependiendo de los requisitos del simulador. La plataforma superior se mueve en función del ajuste de los cilindros eléctricos.

El sistema está diseñado para simular una variedad de movimientos mediante el ajuste telescópico de los cilindros eléctricos. La plataforma puede replicar una serie de movimientos específicos según el orden y el espacio en el que se encuentra.

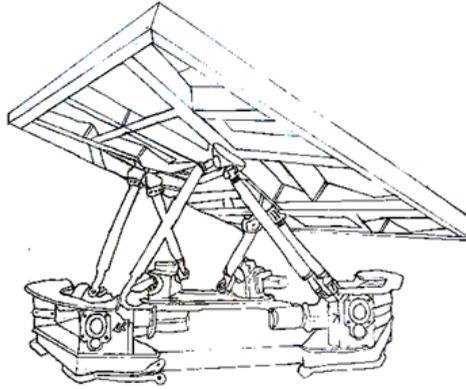
A continuación, se presentan los **Diseños Preliminares** en las **Figuras 1 y 2**, que ilustran la configuración del sistema de movimientos y los componentes principales del simulador.

**Figura 1.** *Diseño (1) preliminar sistema de movimientos de un simulador de helicóptero*



*Fuente: Elaboración propia*

**Figura 2.** *Diseño (2) preliminar sistema de movimientos de un simulador de helicóptero*



*Fuente: Elaboración propia*

La Figura 1 presenta un diseño de estructura a gran escala, que utiliza pistones para proporcionar los grados de libertad necesarios para una experiencia más inmersiva en el simulador. Esta estructura robusta permite una mayor precisión en los movimientos simulados, pero conlleva un mayor gasto debido a su tamaño y complejidad.

En la Figura 2, se muestra un diseño más grande en comparación con el diseño preliminar anterior. Este modelo utiliza seis pistones alimentados por servomotores, que proporcionan el impulso necesario para replicar los movimientos de una cabina de helicóptero. Este diseño también incrementa el gasto debido a los requerimientos adicionales de energía y a la fuente de alimentación necesaria para operar los servomotores.

Además, la Figura 2 ilustra la configuración seleccionada para el diseño en 3D, que corresponde a una plataforma tipo Stewart 6-6. Esta plataforma está equipada con actuadores giratorios y articulaciones esféricas, diseñada para ofrecer una mayor resistencia a los esfuerzos estructurales. La Tabla 3 proporciona detalles adicionales sobre los esfuerzos estructurales que la plataforma puede soportar, reflejando su capacidad para manejar cargas y proporcionar estabilidad en las simulaciones.

**Tabla 3.** *Fuerzas para el primer diseño preliminar del sistema de movimientos de un simulador de helicóptero*

<b>PAYLOAD 50-20000kg</b>					
<b>Actitud</b>	<b>Desplazamiento</b>	<b>Velocidad</b>	<b>Aceleración</b>	<b>Precisión</b>	<b>Repetibilidad</b>
Cabeceo( $\alpha$ )	$\pm 5^\circ$ -- $\pm 35^\circ$	$\leq 60^\circ$	$\leq 200^\circ/$	$0.03^\circ$	$0.01^\circ$

Actitud	Desplazamiento	Velocidad	Aceleración	Precisión	Repetibilidad
Alabeo( $\beta$ )	$\pm 5^\circ$ -- $\pm 35^\circ$	$\leq 60^\circ$	$\leq 200^\circ/$	$0.03^\circ$	$0.01^\circ$
Guiñada ( $\square$ )	$\pm 5^\circ$ -- $\pm 35^\circ$	$\leq 60^\circ$	$\leq 200^\circ/$	$0.03^\circ$	$0.01^\circ$
Elevación Vertical	$\pm 10\text{mm}$ -- $\pm 500\text{mm}$	$\leq 1000\text{mm/s}$	$\leq 1.0g$	$0.03\text{mm}$	$0.1\text{mm}$
Falla en turbina (Y)	$\pm 10\text{mm}$ -- $\pm 500\text{mm}$	$\leq 1000\text{mm/s}$	$\leq 1.0g$	$0.03\text{mm}$	$0.1\text{mm}$
Golpe con el rotor (x)	$\pm 10\text{mm}$ -- $\pm 500\text{mm}$	$\leq 1000\text{mm/s}$	$\leq 1.0g$	$0.03\text{mm}$	$0.1\text{mm}$
Eficiencia de respuesta del sistema	0Hz-20Hz				
Cantidad de deriva	El Sistema de Plataforma funciona continuamente durante más de 12 horas Ty la deriva de posición de cualquiera de los cilindros eléctricos no supera los 0.00025m.				

La Tabla 4 evidencia los criterios de evaluación para la selección del diseño de los sistemas de movimientos del simulador de helicóptero Bell-212 donde 1 corresponde a una baja importancia y 10 muy importante, siendo escogidos de la siguiente manera:

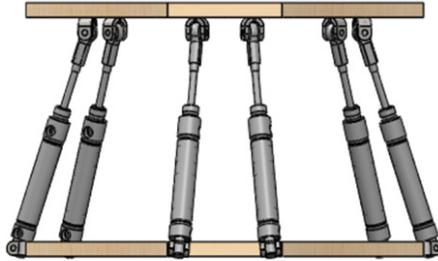
**Tabla 4.** Criterios de elección para el diseño del sistema de movimientos

CRITERIO DE ELECCIÓN	NIVEL DE IMPORTANCIA
Eficiente control del sistema de movimientos.	10
Sistema de movimiento con 3 puntos de anclaje	8
Economía para el desarrollo del sistema de movimientos, ya que lo que se busca es el bajo costo con un resultado favorable para la institución.	10
Conocimiento de la regla que regula el desarrollo espacial de simuladores (RAC 60)	9

Con base en los criterios evaluados anteriormente, es pertinente seleccionar una plataforma con actuadores lineales, considerando tres puntos de anclaje para un peso aproximado de la cabina del simulador T-41, que es de 500 kg. Además, se está consultando con el grupo técnico el precio de la maqueta.

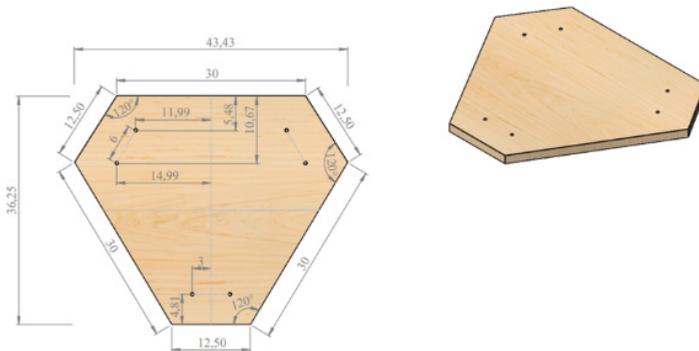
Los diseños contemplados en esta investigación se evidencian en las Figuras 3, 4 y 5.

**Figura 3.** *Diseño Mecánico Del Sistema De Movimientos Para Un Simulador De Helicóptero Bell 212*



En la Figura 3 se observa el diseño elaborado en el software SolidWorks, el cual fue seleccionado por sus características superiores. Estas características se fundamentan en diseños teóricos de otros simuladores, teniendo en cuenta la matemática compleja de un sistema robótico, así como las especificaciones de diseños que han demostrado un mejor rendimiento. Algunos de estos valores se evidencian en la Figura 4.

**Figura 4.** *Especificaciones del Diseño Mecánico del Sistema de Movimientos para un Simulador de Helicóptero Bell 212*



$$J4 = \left[-\frac{I}{2} + 2(t * \cos 60^\circ)\right]; \left(-\frac{2}{3} * h\right) - (I * \sin 60^\circ)$$

$$J5 = \left[-\frac{DI}{2} + \frac{I}{2} + (t * \cos 60^\circ)\right]; \left(-\frac{\sqrt{3}}{6} * DI\right) + (I * \sin 60^\circ) - (t * \sin 60^\circ)$$

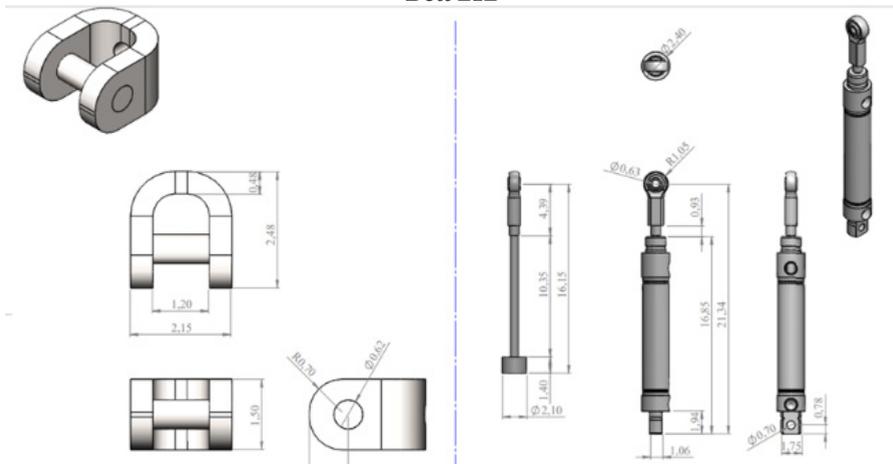
$$J6 = \left[-\frac{DI}{2} + I - (t * \cos 60^\circ)\right]; \left(-\frac{\sqrt{3}}{6} * DI\right) + (t * \sin 60^\circ)$$

Dónde:

- $t = \frac{I}{2} - \frac{m}{2}$ , la distancia t se genera del extremo de la cara corta del hexágono hasta el punto m. Para el diseño de esta plataforma  $t = \frac{5}{2} - \frac{3}{2} = 1$  cm
- $m = 3$  cm, distancia entre las juntas

Los valores que se evidencian en la Figura 4, tanto de dimensiones como de ángulos, fueron tomados de investigaciones previas, donde se logró, mediante la mecánica estadística, estipular las mejores medidas para que la plataforma pueda alcanzar el objetivo. Cada brazo y elemento de la plataforma se muestra a continuación en la Figura 5. Cada componente ha sido simulado y sus dimensiones han sido determinadas a través de procesos iterativos en robótica, en función de los movimientos y velocidades adecuadas para la interacción de todas las partes.

**Figura 5.** Especificaciones del Diseño de las partes mecánicas que conforman el Sistema de Movimientos para un Simulador de Helicóptero Bell 212



Las ecuaciones para las juntas de la plataforma móvil se realizan a partir de un sistema de coordenadas [ X;Y ] [X;Y], donde el origen se encuentra en la apotema del triángulo equilátero. Respecto a este sistema, los puntos coordenados serán positivos o negativos en función del cuadrante en el que se encuentren. Las ecuaciones de las juntas son:

$$J1 = \left[ \frac{DI}{2} - l + (t * \cos 60^\circ); \left( -\frac{\sqrt{3}}{6} * DI \right) + (t * \sin 60^\circ) \right]$$

$$J2 = \left[ \frac{DI}{2} - \frac{l}{2} - (t * \cos 60^\circ); \left( -\frac{\sqrt{3}}{6} * DI \right) + (l * \sin 60^\circ - t * \sin 60^\circ) \right]$$

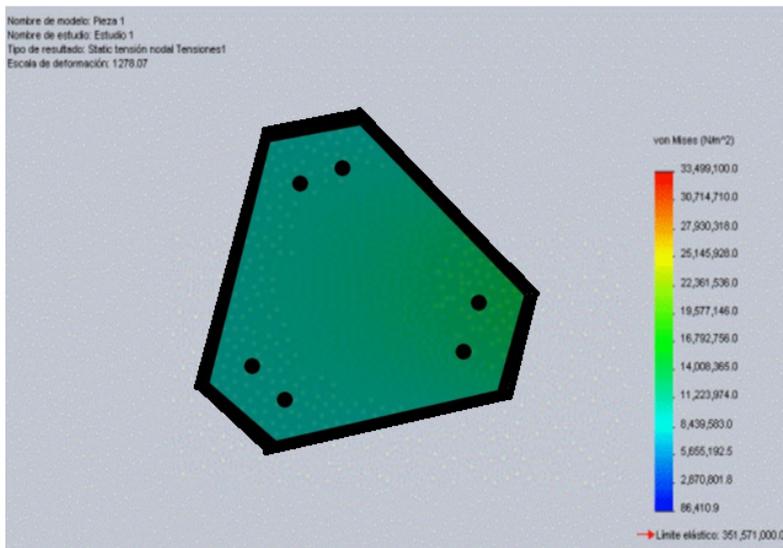
$$J3 = \left[ \frac{l}{2} - 2(t * \cos 60^\circ); \left( -\frac{2}{3} * h \right) - (l * \sin 60^\circ) \right]$$

La distancia entre las juntas en la cara menor del hexágono debe ser simétrica, y se dejó un espacio suficiente para realizar orificios sin que la estructura se fragmente. Las juntas en la plataforma móvil se enumeran desde J1 hasta J6.

Las especificaciones evidenciadas en la Figura 5 permitirán a futuras investigaciones la materialización de la plataforma. Aunque la matemática relacionada con la robótica no se desarrolló en el alcance de esta investigación, cada una de las piezas ha sido verificada en los programas computacionales utilizados en otras investigaciones para la idealización de plataformas similares.

El diseño escogido se sometió a un análisis de esfuerzos en el programa SolidWorks, evidenciándose que la presión máxima ejercida sobre los ejes soporta hasta  $1,4 \times 10^7,4 \times 10^7$  Pa. La plataforma sólida puede soportar el peso con el movimiento en los seis ejes de movimiento, como se muestra en la Figura 6.

**Figura 6.** Análisis de esfuerzos sobre la estructura



Fuente: Elaboración propia a partir del programa SolidWorks

A continuación, en la Tabla 5 se presentan los datos preliminares UH-1H.

**Tabla 5.** *Datos preliminares uh-1h*

Peso Bruto Con Carga Externa	Peso Del Motor
11200lb (5080 kg)	617 lb (280 kg)

#### 4. Impacto y ahorro institucional

El diseño de un sistema de movimientos para un simulador de helicóptero BELL 212 tiene un impacto significativo en la formación y desarrollo de futuros pilotos de ala rotatoria. Este sistema, al ser de diseño nacional, evitaría los altos costos asociados con la importación de simuladores, reduciendo así el gasto para su utilización.

Implementar un sistema de movimientos desarrollado localmente no solo reduciría los costos institucionales en la capacitación de pilotos de ala rotatoria, sino que también representaría un beneficio para la formación de nuestros pilotos y para otras escuelas de formación aeronáutica.

#### 5. Conclusiones

Este trabajo logró establecer las necesidades básicas para un simulador de helicóptero para la Fuerza Aérea Colombiana, basándose en la experiencia y documentos académicos previos. Se catalogó la importancia de la simulación del controlador, del software para ejecutar la simulación, y de las fórmulas físicas y matemáticas necesarias, así como de los materiales para la construcción.

Se determinaron las especificaciones y requerimientos del sistema de movimiento, tales como aceleración y velocidad, fundamentados en fórmulas matemáticas teóricas con 6 grados de libertad, estableciendo así las medidas del diseño expuesto.

Finalmente, se diseñó el sistema de movimientos para el simulador de helicóptero Bell 212, basándose en estudios previos de robótica y ecuaciones matemáticas avanzadas relacionadas con vectores de movimiento. Tras validar estos datos, se procedió a comprobar el comportamiento del diseño mediante simulaciones en SolidWorks. El análisis en SolidWorks evidenció que la presión máxima ejercida sobre los ejes es de  $1,4 \times 10^{71,4} \times 10^{71,4} \times 10^7$  Pa.

## 6. Recomendaciones

Para futuros proyectos de este tipo, recomendamos formar alianzas con programas de ciencias naturales y exactas, como matemáticas y física, con el objetivo de mejorar el alcance y la precisión en la estructura de las ecuaciones que conforman la matriz de ecuaciones diferenciales, conocida como Jacobiano. Esto permitirá consolidar las medidas del diseño de la plataforma con mayor claridad.

Desde nuestra formación como ingenieros mecánicos de la Fuerza Aérea Colombiana, sugerimos que el desarrollo futuro de estos proyectos se realice en colaboración con estudiantes de ingeniería informática. Esto facilitará el uso de lenguajes de programación más simples, lo que permitirá acceder a los resultados de las dimensiones requeridas con mayor facilidad y en menos tiempo.

## 7. Referencias

- Camocardi, M. (2012). *GURNEY*. Recuperado el 19 de 08 de 2022, de Control de flujo sobre la estela cercada de perfiles aerodinámicos: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/18178>
- Fernandez, S. M. (2006). *MONYTEX*. Recuperado el 08 de 19 de 2022, de LECCIONES DE FISICA.
- Figuera, R. (07 de 2010). *WIKIZER*. Recuperado el 13 de 08 de 2022, de Disimetría de la sustentacion: [https://www.wikizer.com/es/Disimetr%C3%ADa\\_de\\_la\\_sustentaci%C3%B3n#:~:text=La%20asimetr%C3%ADa\\_de\\_la\\_sustentaci%C3%B3n%20tambi%C3%A9n%20llamada%20sustentaci%C3%B3n%20asim%C3%A9trica,al%20rotor%20de%20cola%20%28no%20si%20es%20fenestr%C3%B3n%29](https://www.wikizer.com/es/Disimetr%C3%ADa_de_la_sustentaci%C3%B3n#:~:text=La%20asimetr%C3%ADa_de_la_sustentaci%C3%B3n%20tambi%C3%A9n%20llamada%20sustentaci%C3%B3n%20asim%C3%A9trica,al%20rotor%20de%20cola%20%28no%20si%20es%20fenestr%C3%B3n%29).
- Fuerza Aérea Colombiana. (03 de 08 de 2022). *Misión, Visión y Funciones*. (C. F. Colombiana, Editor) Recuperado el 09 de 08 de 2022, de Conózanos: <https://www.fac.mil.co/es/conozcanos/mision-vision-y-funciones#:~:text=Volar%2C%20entrenar%20y%20combatir%20para,a%20los%20fines%20del%20Estado>.
- Grupo One Air. (s.f.). *La fuerza de empuje y el Principio de Acción y Reacción*. Recuperado el 19 de 08 de 2022. [https://www.oneair.es/que-es-fuerza-de-empuje-thrust/#que\\_es\\_la\\_fuerza\\_de\\_empuje](https://www.oneair.es/que-es-fuerza-de-empuje-thrust/#que_es_la_fuerza_de_empuje)
- Guerra, A. (7 de Febrero de 2012). *HISPAVIACIÓN*. Obtenido de HISPAVIACIÓN: <https://www.hispaviacion.es/simulacion-de-vuelo-un-poco-de-historia/>
- Irausquin, A. (Febrero de 2014). *AEROCLUB*. Obtenido de AEROCLUB: <https://www.aviacioncivil.com.ve/simuladores-para-entrenamiento-de-vuelo-instrumental-en-venezuela/>

- Made In China. (2003). Recuperado el 31 de 08 de 2022, de EQUIPOS Y COMPONENTES INDUSTRIALES: [https://es.made-in-china.com/co\\_szfdra/product\\_Stewart-Motion-Simulation-Platform-Hexapod-Platform-Driving-Simulator-Earthquake-Simulator\\_uosrghyrg.html](https://es.made-in-china.com/co_szfdra/product_Stewart-Motion-Simulation-Platform-Hexapod-Platform-Driving-Simulator-Earthquake-Simulator_uosrghyrg.html)
- Mendez, K. (03 de 01 de 2012). *SISTEMAS DE CONTROL*. Recuperado el 13 de 08 de 2022, de Academia. [https://www.academia.edu/37437366/UNIDAD\\_2\\_SISTEMAS\\_DE\\_CONTROL](https://www.academia.edu/37437366/UNIDAD_2_SISTEMAS_DE_CONTROL)
- Pardo, L. (08 de 07 de 2022). *NEOTEO*. Obtenido de NEOTEO: <https://www.neoteo.com/link-trainer-el-primer-simulador-de-vuelo/>
- Portocarrero-Hermann, J. (2020). *Informe del desarrollo histórico de la investigación en Sistemas de Protección Térmica Ablativos*. Santiago de Cali, D.E., Colombia: Programa de Ingeniería Mecánica; Escuela Militar de Aviación “Marco Fidel Suárez”.
- Rico, L. C. (02/12/2018). Simuladores de vuelo: una revisión. *CIENCIA Y PODER AÉREO*.
- The Vaults. (8 de 09 de 2019). *THE VAULTS*. Recuperado el 13 de 08 de 2022, de MUSICA, OCIO Y CULTURA: <https://www.the-vaults.org/velocidad-helicoptero/#:~:text=La%20velocidad%20ideal%20a%20la%20que%20se%20debe,sobrepasa%20los%20l%C3%ADmites%20permitidos%20puede%20ocasionar%20un%20accidente.>
- Thermal Engineer. (17 de 09 de 2019). Recuperado el 19 de 08 de 2022, de FUERZA DE ARRASTRE: <https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-la-fuerza-de-arrastre-ecuacion-de-arrastre-definicion/>
- Wikipedia. (06 de 2009). *WIKIPEDIA*. Recuperado el 13 de 08 de 2022, de HELICOPTER FLIGHT CONTROLS: [https://en.wikipedia.org/wiki/Helicopter\\_flight\\_controls](https://en.wikipedia.org/wiki/Helicopter_flight_controls)

CAPÍTULO  
**6**



## **EXPERIENCIA FACSAT-2 "CHIRIBIQUETE": SELECCIÓN Y GESTIÓN DEL SERVICIO DE LANZAMIENTO EN CARGA COMPARTIDA PARA UN NANOSATÉLITE**

**MY. Juan Manuel Cárdenas García**

juanm.cardenas@fac.mil.co  
Orcid: 0000-0002-2917-0885

**TC. Sonia Ruth Rincón Urbina**

sonia.rincon@fac.mil.co  
Orcid: 0000-0003-2628-7516

**Karen Nicole Pirazan Villanueva**

karen.villanueva@epfac.edu.co  
Orcid: 0000-0002-6382-0773

**TE. Dib Ziyari Salek Chaves**

dib.salek@fac.mil.co  
Orcid: 0000-0002-1903-1910

**ST. Mayra Alejandra Molina Conde**

mayra.molina@fac.mil.co  
Orcid: 0000-0002-1056-2117

/ CITAE (Centro de Investigación y Desarrollo en  
Tecnologías Aeroespaciales).  
Fuerza Aérea Colombiana

**Resumen.** Este artículo detalla la experiencia en la selección y gestión de un servicio de lanzamiento espacial para la misión satelital FACSAT-2 “Chiribiquete,” utilizando la modalidad de carga compartida. Se destaca la metodología empleada, que incluyó un análisis de mercado y un proceso sistemático para seleccionar y gestionar el proveedor de lanzamiento. La colaboración entre la Fuerza Aérea Colombiana (FAC) y GomSpace en el desarrollo del satélite, seguida por la selección de Exolaunch como proveedor de servicios de lanzamiento, se enfatiza como un resultado clave. La integración exitosa del satélite en el cohete Falcon 9 a través de un liberador de órbita de satélites (POD) se resalta como un logro técnico significativo, que permitió un control preciso de los riesgos de lanzamiento. Además, se abordan aspectos legales, como seguros y pruebas, tanto antes como durante el lanzamiento. En última instancia, este enfoque no solo enriquece la doctrina y los procesos del sector espacial a nivel nacional, sino que también proporciona lecciones valiosas para la gestión de proyectos satelitales.

**Palabras clave:** CubeSat, misión FACSAT-2, Lanzamiento, Lanzador espacial, Órbita, Satélite.

**Abstract.** This article details the experience in selecting and managing a space launch service for the FACSAT-2 satellite mission “Chiribiquete,” using the shared payload modality. The methodology employed is highlighted, which included a market analysis and a systematic process for selecting and managing the launch provider. The collaboration between the Colombian Aerospace Force (FAC) and GomSpace in satellite development, followed by the selection of Exolaunch as the launch service provider, is emphasized as a key outcome. The successful integration of the satellite into the Falcon-9 rocket through a Satellite Orbital Deployer (POD) is highlighted as a significant technical achievement that allowed precise control of launch risks. Additionally, legal aspects such as insurance and testing are addressed before and during launch. Ultimately, this approach not only enriches the doctrine and processes of the national space sector but also provides valuable lessons for satellite project management.

**Keywords:** CubeSat, FACSAT-2 mission, Launch, Space Launcher, Orbit, Satellite.

## 1. Introducción

En los últimos 10 años, la industria espacial ha experimentado un rápido crecimiento en la investigación, desarrollo y lanzamiento de satélites pequeños, en particular los CubeSats (Pico, Nano y Micro), como se ilustra en la Figura 1. Estos activos espaciales no solo representan una reducción significativa en costos, sino también en los tiempos de manufactura, en comparación con los grandes satélites convencionales. Esta disminución en costos y tiempos no

solo conlleva ventajas económicas, sino que también reduce la probabilidad de fallos técnicos y aumenta la seguridad de las misiones espaciales.

Los CubeSats son pequeños satélites que han sido utilizados durante los últimos 15 años en órbita baja de la Tierra (LEO) para aplicaciones como la teledetección, las comunicaciones y la demostración de tecnología [1], con algunas excepciones en misiones en el espacio profundo (Deep Space). Están diseñados para cumplir con los requisitos específicos de su misión y ofrecen una forma asequible de demostrar nuevas tecnologías. Los CubeSats han ampliado el acceso a nuevos actores, sectores comerciales y gubernamentales, brindando la oportunidad de explorar el espacio con nuevas ideas e investigaciones que, de otra manera, no se llevarían a cabo. Participan en una amplia gama de aplicaciones de teledetección, incluidas las misiones de ciencias de la Tierra, y tienen el potencial de hacer contribuciones a la ciencia planetaria al proporcionar puntos de vista únicos o mediciones multipunto [2].

**Figura 1.** Estadísticas de lanzamiento de satélites en la última década (2013-2022)



*Nota.* Se excluyeron las constelaciones Starlink y OneWeb, donde se observa que nanosatélites (CubeSats de 1 a 6 unidades) constituyen la mayor cantidad de activos espaciales lanzados por año. Fuente: BryceTech

Debido a sus bajos costos de desarrollo y a la posibilidad de utilizar componentes existentes, los CubeSats han encontrado una aplicación natural como demostradores en órbita para nuevas aplicaciones tecnológicas. Además, han impulsado el desarrollo de subsistemas, sistemas de comunicación y cargas útiles miniaturizadas, que pueden evolucionar constantemente, ya que las misiones en órbitas LEO son de corta duración.

Algunos ejemplos de estas misiones incluyen experimentos de astrobiología, como el realizado en el nanosatélite O/OREOS, cuyo objetivo era demostrar

la capacidad de realizar investigaciones científicas de astrobiología de bajo costo utilizando nanosatélites autónomos en el espacio [3]. En el ámbito de los experimentos biológicos, BioSentinel se destaca como el primer CubeSat interplanetario que explorará la respuesta biológica a la radiación espacial más allá de la órbita terrestre baja en casi medio siglo [4].

De igual manera, Colombia, a través de la FAC, ha incursionado en el uso de CubeSats, desarrollando actualmente el programa espacial con el objetivo de fortalecer la capacidad de desarrollar misiones espaciales de forma autónoma en el país, al mismo tiempo que se exploran tecnologías de vanguardia con los CubeSats [5]. El lanzamiento del satélite FACSAT-2 “Chiribiquete” representa un hito significativo en la historia espacial de Colombia. Este evento no solo constituye un logro científico y tecnológico de gran relevancia, sino que también abre un amplio abanico de posibilidades en términos de comunicaciones, observación de la Tierra y estudios científicos.

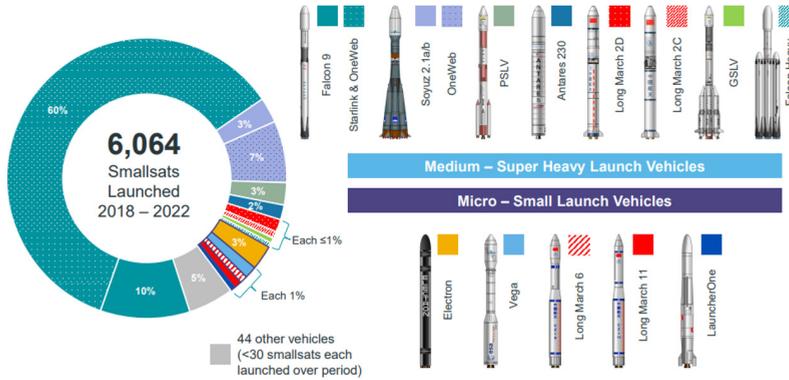
La misión principal del FACSAT-2 es la Observación de la Tierra (EO), a través de un CubeSat de seis unidades (10x20x30 cm) llamado “SAT-CHIRIBIQUETE,” que tiene como carga útil principal una cámara multiespectral con ocho bandas espectrales que cubren el rango visible e infrarrojo cercano (NIR). Esta cámara tiene una resolución de 4,75 metros por píxel a 500 km. Además, el satélite lleva una segunda carga útil orientada a objetivos científicos, integrada como parte de un acuerdo de cooperación con ECOPEPETROL. Esta carga útil consiste en un espectrómetro con herencia espacial, diseñado para recolectar información de la atmósfera para el análisis de gases de efecto invernadero (GEI) [6].

## 2. Metodología

Para el desarrollo de este proyecto, se planteó una metodología híbrida, que consta de dos fases principales. La primera fase se centra en la revisión de procesos similares disponibles, mientras que la segunda fase se orienta hacia el proceso sistemático de selección y gestión de la misión de lanzamiento.

**Primera Fase:** Se lleva a cabo un análisis de mercado con el propósito de obtener un profundo entendimiento de las dinámicas del mercado. Es fundamental contar con información completa acerca de los informes de lanzamientos, lo que permitirá identificar patrones relacionados con las dimensiones de los satélites, las tipologías de las misiones espaciales, la diversidad de lanzadores y las empresas que ofrecen estos servicios. Estar al tanto de estos detalles resulta esencial para tomar decisiones estratégicas e informadas durante el proceso de planificación y ejecución de las misiones espaciales. Para este análisis, es factible utilizar información proporcionada por compañías como BryceTech (Figura 3), que es referente a nivel internacional y brinda apoyo a programas gubernamentales y de consultoría.

**Figura 2.** Distribución de lanzadores comerciales de Smallsat 2018 – 2022



Fuente: BryceTech

**Segunda Fase:** Se estructura un proceso sistemático que abarca las gestiones administrativas, desde la verificación de la disponibilidad de los cohetes hasta la contratación de seguros de lanzamiento, organizados como se presenta en la Figura 3. Esta metodología se aborda en paralelo con el avance del ciclo de vida del activo espacial en desarrollo y comprende varias etapas.

**Figura 3.** Proceso iterativo para la selección y gestión del proveedor de servicios de lanzamiento



Fuente: CITAE

Se destaca la importancia de la selección del vehículo de lanzamiento, un aspecto que a menudo se pasa por alto en las misiones CubeSat. Se enfatiza la necesidad de adaptar el diseño de la misión a las oportunidades de lanzamiento disponibles.

### 3. Desarrollo

Una vez completada la fase de ensamblaje, integración y pruebas (AIT) del satélite FACSAT-2, donde el ensamblaje se define como “la unión de diferentes componentes y subsistemas, como tarjetas electrónicas, paneles solares, antenas, baterías y motores, para construir un satélite funcional” [7], se procede a movilizar el activo espacial al lugar de integración con el lanzador. Sin embargo, existen otras fases del ciclo de vida de la misión que son fundamentales para la puesta en órbita del satélite [8, 9].

- **Diseño y planificación:** En esta etapa se definen los requisitos del satélite y se realiza el diseño conceptual. Se determinan los componentes necesarios y se establecen las especificaciones técnicas.
- **Fabricación de componentes:** Los componentes individuales del satélite, como paneles solares, antenas, sensores y sistemas de comunicación, se fabrican por separado.
- **Ensamblaje mecánico:** Los componentes mecánicos se ensamblan para formar la estructura del satélite. Esto puede incluir la unión de paneles, la instalación de mecanismos de despliegue y la fijación de componentes internos.
- **Integración electrónica:** Los componentes electrónicos, como circuitos impresos, sensores y sistemas de control, se integran en la estructura del satélite. Esto implica la conexión de cables, la soldadura de componentes y la instalación de sistemas de refrigeración.
- **Programación y configuración:** Se carga el software necesario en el satélite y se configuran los sistemas de comunicación y control. Esto incluye la programación de sistemas embebidos y la configuración de parámetros de operación.
- **Pruebas y validación:** Se realizan pruebas exhaustivas para asegurar que el satélite funcione correctamente. Esto puede incluir pruebas de comunicación, pruebas de despliegue de paneles solares, pruebas de rendimiento en condiciones simuladas y pruebas medioambientales.

El desarrollo del ciclo de vida de la misión se basa en crear un activo funcional y operativo que pueda asegurar su integridad durante el lanzamiento, la puesta en órbita y la posterior operación en las condiciones ambientales del espacio, donde enfrentará condiciones de vacío, radiación, temperaturas extremas y microgravedad.

### 3.1. Análisis de mercado

La correcta selección de un lanzador espacial no solo depende de los requisitos técnicos de la misión, sino también del entendimiento de las dinámicas del mercado mediante la identificación de tendencias. La competencia en el mercado de los lanzamientos espaciales es una de las fuerzas de mercado que influyen en la selección. Además, otros factores, como la capacidad de carga del vehículo lanzador, su fiabilidad, coste total, tipo de sistema propulsivo, precisión en la inyección y disponibilidad, también son importantes a considerar. Las empresas se apresuran a desarrollar lanzadores para hacer frente al creciente mercado de satélites [10].

La identificación de tendencias se refiere a analizar y comprender la disponibilidad actual y futura en la industria espacial. Este análisis permite establecer las opciones más viables y rentables para el lanzamiento de un satélite, considerando factores como la disponibilidad de lanzadores, la frecuencia de lanzamientos, los precios, las órbitas más utilizadas y las tecnologías emergentes. Conocer las tendencias del mercado amplía las oportunidades de lanzamiento y optimiza la planificación de la misión [11].

Actualmente, los proveedores de servicios de lanzamiento (LSP) facilitan a los diseñadores de misión herramientas para estimar el costo de lanzamiento de misiones de carga compartida (rideshare). Esta información facilita la proyección de los costos generales de la misión y la posible arquitectura física del satélite.

- **Tipo de órbita:** Inclinación, altitud entre 400 y 1.500 km; tiempo local de ascenso (LTAN) o descenso (LTDN). Estos parámetros se establecen preliminarmente en la formulación inicial del análisis de misión; no obstante, están sujetos a cambios.
- **Ventana de lanzamiento:** Se establecen en cuartenos, permitiendo al LSP usar diferentes ventanas de lanzamiento.
- **Tamaño:** CubeSats estándar o pequeños satélites.
- **Configuración:** En el caso de CubeSats, se manejan estándares para 1U, 2U, 3U, 6U y 12U. También pueden encontrarse 16U y 24U con consideraciones especiales.
- **Desplegador:** Conocido como Picosatellite-Orbital Deployer (POD), es el dispositivo que alberga y libera el satélite una vez el lanzador haya alcanzado la órbita deseada [12]. Tradicionalmente, los LSP proveen un testpod que permite realizar las pruebas ambientales y de compatibilidad solicitadas por la autoridad de lanzamiento, además de facilitar el transporte del CubeSat desde las instalaciones de integración hasta el lugar de lanzamiento. Existen diferentes tamaños de este dispositivo que se ajustan según las necesidades del usuario.

Con esta información, es posible elegir las órbitas disponibles para realizar la primera estimación de costos, como se observa en la Tabla 1 [13, 14, 15]. Cabe resaltar que las misiones dependerán siempre de la carga principal, de modo que el satélite actuará como una carga secundaria, ajustándose a los cambios y disposiciones finales que esta demande.

**Tabla 1.** Comparación de precios según variación de tamaño del CubeSat y tipo de órbita

Empresa	Tipo	Órbita	Precio de lanzamiento (USD)
Rocket Lab	1u	LEO	70.000-80.000
	3u		200.000-250.000
Momentum	3u	Según inclinación	120.000-260.000
	6u		230.000-500.000
ISISpace	3u	LEO	210.000-270.000

*Fuente: Nanosats Database.*

La falta de opciones adecuadas de órbitas, evidenciada en el análisis de mercado, deja dos alternativas para el lanzamiento de CubeSats: 1) rediseñar la misión, o 2) esperar a que se lleve a cabo una misión con los parámetros de órbita óptimos deseados. La primera opción implica una actualización del análisis de misión, mientras que la segunda opción conlleva el riesgo de incumplir el cronograma y un incremento en los costos estimados para la misión.

En consecuencia, se establece que la selección de la órbita es un proceso iterativo, ya que afecta los siguientes análisis:

- **Cobertura:** Accesos por día, tiempo de comunicación por día, tiempo de revisita.
- **Resolución espacial y temporal.**
- **Ángulo Beta y eclipses.**
- **Visibilidad con estaciones terrenas.**
- **Tiempo de vida orbital.**

Esto concluye en la necesidad de actualizar los documentos de análisis de misión y los planes para la mitigación de basura espacial durante las fases tempranas del diseño de la misión.

### 3.2. Verificación de la disponibilidad del cohete

Aunque el análisis de mercado proporciona una aproximación a los lanzamientos disponibles, se realiza un acercamiento directo a los proveedores de servicios de lanzamiento (LSP) a nivel mundial mediante solicitudes de información (RFI, Request for Information) y solicitudes de propuesta (RFP, Request for Proposal).

**RFI (Request for Information):** Estos documentos tienen como objetivo obtener información de los proveedores sobre los lanzamientos disponibles y las capacidades que ofrecen. Permiten recopilar datos relevantes para evaluar la idoneidad de los proveedores y determinar si cumplen con los requisitos de misión, contractuales y legales necesarios para llevar a cabo un lanzamiento exitoso y rentable.

**RFP (Request for Proposal):** Se utilizan para solicitar propuestas formales de los proveedores interesados en participar en la misión de lanzamiento. Los RFP establecen los parámetros y criterios que deben cumplir las propuestas, incluyendo aspectos técnicos, comerciales, de gestión, transporte, integración al POD, lanzador, laboratorios y seguros, entre otros. Estos documentos permiten evaluar y comparar las propuestas de manera objetiva y tomar decisiones informadas sobre la selección del proveedor más adecuado.

Algunas consideraciones en los RFI pueden incluir el tipo de desarrollo de la misión, el tipo de carga útil, la ubicación geográfica y la experiencia comercial del proveedor. Estas consideraciones ayudan a evaluar la capacidad de los proveedores para satisfacer los requisitos de la misión y facilitan la toma de decisiones en el proceso de selección.

#### Selección de Lanzador

La selección del lanzador para una misión CubeSat requiere administrar una gran cantidad de información, conocer las variables involucradas, priorizar la órbita deseada y evaluar las oportunidades de lanzamiento disponibles. Existen diferentes tipos de órbitas, que se describen a continuación [16, 17]:

#### Por Altitud:

- **Órbita Baja Terrestre (LEO):** Se encuentra a una altitud de entre 160 y 2.000 kilómetros sobre la superficie terrestre. La mayoría de los satélites se lanzan a esta órbita debido a que requiere la mínima energía de lanzamiento y permite una buena visibilidad de la Tierra. La vida útil de las misiones es corta y los costos son reducidos.

- **Órbita Media Terrestre (MEO):** Se encuentra a una altitud de entre 2.000 y 35.786 kilómetros sobre la superficie terrestre. Los satélites de navegación GPS y los satélites de comunicaciones se encuentran en órbita media terrestre. Los subsistemas en estas órbitas requieren considerar condiciones especiales de radiación.
- **Órbita Geoestacionaria (GEO):** Se encuentra a una altitud aproximada de 35.790 kilómetros sobre la superficie terrestre. Los satélites en órbita geoestacionaria se mueven a la misma velocidad que la Tierra, lo que les permite mantenerse sobre el mismo punto en la superficie terrestre. Los satélites de comunicaciones y los satélites meteorológicos se encuentran en órbita geoestacionaria [18]. La vida útil de estas misiones es larga, pero los costos son elevados.

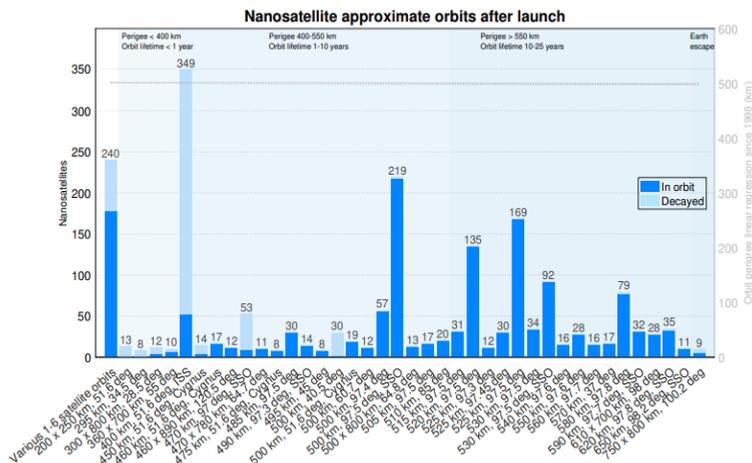
### Por Inclinación:

- **Órbitas Cercanas a 50°:** Si la misión requiere una órbita cercana a los 50°, se puede considerar el despliegue directo en una órbita cercana a la Estación Espacial Internacional (ISS).
- **Órbitas Ecuatoriales o de Baja Inclinación:** Para misiones que requieren órbitas ecuatoriales o de baja inclinación, las opciones pueden ser limitadas. Actualmente, no se operan micro lanzadores desde sitios de lanzamiento ecuatoriales con un gran número de lanzamientos exitosos. En consecuencia, sería necesario realizar maniobras de alto consumo energético para cambiar la inclinación orbital, lo que incrementaría los costos del servicio. Una órbita ecuatorial aumentaría el número de accesos diarios sobre Colombia, elevando la cantidad de información generada sobre el territorio.
- **Órbitas Polares o SSO:** Para misiones que tienen como objetivo una órbita polar o una órbita SSO, hay numerosas alternativas disponibles. Para altitudes más altas, se recomienda el lanzador PSLV debido a su frecuencia de lanzamiento y precio. Para órbitas SSO de menor altitud (menos de 600 km), se recomiendan los vehículos Soyuz y Falcon 9 debido a su frecuencia de lanzamiento y precios [19]. Este tipo de órbitas es óptimo para la Observación de la Tierra, permitiendo que el satélite pase diariamente en el mismo horario sobre el territorio (10:30 – 11:00 a.m. para el FACSAT-2). Dependiendo de la hora de lanzamiento, el horario del pase permitirá una inclinación solar que genere sombras sobre el territorio, mejorando las características de las imágenes.

A continuación, en la Figura 4 se presentan los tipos de órbitas más utilizados para el lanzamiento de nanosatélites, destacándose la LEO y la SSO [20].

Las órbitas heliosincrónicas (SSO) son las más ofrecidas y disponibles con diferentes proveedores de lanzamiento. Las órbitas inclinadas se ofrecen en menor cantidad que las SSO; sin embargo, para el período de lanzamiento de la misión FACSAT-2, hay una variedad de opciones con diferentes oportunidades de lanzamiento que deben ser evaluadas.

**Figura 4.** Órbitas más empleadas en el lanzamiento de los nanosatélites



Fuente: Nanosats

Inicialmente, se había previsto colocar el SAT-CHIRIBIQUETE en una órbita de NEO (Near-Earth Orbit) con una inclinación entre 16 y 45 grados. Sin embargo, tras enviar una Solicitud de Información (RFI) a dieciséis empresas, se descubrió que las ofertas para órbitas NEO eran escasas y que había una mayor disponibilidad para órbitas SSO (Sun-Synchronous Orbit). Además, se observó que los brokers de lanzamiento dominaban las ofertas comerciales. En respuesta a estos hallazgos, se procedió a enviar una Solicitud de Propuesta (RFP) a nueve empresas identificadas en la RFI para su posterior evaluación.

### 3.2.1. Selección de lanzador Matriz de evaluación

La Matriz de Evaluación (MDE) es una herramienta fundamental para cuantificar y evaluar las propuestas de los proveedores de servicios de lanzamiento (LSP). Esta matriz se estructura en función de los factores determinantes para la misión, lo que significa que los criterios específicos de la misión FACSAT-2 fueron utilizados para diseñar la MDE.

La MDE permite clasificar los parámetros de cada propuesta y asignarles una calificación cuantitativa, facilitando así la selección final del proveedor más adecuado. Aunque la fecha de recepción de la propuesta no se incluye directamente en la matriz, proporciona una indicación preliminar del interés, disponibilidad y nivel de atención de los LSP en relación con la prestación del servicio.

### 3.2.2. Cuantificación de criterios

En la Tabla 2 se presentan los criterios de evaluación, sus respectivos valores y los puntajes asignados, basados en los requisitos específicos de la misión FACSAT-2. La primera columna de la tabla muestra la jerarquía de los criterios de la propuesta, destacando que los aspectos más críticos son la órbita, la fecha de lanzamiento y el costo.

La segunda columna de la Tabla 2 detalla los criterios de segundo nivel, especificando los requisitos particulares de la misión de acuerdo con estos criterios principales. Para estos criterios de segundo nivel, el puntaje total se distribuye y asigna en función de su prioridad relativa con respecto a los criterios principales.

Los valores en la tercera columna de la tabla se utilizan para determinar el puntaje final de cada propuesta. El puntaje máximo posible es 100, indicando el cumplimiento completo de los requisitos de la propuesta. Estos criterios y puntajes proporcionan una guía objetiva para la evaluación y selección final de la mejor opción para la misión FACSAT-2.

**Tabla 2.** Criterios de evaluación selección LSP para FACSAT-2

Criterios	Criterios de segundo nivel	Valores	Puntaje
Órbita (Máx. 30)	Inclinación (Máx. 18)	0 -15°	0
		16° - 30°	18
		31° - 40°	13
		45°-SSO	10
	Altitud – Vida útil (Máx. 7)	400 - 500 km	3
		501 - 600 km	7
		> 600 km	3
	Oportunidades de lanzamiento en la misma órbita y período (Máx. 5)	>=3	5
		2	3
		1	1

<b>Criterios</b>	<b>Criterios de segundo nivel</b>	<b>Valores</b>	<b>Puntaje</b>	
Fecha de lanzamiento (Máx. 20)	Periodo de tiempo (Máx. 20)	Q2 2022	15	
		Q3 2022	20	
		> Q3 2022	10	
Costo (Máx. 20)	Costo en dólares (Máx. 20)	Precio más bajo	20	
		Segunda opción	18	
		Tercera opción	16	
		Cuarta opción	14	
		Quinta opción	12	
		Próximas opciones	10	
Lanzamiento (Máx. 10)	Confiabilidad (Máx. 5)	95% - 100%	5	
		90% - 94,9%	3	
		< 90%	1	
	Experiencia de lanzamiento- número de lanzamientos (Máx. 4)	> 15	4	
		jun-15	2	
		0 -5	1	
	Monitoreo de lanzamiento en tiempo real (Máx. 1)	SI	1	
		NO	0	
	Logística y soporte (Máx. 10)	Integración POD (Máx. 3)	Incluido	3
			Sin incluir	0
Transporte (Máx. 3)		Integración del POD	2	
		Servicios	3	
Laboratorios (Máx. 2)		Incluido	2	
		Sin incluir	0	
Asistente personal (integración y lanzamiento de POD) (Máx. 2)		Permitido	2	
		Prohibido	0	
		Permitido con costo adicional	1	

Crterios	Crterios de segundo nivel	Valores	Puntaje
Gestión (Máx. 10)	Flexibilidad en el re – manifiesto (Máx. 4)	< 3 meses	4
		6 meses	2
		> 6 meses	1
	Seguro del vehículo de lanzamiento (Máx. 2)	Incluido	2
		Sin incluir	0
	Seguro de transporte de carga útil (Máx. 2)	Incluido	2
		Sin incluir	0
Seguro de lanzamiento de carga útil (Máx. 2)	Incluido	2	
	sin incluir	0	

Para facilitar la toma de decisiones, se presenta de manera sencilla la información relevante, como se muestra en la Figura 5 para simplificar la información, que permite identificar las opciones en orden cronológico y orbital junto con la distribución geográfica de las plataformas de lanzamiento.

**Figura 5.** Ejemplo de esquemático de órbitas disponibles según los proveedores de servicio de lanzamiento misión FACSAT-2



Fuente: CITAE

Una vez evaluada la Matriz de Evaluación (MDE) y seleccionadas las mejores opciones, se presenta al comité final de evaluación un resumen de las mejores propuestas técnicas y comerciales, conforme a los criterios definidos en la matriz.

Posteriormente, una vez que el comité elige la mejor propuesta técnica y comercial, el equipo de selección comunica a las compañías su decisión respecto a la oferta. Según la tradición del sector espacial, el LSP esperaría una de las siguientes respuestas:

- **Llamado de “pregunta o aclaración”:** En este caso, la empresa esperaría que la FAC eleve preguntas o solicitudes de aclaración sobre uno o más elementos de la propuesta. Estas dudas serían dirigidas al director de lanzamiento o al gestor de la misión, y las respuestas deben enviarse en un plazo estimado.
- **Llamada al LSP “seleccionado”:** En esta situación, la empresa esperaría que la FAC se comunique con el fin de negociar el precio del servicio y encontrar la mejor relación valor-costos. Este proceso debe ser llevado a cabo por el Project Manager de la misión FAC para desarrollar una estrategia de negociación de precios.

De acuerdo con lo anterior, para la misión FACSAT-2, el equipo de selección presentó las siguientes opciones como resultado:

#### **OPCIÓN A (Mejor oferta órbita SSO-2022): EXOLAUNCH-SPACE X**

- **Órbita:** SSO 525-575 km
- **Fecha de Lanzamiento:** JUN/JUL 2022
- **Características:** Menor valor de los seguros por la confiabilidad del lanzador. Incluye transporte, integración al POD y seguros con un tercero para el satélite. Tiene acuerdo comercial con Firefly para órbita NEO de 28°.

#### • **OPCIÓN B (Mejor costo órbita NEO-2022): FIREFLY**

- **Órbita:** 28° 550 km
- **Fecha de Lanzamiento:** Q4 2022
- **Características:** Oferta incluye transporte, integración al POD y seguros con un tercero para el satélite. No cumplía con la ventana de lanzamiento requerida. Inició lanzamientos comerciales en julio de 2021, pero falló en su primer lanzamiento.

#### • **OPCIÓN C (Mejor técnicamente): VIRGIN**

- **Órbita:** 16° 550 km
- **Fecha de Lanzamiento:** Q3 2023

- **Características:** Incluye transporte, integración al POD y oferta de seguros para el satélite. Mejor órbita para FACSAT-2 para cubrir el territorio colombiano. Segundo lanzamiento comercial en julio de 2021. Alto costo.
- **OPCIÓN D (Menor costo órbitas SSO): ISILAUNCH**
  - **Órbita:** SSO 525-575 km
  - **Fecha de Lanzamiento:** Q4 2022
  - **Características:** No cumple con el periodo de lanzamiento. Se prevé menor valor de los seguros por la confiabilidad del lanzador. Incluye transporte, integración al POD y oferta de seguros para el satélite. Mejor oferta comercial con posibilidad de 5 diferentes lanzadores.

### **Selección Final:**

Finalmente, el comité de evaluación optó por la **OPCIÓN A**. Esta decisión se basa en la alianza comercial entre el LSP **EXOLAUNCH** y la autoridad de lanzamiento **SPACE X**, que ofreció la mejor combinación de confiabilidad, costos y cumplimiento de los requisitos de misión para la órbita SSO.

### **3.3. Gestión programa de lanzamiento**

Las actividades generales necesarias para alcanzar la órbita del satélite y garantizar la seguridad de la nave se describen en la Figura 6. El calendario presentado estima seis meses para el lanzamiento, dado que este es el plazo máximo para el envío de la notificación del manifiesto de lanzamiento.

Un **manifiesto de lanzamiento** es un documento clave que evidencia el compromiso e interés para lanzar un satélite en una ventana de lanzamiento específica. Este documento define los parámetros orbitales y la gestión necesaria para cumplir con los requisitos de la entidad desarrolladora. El manifiesto se envía al proveedor del servicio de lanzamiento como una solicitud formal para asegurar la disponibilidad de la oferta y confirmar la participación en la misión.

Es crucial enviar el manifiesto de lanzamiento con suficiente antelación, generalmente entre 6 y 12 meses antes del lanzamiento, para facilitar la planificación y coordinación de la misión. Esto permite al proveedor del servicio de lanzamiento planificar adecuadamente el lanzamiento, coordinar con los diferentes equipos involucrados y garantizar la disponibilidad de recursos necesarios para cumplir con los requisitos del satélite.

**Figura 6. Cronograma de actividades previas al lanzamiento**

ACTIVIDAD	L-6	L-5	L-4	L-3	L-2	L-1	L	L+1
- Firma del convenio								
- Inicio de cronograma								
- Notificación de selección de lanzador								
- Soporte desarrollo documentación								
- Desarrollo documento ICD								
- Documentación SDP								
- Planeación de procesos de integración								
- Plan preliminar de campaña de lanzamiento								
- Reportes y pruebas medioambientales								
- Licenciamiento								
- Adquisición de seguros								
- Envío al lugar de integración al POD								
- Integración al POD								
- Envío al lugar de lanzamiento								
- Integración al vehículo de lanzamiento								
- Certificados de alistamiento del satélite y del vehículo de lanzamiento								
- Lanzamiento								
- Reporte de inyección a la órbita								

Fuente: CITAE.

Las actividades de firma de acuerdos y desarrollo de documentación pueden adelantarse para optimizar el tiempo del director de la misión con el proveedor del servicio de lanzamiento. Es importante señalar que los tiempos para la concesión de licencias, como el registro en la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) y la licencia de operación del satélite emitida por el Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (MINTIC), así como la adquisición de seguros, deben comenzar una vez que se haya seleccionado la frecuencia de comunicaciones y se conozca el valor estimado del satélite. Sin estos certificados y/o licencias, el satélite no podrá ser enviado al sitio de integración, lo que retrasará el calendario de la misión y, en consecuencia, el lanzamiento.

### 3.3.1. Campaña de integración al POD y al lanzador

En la planificación y ejecución de una misión espacial, uno de los hitos cruciales tras la firma del manifiesto de lanzamiento es la creación del *Safety Data Package* (SDP). Esta fase es esencial para garantizar la compatibilidad del satélite con el POD y el lanzador que lo llevará al espacio, así como para disminuir los riesgos técnicos que el satélite podría representar para otras cargas útiles. En este proceso, se realiza una minuciosa evaluación de

seguridad que abarca desde la estructura del satélite hasta los detalles técnicos de la plataforma de lanzamiento, asegurando que cada componente y sistema cumpla con los estándares requeridos para la puesta en órbita.

El *Safety Data Package* constituye un eslabón fundamental en la cadena de preparación y verificación de una misión espacial, cuyo objetivo primordial es garantizar no solo la seguridad del activo, sino también el éxito de la empresa espacial en su conjunto [21].

La siguiente lista describe los productos que la FAC proporcionó con base en las plantillas entregadas por la autoridad de lanzamiento, consolidando el SDP:

- Introducción al programa.
- Configuración de la carga útil.
- Rango de seguridad.
- Contaminación de carga útil.
- Declaración de propiedades de masa y cálculo de cargas útiles.

Esta evaluación preliminar tiene como propósito fundamental determinar la compatibilidad del satélite con el lanzador y con otros satélites a bordo. Se realiza un análisis detallado de las especificaciones técnicas y operativas del satélite, incluyendo materiales utilizados, materiales peligrosos y/o explosivos, dimensiones, compatibilidad electromagnética, entre otros. Esto garantiza que el satélite pueda integrarse y lanzarse de manera exitosa, considerando factores como su masa, tamaño, forma, requisitos de energía y las interfaces mecánicas, eléctricas y de comunicaciones, entre otros elementos cruciales.

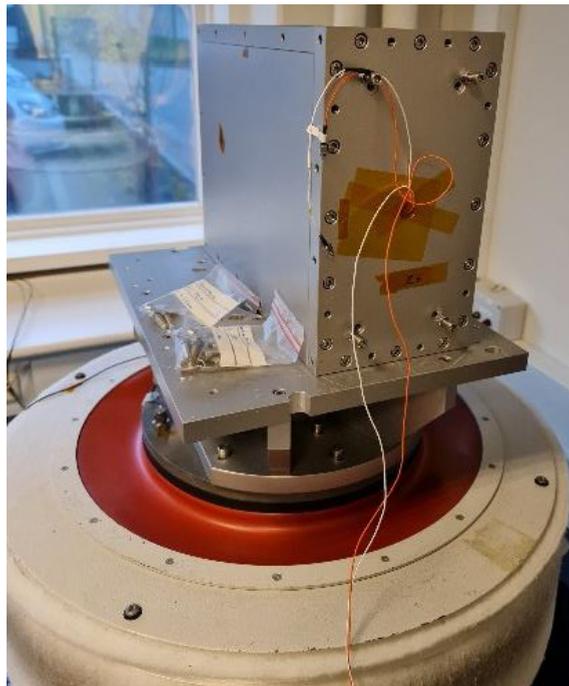
Para respaldar esta compatibilidad, el equipo de la misión FACSAT-2 llevó a cabo una serie de pruebas y simulaciones centradas inicialmente en la compatibilidad con el POD. Estas actividades, en su mayoría, se sustentan en el documento de Control de Interfaces (ICD), el cual se actualizó conforme a los hitos de la misión de lanzamiento. Las pruebas incluyeron:

- Ajuste dimensional.
- Pruebas de vibraciones aleatorias en los tres ejes (Fig. 7).
- Verificación de la compatibilidad electromagnética (EMI) del satélite, soportada mediante una estrategia de inhibición, comprobando que el satélite permanece apagado durante las pruebas de vibración.
- Ciclos térmicos en un rango de temperatura específico (de  $-24^{\circ}$  a  $51^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  por 20 ciclos) (Fig. 8).
- Revisión post-protocolificación para verificar la funcionalidad del satélite.

Cabe destacar que el rango de pruebas para este tipo de satélites varía según las cargas útiles, el tipo de lanzador y el tipo de POD utilizado, el cual soporta cargas estructurales mucho mayores que el satélite, protegiendo de esta manera las otras cargas útiles. Estas pruebas están descritas en la Guía de Usuario para Cargas Compartidas (RPUG) provista por SpaceX [22].

La misión FACSAT-2 experimentó un atraso en el proceso de integración y pruebas del satélite debido a retrasos en las entregas de una de las cargas útiles, como consecuencia de la falta de componentes electrónicos en el mercado mundial posterior a la pandemia. Inicialmente, se había programado que el satélite fuera lanzado como parte de la misión Transporter 6; sin embargo, debido a esta novedad, la Fuerza Aérea Colombiana (FAC) se vio en la necesidad de solicitar un cambio en la programación del lanzamiento para migrar a la misión Transporter 7. Esto permitió la obtención de los nuevos parámetros orbitales en los que operaría el SAT-CHIRIBIQUETE una vez fuera puesto en órbita.

**Figura 7.** SAT-CHIRIBIQUETE en pruebas de vibración aleatoria para ejes X, Y, Z sobre shaker que produce frecuencias entre 20-2000 Hz



*Fuente: CITAE.*

**Figura 8.** SAT-CHIRIBIQUETE en pruebas ciclas de termo vacío en cámara TVAC



*Fuente: CITAE.*

- Inclinación: SSO  $\pm$  0.1 deg
- Altitud: 500  $\pm$  25 km
- LTAN: 10:30 AM  $\pm$  30 min
- Fecha: febrero 2023

El reagendamiento de la misión Transporter 7 no implicó modificaciones técnicas; por lo tanto, la compatibilidad con el lanzador Falcon 9 se mantuvo, y no fue necesario un rediseño del satélite. De igual manera, era esencial cumplir con los nuevos plazos establecidos en la campaña de lanzamiento para garantizar la entrega oportuna del satélite al integrador del POD.

### **3.4. Gestión de adquisición seguros de lanzamiento**

Debido al alto riesgo en las actividades de lanzamiento, las autoridades de control de los países exigen el aseguramiento tanto de los activos involucrados (lanzador y cargas útiles) como de los daños a terceros. Es obligación de la compañía de lanzamiento proveer este último seguro; asimismo, los clientes aseguran los activos con el fin de minimizar los riesgos de la inversión.

El SAT-CHIRBIQUETE contó con seguro para el transporte, la preparación antes de la ignición y el lanzamiento. El satélite inició su transporte desde Dinamarca, donde fue ensamblado e integrado, hasta Berlín para su integración en el POD. La FAC, a través de la empresa multinacional Marsh y con la gestión del LSP Exolaunch, adquirió estos seguros, que permitieron la puesta en órbita del satélite.

Para adquirir el seguro en una modalidad de lanzamiento compartido (rideshare), la FAC proporcionó información sobre el satélite, incluyendo su valor de aseguramiento, su objetivo y su plan de lanzamiento, además de la compañía de manufactura y las características del lanzamiento. La compañía de seguros proporcionó una cotización basada en esta información. Es importante tener en cuenta que el costo del seguro puede variar según el valor del satélite y los riesgos asociados con el lanzamiento y la operación en órbita.

Los tipos de seguros que se pueden adquirir para un satélite son:

- **Seguro todo riesgo:** Cubre cualquier tipo de riesgo que pueda surgir durante el lanzamiento, la puesta en órbita y la operación del satélite. Estos seguros pueden subdividirse para dar cobertura a ciertas actividades, como el transporte, la pre-ignición, la ignición del lanzador y la liberación en órbita. Además, pueden cubrir una amplia gama de riesgos y eventos imprevistos (por ejemplo, falla de lanzamiento, pérdida total o parcial, pérdida de ingresos, incumplimiento de garantía, entre otros).

**Figura 9.** Transporte del SAT-CHIRIBIQUETE desde GomSpace hasta la base Vandenberg, para su lanzamiento en órbita. El recorrido suma un aproximado de 7.000 km



Fuente: CITAE.

- **Seguro de responsabilidad civil:** Cubre los daños que pueda causar el satélite a terceros, incluyendo daños a la propiedad o lesiones personales.
- **Seguro de interrupción de negocios:** Cubre las pérdidas financieras que pueda sufrir el usuario del satélite si se produce una interrupción en la operación del satélite.

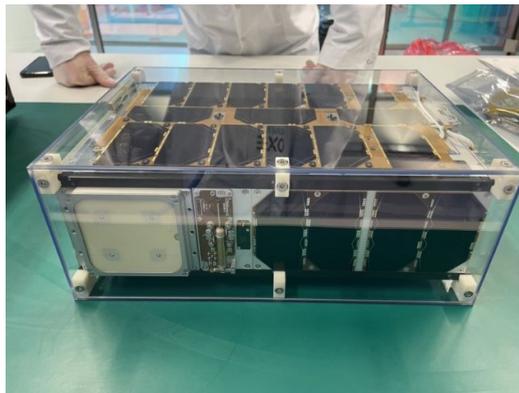
### 3.5. Gestionar la logística y transporte del satélite

Una vez finalizadas las actividades de adquisición de seguros, licencias y registros, se procede al envío del satélite desde las instalaciones de integración y pruebas de Gomspace en Dinamarca hasta el centro de integración del POD de Exolaunch en Alemania. Posteriormente, se realiza el traslado al lugar de lanzamiento para su integración en el lanzador, en la Base Vandenberg de la Fuerza Espacial de Estados Unidos, ubicada en California. Los detalles del transporte del satélite se presentan de manera visual en la Figura 9.

Para evitar cualquier daño leve o permanente que pudiera comprometer la estructura, los sensores y otros instrumentos, el satélite fue transportado dentro de una caja especial de acrílico que contaba con rieles de apoyo para evitar el roce de los paneles y las cubiertas protectoras con el exterior, como se evidencia en la Figura 10. Esta caja, a su vez, estaba contenida en una funda Pelican personalizada que inhibía las descargas eléctricas y evitaba la contaminación por partículas.

Durante el transporte, el satélite estuvo completamente apagado, en cumplimiento con las leyes de gestión de mercancías peligrosas [23].

**Figura 10.** *Caja acrílica usada para el transporte seguro del SAT-CHIRIBIQUETE*



*Fuente: CITAE*

### 3.6. Integración del satélite al POD y al lanzador

El POD entregado por la empresa Exolaunch para el despliegue en órbita es la última versión de la línea EXOPod, denominada EXOPod Nova. Este sistema de despliegue está disponible para tamaños 6U/12U y 16U, y se puede dividir en ranuras más pequeñas para adaptarse a cubesats de cualquier tamaño [24].

El requerimiento de la FAC para el manejo del satélite incluía el uso de un cuarto limpio ISO 8. Exolaunch cuenta con instalaciones certificadas para pruebas e integración de satélites pequeños [25], y posee la certificación en normas de gestión de calidad con alto reconocimiento a nivel mundial. La integración tuvo lugar el 30 de enero de 2023, cumpliendo con los cronogramas esperados y la campaña de lanzamiento.

Los ingenieros de GomSpace, junto con la FAC, realizaron la prueba de "Fit-check" para comprobar que el modelo de vuelo del satélite encajara en el puerto de acceso del POD. Como se evidenció en el reporte de gestión de lanzamiento, el primer Fit-Check se realizó utilizando el modelo CAD del satélite; sin embargo, con el modelo manufacturado se conocen las verdaderas tolerancias.

Esta prueba se realizó con los elementos Remove Before Flight (RBF) de la cámara electroóptica y los sensores solares (FSS) instalados, como se evidencia en la Figura 11. Los ingenieros de Exolaunch realizaron una prueba de funcionalidad del POD con el satélite a bordo.

Finalmente, se removieron los RBF y se adjuntaron a la hoja de verificación, dando paso a la integración del satélite dentro del POD. Como paso final, se ajustó la compuerta de liberación, que permite desplegar el satélite en órbita.

**Figura 11.** Prueba Fit-check SAT-CHIRIBIQUETE con elementos RBF en el POD



*Fuente: Exoalunch.*

Los laboratorios en los cuales se realiza la integración de satélites en el dispensador de carga útil deben cumplir con las normas ISO 14644-1 y 14644-2 [26][27], que establecen los requisitos para la clasificación de la limpieza en entornos controlados, incluidos los laboratorios de integración de cargas útiles para satélites. Además, también pueden aplicarse normas específicas de la industria espacial, como la norma ECSS-E-ST-40C [28] de la Agencia Espacial Europea.

La integración del POD en el vehículo de lanzamiento se lleva a cabo en las instalaciones del LSP, en este caso, en California. Los proveedores de servicios de lanzamiento, como SpaceX, tienen sus propias instalaciones de integración de carga útil, que incluyen áreas de trabajo limpias y controladas ambientalmente. El proceso de integración implica preparar el lanzador para recibir la carga útil, instalar el POD, integrar la carga útil, verificar y probar la carga útil, y sellar el lanzador para su transporte a la plataforma de lanzamiento. La elección del laboratorio de integración y del proveedor de servicios de lanzamiento dependerá de las necesidades específicas de cada misión y del lanzador utilizado [29].

El SAT-CHIRIBIQUETE arribó a la base de la Fuerza Espacial Estadounidense Vandenberg el 1 de marzo de 2023, contando con las licencias de exportación y la confirmación de la inscripción del activo al Space Command Squadron No. 18. Su integración finaliza una vez se obtiene el certificado de preparación del lanzador emitido por SpaceX. La integración del POD y el lanzador consiste

en asegurar el dispositivo en la primera etapa del Falcon 9, llamada booster. Posteriormente, se efectúan la verificación de la conexión eléctrica, mecánica y de comunicación.

Una vez integrado (Fig. 12), se aplican medidas de protección para asegurar que esté resguardado durante el transporte y lanzamiento. Esto incluye cubiertas protectoras y sistemas de aislamiento térmico. Finalmente, el Falcon 9, con el POD integrado, es transportado a la plataforma de lanzamiento y se lleva a cabo el procedimiento de lanzamiento.

**Figura 12.** *Payload fairing: segunda etapa del lanzador con el POD ensamblado*



*Fuente: Space X.*

#### **4. Resultados**

El lanzamiento, también conocido como el “día D”, marca la culminación y el cierre de la Fase AR (Acceptance Review). Las distintas etapas del lanzamiento pueden variar según el concepto de la misión, pero la Tabla 3 proporciona una guía de las etapas más relevantes.

La fase inicial, denominada “Launch and Early Operations (LEOP)”, abarca las actividades necesarias para poner en funcionamiento el satélite. Esta

fase comienza una vez que el POD libera el satélite y continúa hasta que todas las cargas útiles están completamente operativas. Una vez que se ha obtenido un control total sobre las cargas útiles, se inicia la fase de “In-Orbit Calibration” o “Calibración en órbita”. En esta etapa, se realizan calibraciones y caracterizaciones del sensor. La duración de esta fase operativa puede variar, generalmente extendiéndose alrededor de tres meses, dependiendo del éxito en la adquisición de puntos a nivel global.

**Tabla 3.** Fases de lanzamiento para una misión en carga compartida

<b>Inicio Operación</b>	<b>Duración</b>	<b>Actividad</b>
Lo – 6 meses*	1 día	Manifiesto de lanzamiento
Lo – 2 meses*	5-7 días**	Entrega satélite, chequeo e integración
Lo – 45 días*	1 día	Entrega resultados Tests medioambientales
To	15 min	Lanzamiento
To + 15 min	1 min	Puesta en órbita del satélite
To + ≈1 horas	1 días	LEOP – Detumbling
To + ≈1 días	5 min	LEOP – Despliegue de paneles y antenas
To + ≈1 días	2-4 semanas	LEOP – Chequeo de sistemas
To + ≈2-4 semanas	1 semanas	LEOP – Chequeo de cargas útiles
To + TBD	TBD	Operaciones en órbita (IOCS)
To + TBD	<25 años	Disposición final

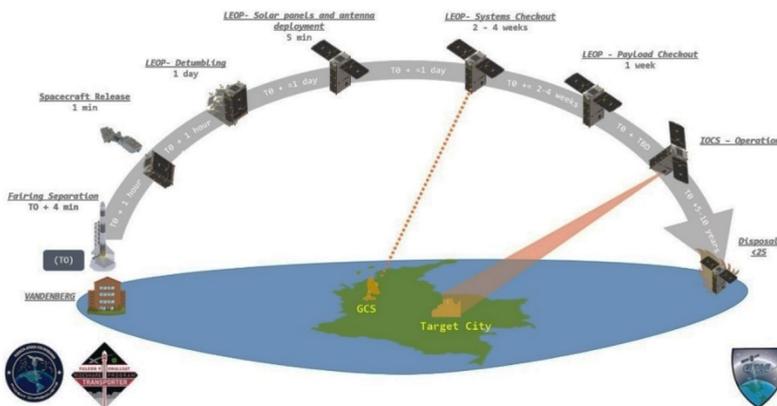
*Nota. \* El tiempo de entrega previo al lanzamiento dependerá del LSP. \*\* La duración de la integración de la nave espacial en el cohete dependerá de los procedimientos establecidos por el proveedor de lanzamiento. Fuente: CITAE.*

La fase inicial, denominada “Launch and Early Operations (LEOP)”, abarca las actividades necesarias para poner en funcionamiento el satélite. Esta fase comienza una vez que el POD libera el satélite y continúa hasta que todas las cargas útiles están completamente operativas. Una vez que se ha obtenido un control total sobre las cargas útiles, se inicia la fase de “In-Orbit Calibration” o “Calibración en órbita”. En esta etapa, se realizan calibraciones y caracterizaciones del sensor. La duración de esta fase operativa puede variar, generalmente extendiéndose alrededor de tres meses, dependiendo del éxito en la adquisición de puntos a nivel global.

La Figura 13 ilustra las fases del lanzamiento del satélite SAT-CHIRIBIQUETE en la misión FACSAT-2. Inicialmente programado para el 2 de abril de 2023 a bordo del cohete Falcon 9, el lanzamiento se retrasó al 15 de abril debido a procedimientos de verificación y condiciones ambientales desfavorables, según lo indicó SpaceX [30].

Después del despegue, el cohete alcanzó el punto de máxima presión dinámica (Máx. Q) a los 60 segundos, liberó la primera etapa a los 120 segundos y separó el carenado que protegía la carga útil a los 240 segundos. Las cargas útiles se desplegaron en órbita polar a una altitud de  $500 \pm 25$  km, lo que permite dos pases efectivos diarios del SAT-CHIRIBIQUETE sobre Colombia.

**Figura 13.** Fases de lanzamiento misión FACSAT-2 SAT-CHIRIBIQUETE a bordo del cohete FALCON 9 de la misión TRANSPORTER 7



Fuente: CITAE.

El CubeSat colombiano se separó del lanzador con la ayuda del EXOpod Nova de EXOLAUNCH, a los 64 min posteriores al despegue del lanzador, marcando el inicio de la fase LEOP (Launch and Early Orbit Phase) como se aprecia en la Figura 14 [31].

**Figura 14.** Despliegue exitoso en órbita SAT-CHIRIBIQUETE



*Fuente: SpaceX.*

Se hizo entrega por parte de SpaceX del Orbit Parameter Message (OPM) el cual indica el vector del lanzamiento, con el cual es posible predecir la trayectoria del satélite en el espacio. Durante esta fase se liberaron los paneles solares y la antena desplegable, y se realizaron chequeos de sistemas y de las dos cargas útiles: la cámara electroóptica y el espectrómetro.

## 5. Conclusiones

La FAC logró un hito significativo al realizar con éxito la gestión autónoma del primer lanzamiento efectivo de su satélite Chiribiquete, validando así los procesos de selección previamente establecidos. Esta victoria marcó un importante avance en la capacidad del país para llevar a cabo misiones espaciales de forma independiente.

Como resultado de este logro, la institución comenzó a desarrollar en el sector espacial la base para futuras operaciones y proyectos. Esta doctrina no solo consolidó el conocimiento adquirido durante el primer lanzamiento, sino que también sentó las bases para una ruta que complementa la Estrategia para el Desarrollo Aéreo y Espacial de la Fuerza Aérea Colombiana 2042 (EDAES).

La documentación generada a partir de este proyecto facilita la transferencia de conocimientos a las generaciones futuras y garantiza que la información esencial se mantenga accesible y organizada en el sistema, contribuyendo así al éxito continuo de las actividades espaciales.

## 6. Recomendaciones

Las recomendaciones presentadas incluyen aspectos importantes a considerar en el proceso de selección y manejo de proveedores de servicios de lanzamiento. Estas recomendaciones pueden ser útiles para garantizar el éxito de las misiones espaciales.

En primer lugar, el estado debe avanzar hacia la consolidación de una normativa adecuada para la gestión de las actividades de lanzamiento. Actualmente, no se cuenta con una entidad especializada que pueda respaldar legalmente una misión espacial. Esto es relevante ya que el Estado Colombiano es quien debe responder ante otros estados en caso de daños a terceros como consecuencia de los lanzamientos. Además, se debe avanzar hacia la modernización en la contratación del Estado con compañías en el exterior, permitiendo realizar convenios en inglés y coordinar tribunales de arbitraje en países neutrales, situaciones que fueron necesarias coordinar con el LSP durante la misión FACSAT-2.

Como segunda sugerencia, los estudios de mercado y acercamientos con las compañías de lanzamiento deben realizarse con varios años de anticipación. La alta demanda de lanzamientos en carga compartida y la limitada disponibilidad de lanzadores exigen una mayor planificación. Además, se sugiere realizar una evaluación exhaustiva de las propuestas presentadas por los proveedores de servicios de lanzamiento. Esto implica analizar detalladamente los criterios de evaluación, como las órbitas ofrecidas, las fechas de lanzamiento y los costos. Es importante asignar puntajes de acuerdo con la prioridad de cada criterio y considerar el valor real del servicio, incluyendo los costos de administración e impuestos.

Otra recomendación es considerar, dentro de la planificación de la misión, tiempos extendidos para la fecha de lanzamiento. Al ser una modalidad de carga compartida, el lanzamiento depende de las cargas principales. Además, el alistamiento tecnológico es de alta complejidad y requiere establecer planes de contingencia y gestión de riesgos para hacer frente a posibles eventos imprevistos durante el lanzamiento.

Por último, se recomienda mantener una estrecha colaboración con las autoridades pertinentes, como el Ministerio de Tecnología y Comunicaciones, para obtener las autorizaciones necesarias y cumplir con los requisitos regulatorios.

## 7. Referencias

- [1] Alén Space, «A Basic Guide to Nanosatellites,» *Alén Space*, p. 14.
- [2] A. Caruso, A. Quarta, G. Mengali y M. Bassetto, «Optimal On-Orbit Inspection of Satellite Formation,» *Remote Sensing*, vol. 14, nº 20, p. 5192, 2022.
- [3] O. Ehrenfeud, A. Ricco, D. Escuderos, C. Kitts, E. Agasid, N. Bramall, K. Bryson, J. Chittenden, C. Conley, A. Cocinero y e. al., «The O/OREOS mission—Astrobiology in low Earth orbit,» *Acta Astronauta*, vol. 93, pp. 501-508, 2014.
- [4] E. Hawkins, A. Kanapskyte y S. Santa María, «Desarrollo de tecnologías para experimentos biológicos en el espacio profundo,» 2020.
- [5] S. Rincon y P. K. Cárdenas Juan, «Development of Space Program,» de *IAC-22,B4,1,8X73664*, Francia, 2022.
- [6] R. Sonia, C. Juan, K. Pirazán, I. Acero, H. Ronald y E. Cortés, «Diseño crítico del nanosatélite de la misión FACSAT-2 para la observación y análisis del territorio colombiano,» *UIS Ingenierías*, vol. 22, nº 3, pp. 69-86, 2023.
- [7] M. Cho, «Cubesat handbook: from mission design to operations,» de *CubeSat assembly, integration, testing and verification*, Nottingham, Elsevier, 2020, pp. 319-338.
- [8] Wertz, J., Everett, D. & Puschell, P., *Space mission engineering - The new SMAD*, Microcosm Press; First Edition (29 Julio 2011), 2011.
- [9] MINTIC, *ENSAMBLE, INTEGRACION Y REQUERIMIENTO DE PRUEBAS para el satélite SATCOL 1*.
- [10] B. Twiggs y J. Puig-Suari, «Introduction: The history of the,» de *CubeSat Handbook: From mission design to operations*, Nottingham, Elsevier, 2021, pp. 10-17.
- [11] FUTRON, «Space Transportation Costs: Trends in Price per Pound to Orbit 1990-2000,» Futron Corporation, Maryland, 2002.
- [12] eesa, «eoPortal,» 30 05 2012. [En línea]. Available: <https://www.eoport.org/other-space-activities/cubesat-concept#references>.
- [13] E. Kulu, «Nanosats Database,» 01 06 2023. [En línea]. Available: <https://www.nanosats.eu/tables#keywords>.



- [14] Rocket Lab, «ROCKET LAB USA,» Rocket Lab, 2020. [En línea]. Available: <https://www.rocketlabusa.com/updates/>.
- [15] C. Cummins, «General Services Administration - Price List Highlights,» de *Nanoracks*, Forge River Rd, 2018.
- [16] J. Wertz, D. Everett y J. Puschell, «Space mission engineering: The new SMAD,» de *Orbits and Astrodynamics*, Hawthorne, California, Space Technology Library, 2015, pp. 197-220.
- [17] C. Michel, *Handbook of Satellite Orbits*, Pasadena, California : Springer, 2014.
- [18] NASA, «S'COOL,» 03 2020. [En línea]. Available: <https://scool.larc.nasa.gov/Spanish/orbits-sp.html>.
- [19] S. Clark, «Spaceflight Now,» 19 08 2019. [En línea]. Available: <https://spaceflightnow.com/2019/08/19/launch-providers-announce-ride-share-missions-large-and-small/>.
- [20] E. Kulu, «Nanosats,» 2022. [En línea]. Available: <https://www.nanosats.eu/#figures>.
- [21] National Aeronautics and Space Administration, «Science Mission Directorate Policy: SMD Standard Mission Assurance Requirements For Payload Classification D,» p. 88, 2021.
- [22] SpaceX, «Rideshare Payload User's Guide,» Space Exploration Technologies, United States, 2021.
- [23] United Nations, «Transport of Dangerous Goods ST/SG/AC.10/1/Rev.19 (Vol 1.),» United Nations Publications, New York y Geneva, 2015.
- [24] M. Tolstoj, S. Polyak, C. Jonas y J. Rose, *EXOpod User Manual*, Exo-launch GmbH, 2022.
- [25] NORMA INTERNACIONAL (ISO), «Sistemas de gestión de la calidad – Requisitos,» 15 09 2015. [En línea]. Available: [http://www.congresoson.gob.mx:81/Content/ISO/documentos/ISO\\_9001\\_2015.pdf](http://www.congresoson.gob.mx:81/Content/ISO/documentos/ISO_9001_2015.pdf).
- [26] INTERNATIONAL STANDARD, «standards.iteh.ai,» 15 12 2015. [En línea]. Available: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/53394/b5d9892aabob4683bfb17888f661d555/ISO-14644-1-2015.pdf>.
- [27] INTERNATIONAL STANDARD, «standards.iteh.ai,» 15 12 2015. [En línea]. Available: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/53393/0219f8fe4774420a9d7b0702f4b288c9/ISO-14644-2-2015.pdf>.
- [28] EUROPEAN COOPERATION FOR SPACE STANDARDIZATION, «Space engineering - Software,» ESA-ESTEC , Noordwijk, The Netherlands, 2009.

- [29] SpaceX, «FALCON USER’S GUIDE,» 09 2021. [En línea]. Available: <https://www.spacex.com/media/falcon-users-guide-2021-09.pdf>.
- [30] Fuerza Aérea Colombiana, «FACSAT-2 CHIRIBIQUETE,» *Revista Aeronáutica - Edición 309*, p. 83, 2023.
- [31] SpaceX, «SpaceX,» 15 04 2023. [En línea]. Available: <https://www.spacex.com/launches/mission/?missionId=transporter-7-pl>.
- [32] Bryce Tech, «SmallSats by the Numbers 2023,» Washington D.C., 2023.
- [33] ESA, «European Space Agency,» septiembre 2023. [En línea]. Available: [https://www.esa.int/Enabling\\_Support/Space\\_Engineering\\_Technology/About\\_Payload\\_Systems](https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/About_Payload_Systems).



# CAPÍTULO 7

## IMPACTO DE LAS REALIDADES EXTENDIDAS EN EL APRENDIZAJE Y DESARROLLO COGNITIVO

**Geana Marcela Duarte López**  
Estudiante de ingeniería física

**Salomé Henao Valencia**  
Ingeniera electrónica

/ Aula STEM FabLab/Dirección Académica.  
Universidad Nacional de Colombia  
Stem\_man@unal.edu.co

**Resumen.** El auge de las realidades extendidas ha traído una nueva modalidad en los métodos de capacitación en distintas áreas de la industria. Esto acarrea cambios en el desarrollo cognitivo y neurológico del aprendizaje, así como en la toma de decisiones y reacción. Se explora su eficiencia y funcionalidad efectiva en el campo aeroespacial, y cómo podrían mejorar las habilidades cognitivas y neurológicas mediante la implementación de realidades extendidas. Antes de desarrollar un proyecto directamente, se estudia la posibilidad de crearlo, evaluando si existe una relación entre las experiencias con realidades extendidas y los cambios en el perfil psicológico. Para lograr esto, se escaló el estudio en dos fases: una con una población sin conocimientos de XR y otra con personas que poseen mayor conocimiento en esta área.

**Abstract.** The rise of extended realities has brought with it a new modality in the training methods used in different areas of the industry; however, this brings with it a series of changes in the cognitive and neurological development of the learning, decision making and reaction process. Therefore, we delve into its efficiency and effective functionality in the aerospace field, and how the improvement of cognitive and neurological skills could be realized from the implementation of extended realities, so that, prior to developing a project directly, we study the possibility of creating it, evaluating whether there is a relationship between experiences with extended realities and changes in the psychological profile. To achieve this, the study was scaled in two phases, one with a population with no knowledge of XR and the other with people who have more knowledge in this area.

**Palabras clave:** Aprendizaje, campo aeroespacial, desarrollo cognitivo, métodos de capacitaciones, realidades extendidas, psicología conductual.

**Keywords:** Learning, aerospace, cognitive development, training methods, extended realities, behavioral psychology.

## 1. Introducción

Las realidades extendidas (XR) han sido herramientas determinantes en el desarrollo de procesos investigativos que incluyen la virtualización de espacios y la generación de experiencias inmersivas. Estas tecnologías permiten al personal de distintos ámbitos sumergirse en situaciones específicas y controlables, desarrollando capacidades de reacción y recibiendo un entrenamiento cualificado para su campo de acción.

La viabilidad de introducir XR como método único o complementario para la capacitación dependerá de las necesidades de formación, los recursos disponibles, los riesgos para la salud y la seguridad, y las preocupaciones de privacidad, entre otros factores [1]. Estas tecnologías ofrecen simulaciones realistas que alteran el cerebro de manera similar a cómo lo haría una situación en la vida cotidiana, permitiendo al usuario actuar y determinar alternativas para resolver problemas.

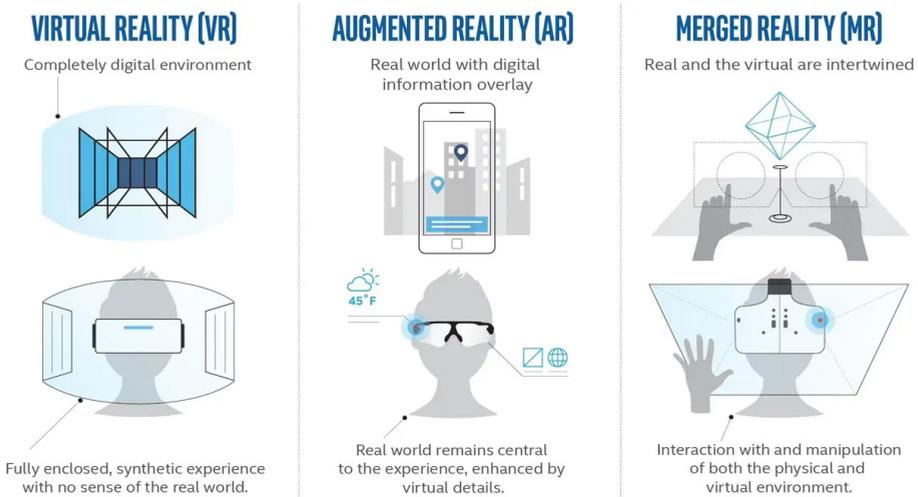
Las realidades extendidas no solo inmersan al usuario en un plano mental, sino también en un plano corporal, generando un contexto de 360° en el cual el participante actúa en primera persona. En estos entornos, la interacción humano-máquina permite la concatenación de escenas, espacios, tramas y otros elementos dispuestos por el creador. Las personas deben ser el núcleo de la creación, ya que su cuerpo y movimiento hacen emerger el sistema [2].

Es fundamental establecer los distintos tipos de realidades extendidas y su funcionalidad en la elaboración de proyectos y alternativas de capacitación para personal de diversas áreas, con un enfoque particular en el campo aeroespacial. La importancia de estas tecnologías radica en la respuesta del cerebro al entorno y a la experiencia en tiempo real, lo cual es crucial para predecir y evitar problemas irreversibles y dificultades críticas.

La realidad aumentada y la realidad virtual están estrechamente relacionadas. Aunque la realidad virtual está más desarrollada en la sociedad, ambas comparten características comunes, como la inclusión de modelos virtuales y gráficos 2D y 3D para experiencias de usuario. La principal diferencia es que la realidad aumentada no reemplaza el mundo real por uno virtual, sino que mantiene al individuo en el mundo real y lo complementa con información virtual con la que puede interactuar [3].

La realidad virtual, por otro lado, se entiende como tecnologías de simulación y visualización por computadora que permiten recrear escenarios tridimensionales e interactuar con ellos sin necesidad de estar presente físicamente [4].

**Figura 1.** Tipos de realidades extendidas [5]



Entre sus ventajas se encuentran:

- I) **Provisión de un encuentro único:** Permite a los usuarios experimentar situaciones y lugares sin tener que salir de sus casas [6].
- II) **Captación efectiva de información:** Facilita un aprendizaje asertivo [6].
- III) **Entrenamiento seguro:** Los individuos que necesitan desempeñarse en situaciones de alto riesgo, como en el servicio armado o con sustancias químicas, pueden entrenar de manera segura desde aulas estándar [6].
- IV) **Acceso fluido a los datos:** Elimina los obstáculos de distancia para acceder a datos remotos [6].

Cada uno de los tipos de realidades extendidas (virtual, mixta y aumentada) tiene aplicabilidad en diversos desarrollos, como el aprendizaje de diseño, ensamblaje, construcción, testeo y reparación de equipos; escenas de emergencia y pensamiento rápido; monitoreo de dispositivos a larga distancia; y entrenamiento físico y psicológico. Por esta razón, su enfoque en el ámbito aeroespacial sería enriquecedor y ampliamente necesario para acelerar procesos, reducir riesgos y disminuir costos.

Dependiendo de la necesidad, XR puede utilizarse en la formación digital de motores, aeronaves y aviones militares, generando prototipos antes de su construcción para evitar fallos en la fabricación. También es útil para

proporcionar asistencia visual a los técnicos y operadores encargados del mantenimiento y pruebas de funcionamiento previo, utilizando gemelos digitales que establecen una conexión entre dispositivos físicos y su construcción virtual, asegurando procesos seguros y eficaces.

Las simulaciones de vuelos y capacitaciones de astronautas en entornos completamente inmersivos pueden replicar las condiciones específicas de su entrenamiento y las situaciones adversas a las que deben enfrentarse y resolver con agilidad, incluyendo el manejo de los controles de vuelo y las adaptaciones al espacio.

Aunque este tema no es tan abordado y no hay una gran cantidad de simuladores disponibles, algunos pioneros han desarrollado herramientas enfocadas en el campo aeroespacial.

Un ejemplo es el **Entorno de Simulación Aeroespacial** (Aerospace Simulation Environment - ASA en portugués), un marco de simulación orientado a objetos desarrollado principalmente en C++. Permite el modelado y simulación de escenarios operativos militares para apoyar el desarrollo de tácticas y procedimientos en el contexto aeroespacial para la Fuerza Aérea Brasileña [7]. Este proyecto incluye varias simulaciones, análisis de datos referentes a las acciones y decisiones tomadas durante la simulación, trabajo independiente y conjunto, y combate aéreo.

El **Satellite Tool Kit (STK)** de Analytical Graphics Inc. [8] es una de las herramientas más potentes para el modelado, simulación y análisis de sistemas relacionados con el espacio, la defensa y sistemas inteligentes. Incluye componentes para trabajar con vehículos en la Tierra y en el espacio, como satélites, cohetes, naves espaciales, bases en Tierra, autos y aviones. También permite modelar el entorno terrestre o espacial y trabajar con los sistemas electrónicos de los vehículos, como los sistemas de comunicación y los sensores inerciales de las naves. Ofrece opciones para evaluar el desempeño de las simulaciones [9].

**ORBITER** [10] es un simulador de vuelo espacial gratuito que permite simulaciones en tiempo real con animaciones en 3D utilizando modelos de vuelo reales. Puede simular entornos tanto dentro de la atmósfera terrestre como fuera de ella, y cuenta con diversas aeronaves para explorar el sistema solar, trabajar encuentros entre naves y otras acciones. Entre las naves disponibles en las bibliotecas de ORBITER se encuentran el transbordador espacial Atlantis, la Estación Espacial Internacional y un modelo del telescopio Hubble. Este software se ha utilizado como herramienta educativa para comprender conceptos y en general como ayuda en la enseñanza [9].

Pero, ¿de qué manera son útiles estos simuladores al asemejar situaciones y eventos problemáticos en ciertas áreas de trabajo? ¿Qué implicaciones psicológicas tienen en el desarrollo cognitivo y psicológico de los usuarios? Se abordará el desarrollo de capacidades enfocado en las circunstancias a las que son sometidos, sus afectaciones e influencia en los procesos de aislamiento en el espacio, así como su funcionalidad educativa para el crecimiento social y cultural, no solo del personal sino también de la comunidad.

## 2. Metodología

Las realidades extendidas (XR) abarcan un concepto amplio que puede ser aplicado de diversas maneras en la industria aeroespacial. Cada tipo de realidad extendida (realidad virtual, aumentada y mixta) puede integrarse en un proyecto con un enfoque específico y adaptado a distintas necesidades. Antes de desarrollar cualquier propuesta, es crucial entender tanto los conceptos de realidades extendidas como los principios básicos de la aeronáutica, así como evaluar las aplicaciones previas de estas tecnologías.

El primer paso en esta metodología es identificar los inconvenientes actuales en la industria aeroespacial. Esto implica reconocer los desafíos y limitaciones que enfrentan los profesionales y cómo estos afectan el desempeño y la seguridad. Posteriormente, se debe explorar cómo las realidades extendidas pueden ofrecer soluciones efectivas para estos problemas.

En el contexto de la aeronáutica, ya existen proyectos que han integrado tecnologías de realidades extendidas. Por ejemplo, en el ámbito de la realidad virtual (VR), se han desarrollado simuladores para diversas aplicaciones debido a su capacidad de inmersión y su costo relativamente bajo en comparación con otras tecnologías [11]. En cuanto a la realidad aumentada (AR), se han implementado sistemas de navegación de vuelo [12], que en el futuro podrían combinarse con simuladores inmersivos para mejorar la capacitación de los pilotos. Por su parte, la realidad mixta (MR), utilizada por la NASA con dispositivos como las Microsoft HoloLens, permite a los trabajadores recibir instrucciones superpuestas en su campo de visión y realizar operaciones de manera más eficiente que si utilizaran dispositivos móviles [13].

El proyecto actual busca diferenciarse al enfocarse en el impacto de las realidades extendidas en la salud mental de los astronautas. Aunque existen aplicaciones previas, el objetivo es revisar los estímulos generados por la exposición a experiencias de XR y cómo estos pueden contribuir a la mejora del bienestar psicológico en entornos espaciales. La metodología propuesta incluirá:

- 1. Revisión de la Literatura:** Analizar estudios previos sobre el uso de XR en la capacitación aeroespacial, así como investigaciones sobre su impacto en la salud mental.
- 2. Evaluación de Proyectos Existentes:** Revisar aplicaciones actuales de XR en la industria aeroespacial, identificando sus beneficios y limitaciones. Esto incluirá simuladores de VR, sistemas de AR y aplicaciones de MR.
- 3. Desarrollo de Experimentos:** Diseñar y llevar a cabo experimentos que expongan a los participantes a experiencias de XR específicas, evaluando sus efectos en la capacidad de reacción, toma de decisiones y bienestar psicológico.
- 4. Análisis de Resultados:** Examinar cómo las experiencias de XR afectan la salud mental de los participantes, identificando mejoras en la capacidad de adaptación, reducción de estrés y aumento del rendimiento.
- 5. Aplicación y Recomendaciones:** Basándose en los resultados, desarrollar recomendaciones para la implementación de XR en la capacitación y soporte psicológico de los astronautas.

Al abordar estas etapas, el proyecto buscará proporcionar una comprensión integral de cómo las realidades extendidas pueden ser utilizadas no solo para mejorar las habilidades y la capacitación, sino también para apoyar el bienestar mental en el campo aeroespacial.

**Figura 2.** Videojuego de realidad virtual con el que se realizó la recolección de datos [15]



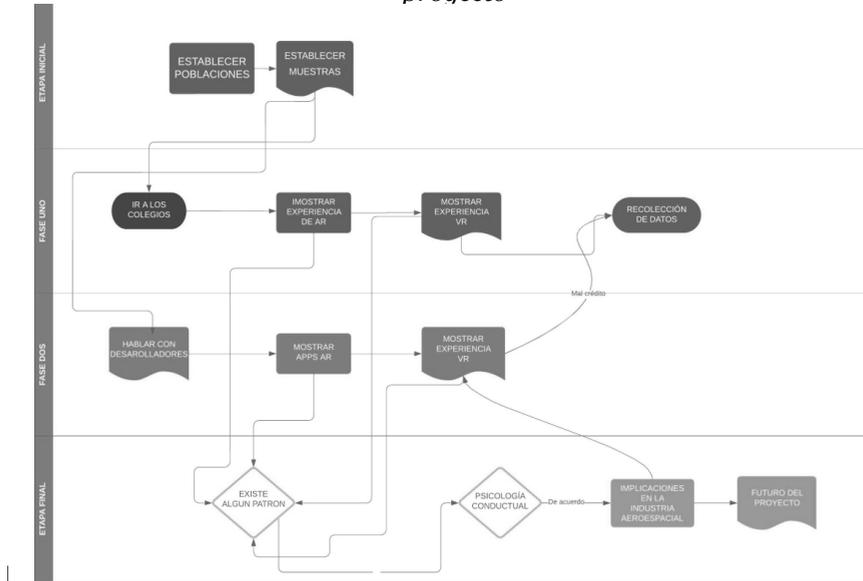
Los diversos proyectos en el campo de las realidades extendidas (XR) han abordado principalmente aspectos relacionados con el rendimiento y las capacidades de los astronautas, tales como capacitaciones mediante simuladores y la presentación de instrucciones. Sin embargo, el impacto de estas tecnologías en la salud mental de los astronautas y su respuesta a las experiencias de XR no ha sido ampliamente investigado. Los viajes espaciales generan una serie de estímulos que pueden afectar negativamente a los individuos, ocasionando a veces dificultades para llevar a cabo las actividades planeadas [14].

Para comprender cómo las realidades extendidas pueden influir en la salud mental de los astronautas, se propone un estudio centrado en la respuesta conductual a la exposición a estas tecnologías. En particular, el estudio se enfocará en comparar el comportamiento de los participantes cuando se enfrentan a experiencias de realidad aumentada (AR) en el contexto de la educación sobre ingeniería aeronáutica y cuando se les expone a entornos completamente inmersivos relacionados con ambientes espaciales.

El estudio se llevará a cabo utilizando varias metodologías. En primer lugar, se empleará una metodología inductiva [16], que permite identificar patrones generales en los comportamientos de los participantes después de la exposición a XR. Esta metodología es adecuada dado que, aunque las personas presentan características individuales diversas, se teorizan patrones comunes en sus respuestas a las experiencias de XR. Se investigará si los individuos con trastornos psicológicos similares muestran comportamientos consistentes o si, por el contrario, sus respuestas varían significativamente ante los estímulos.

Para llevar a cabo un análisis completo, se recopilarán datos variados sobre los participantes y sus respuestas a las experiencias de XR. Esta recopilación permitirá identificar y agrupar patrones basados en variables específicas, tales como el perfil psicológico de los participantes, su desarrollo cultural y cualquier incidencia de traumas o experiencias significativas previas [17]. El objetivo es construir un entendimiento más profundo de cómo las experiencias de XR afectan la conducta y la salud mental, proporcionando una base sólida para futuras investigaciones y aplicaciones en la industria aeroespacial.

**Figura 3.** Diagrama de flujo del proceso para el buen desarrollo del proyecto



Dado que el objetivo es mitigar las afecciones en la salud mental que pueden surgir en la industria aeroespacial, se llevará a cabo un estudio con dos grupos de población diferenciados. El primer grupo está compuesto por individuos con poco o ningún contacto previo con las realidades extendidas (XR), mientras que el segundo grupo está formado por personas con experiencia significativa en estas tecnologías. El propósito es evaluar el impacto de las experiencias de XR en la salud mental y determinar si existen patrones conductuales entre estos dos grupos [18]. Los hallazgos se utilizarán para aplicar conocimientos a la psicología del personal en la industria aeroespacial.

Para establecer una base de información, se utilizarán datos obtenidos de un proyecto colaborativo con la Universidad Nacional de Colombia, denominado "UNAL en la región". Este proyecto tiene como objetivo proporcionar nuevos aprendizajes a colegios rurales en el departamento de Caldas mediante el uso de dispositivos de realidad virtual (VR) y realidad aumentada (AR). La iniciativa fomenta el interés en las tecnologías de la industria 4.0 y los desarrollos en XR [19]. Las variables por considerar en el estudio incluyen: edad, nivel de escolaridad, acceso a la educación, sociología de la región (rural o urbana), y experiencias previas con realidades extendidas.

Para maximizar el impacto de la investigación, se centra en una de las problemáticas identificadas en misiones aeroespaciales: la desconcentración causada por el contacto con un entorno nuevo y diferente como el espacio

exterior. Las preparaciones en la industria aeroespacial a menudo no contemplan las consecuencias de la adaptación a un entorno tan distinto [20]. Por ello, se utilizará un entorno virtual basado en la Estación Espacial Internacional (EEI) para familiarizar a los participantes con experiencias visuales que podrían presentar en una misión espacial. El demo incluirá pequeñas misiones relacionadas con los viajes aeroespaciales, como salir al exterior de la estación espacial.

En la segunda fase de la recopilación de datos, se realizará la misma prueba con personas con experiencia en realidades extendidas y desarrollos en estas tecnologías. Se les mostrará el mismo entorno virtual basado en la EEI, desarrollado por terceros, no por los participantes. Aunque el entorno es realista, algunos usuarios han observado que no es completamente hiperrealista, debido a la optimización de texturas en ciertas áreas.

Al concluir la fase de recopilación de datos para ambos grupos, se procederá a buscar patrones en los resultados obtenidos. Esto permitirá extraer conclusiones claras sobre los efectos de las realidades extendidas en la salud mental y la conducta de los participantes, brindando información valiosa para la aplicación en la industria aeroespacial.

### **3. Resultados**

Las plataformas de realidades extendidas (XR) de alta dimensión, con simulaciones inmersivas, ofrecen presentaciones de estímulos mejoradas que replican distracciones, factores estresantes y demandas similares a los encontrados en actividades cotidianas. Es importante reconocer que, en algunos casos, las evaluaciones neuropsicológicas tradicionales pueden reflejar adecuadamente la función cognitiva [21].

La divergencia entre los dos grupos de estudio se centra en sus experiencias y conocimientos previos con las realidades extendidas. Este factor resulta determinante en sus reacciones y comportamientos al utilizar estas tecnologías por primera vez y al interactuar con el entorno inmersivo.

El cerebro, al igual que el sistema de realidad virtual, mantiene un modelo (simulación) del cuerpo y el espacio circundante. Esta simulación se utiliza para proporcionar la entrada sensorial esperada a través del hardware de realidad virtual. Para lograr una inmersión realista, el modelo de realidad virtual intenta replicar el modelo cerebral tanto como sea posible. Cuanto más se asemeje el modelo virtual al modelo cerebral, más intensa será la sensación de presencia del individuo en el entorno virtual [22]. Esto puede manifestarse en comportamientos físicos como agacharse frente a un objeto visible en las gafas, asustarse con ciertos acontecimientos, y otros efectos físicos como desmayos.

En el programa “UNAL en la Región”, se introdujo a los estudiantes a la realidad virtual a través de dos proyectos: “Zombies UNAL”, que presenta un entorno post-apocalíptico con baja iluminación y sonidos fuertes, y un simulador de la Estación Espacial Internacional (EEI), que permite recorrer el entorno y realizar misiones específicas.

Ambos proyectos produjeron una variación en las reacciones y comportamientos de los estudiantes. En “Zombies UNAL”, a pesar de ser un demo con elementos fantásticos, la experiencia era tan convincente que desencadenó respuestas emocionales intensas, como gritos de sorpresa y terror, y algunos participantes intentaron escapar físicamente de los zombies virtuales. Esta respuesta demuestra la capacidad de los entornos virtuales para influir profundamente en la mente humana.

Además de las reacciones emocionales, algunos estudiantes experimentaron efectos secundarios físicos al quitarse las gafas de realidad virtual, como mareo y confusión, debido a la adaptación de sus sentidos al mundo virtual y la transición de regreso a la realidad física.

La interacción entre el mundo real y el virtual puede aumentar los niveles de atención y activar neuroconectores como la dopamina en el cerebro, mediante la presencia de avatares, superposición de imágenes 2D y 3D. Esto ayuda a desarrollar competencias que superan las metodologías didácticas tradicionales, al estimular al usuario a construir modelos mentales [23].

Para los estudiantes y profesionales con experiencia previa en realidades extendidas, la utilización de estos dispositivos resulta más natural y no presentan efectos físicos adversos. No exhiben comportamientos como correr o actuar descontroladamente, y, en cambio, notan detalles como la virtualización de los diseños, texturas, y la separación entre la realidad y el mundo inmersivo.

Se observó que tanto el grupo experimentado como el no experimentado mostraron una mejora en su concentración y atención en el entorno presentado por las gafas, resolviendo problemas y tomando decisiones de manera más eficiente, y recordando claramente el escenario al regresar a la realidad.

Los procesos emocionales son cruciales para la percepción, el aprendizaje, los juicios, la toma de decisiones, y las interacciones sociales [16]. Los elementos relacionados con el miedo en la realidad virtual pueden activar la red del temor en el cerebro, mejorando el despertar emocional y haciendo el entorno más interesante y atractivo para la atención [24].

Los estados afectivos, como ira, tristeza, miedo y alegría, alteran la actividad cerebral y están conectados a interacciones neurofisiológicas entre procesos cognitivos corticales y sistemas subcorticales de valencia y emoción [25,26,27]. Datos de neuroimagen subrayan la importancia de regiones cerebrales

relacionadas con el afecto, como la corteza orbitofrontal, la corteza prefrontal dorsolateral, el cíngulo, el hipocampo, la ínsula, las regiones temporales y las amígdalas, en la formación de emociones [28,29,30].

**Figura 4.** Diagrama del proceso emocional [31].



Todas estas emociones conducen al afrontamiento de la situación en la que se encuentran los usuarios, permitiéndoles enfrentarla de manera asertiva y encontrar la solución más adecuada. Considerando esto, se determinó que la utilización de realidades extendidas podría ser una herramienta efectiva para la enseñanza y el aprendizaje en diversos temas. En este caso, se planteó la creación de una línea de tiempo que incluyera el recorrido histórico de los aviones militares en Colombia desde sus inicios. Este proyecto destacaría información relevante como los años de duración, variaciones respecto a otros tipos de transporte aéreo y eficiencia. Se decidió utilizar realidad aumentada (AR) en lugar de un entorno completamente inmersivo, superponiendo elementos digitales en el mundo real.

La interacción del estudiante con los contenidos en realidad aumentada permite construir conocimientos y desarrollar competencias y capacidades a través de la estimulación de los sistemas sensoriales. Los aprendizajes significativos resultan de la activación de emociones y procesos cognitivos en los estudiantes, quienes se convierten en agentes activos de su propio aprendizaje, desarrollando competencias disciplinares, genéricas, digitales y emocionales [32].

En los últimos años, la tecnología AR ha ganado relevancia en áreas como las matemáticas y las ciencias, ya que mejora la actividad de los estudiantes y facilita un entorno de aprendizaje más individualizado. La combinación de objetos virtuales y reales, con interacción en tiempo real y objetos 3D, proporciona una experiencia de aprendizaje enriquecedora que crea un sentido de realidad [33].

Instituciones prestigiosas como el Massachusetts Institute of Technology (MIT) y Harvard están desarrollando aplicaciones de realidad aumentada en formato de juegos. Estos juegos buscan involucrar a los estudiantes de educación secundaria en situaciones que combinan experiencias del mundo real con información adicional presentada en dispositivos móviles [34].

Las ventajas de la realidad aumentada incluyen la ausencia de mareos y comportamientos drásticos, ya que los usuarios mantienen contacto con el espacio físico en el que se encuentran. Esto permite un control más consciente de las acciones y una atención más enfocada en la tarea en cuestión.

Desde una perspectiva psicológica, la realidad aumentada favorece el desarrollo de habilidades cognitivas, espaciales, perceptivo-motoras y temporales en estudiantes, sin importar su edad o nivel académico. Refuerza la atención, concentración, memoria inmediata (corto plazo) y memoria mediata (largo plazo) en sus formas visuales y auditivas, así como el razonamiento. Facilita la confirmación, refutación o ampliación del conocimiento, genera nuevas ideas y opiniones sobre el mundo, fomenta la reflexión y la formación de actitudes críticas. Además, proporciona un entorno de comunicación eficaz, reduce la incertidumbre sobre los objetos de estudio, y aumenta la actitud positiva y la motivación hacia el aprendizaje, reforzando capacidades y competencias como la independencia, iniciativa y auto-actividad [35].

#### **4. Discusión**

Los diferentes resultados obtenidos muestran claramente que el cerebro humano responde a los estímulos generados por las realidades extendidas. En particular, se observa una mayor cantidad de estímulos durante las experiencias con realidad virtual. Pero ¿qué significa la aparición de esos estímulos y cómo afectan a la psicología conductual?

Los seres humanos responden a ciertos cambios en el ambiente de manera hormonal. Por lo tanto, es fundamental analizar el comportamiento generado por una experiencia considerando las reacciones del receptor y su sensibilidad a dichos factores. En los resultados, se evidencia que las experiencias con realidades extendidas, especialmente la realidad virtual, provocan reacciones en el organismo humano. No se trata únicamente de estímulos visuales, sino también de combinaciones de factores visuales y auditivos que pueden generar una percepción distinta del espacio.

En cuanto a los patrones, se encuentra que las respuestas son mucho más intensas en quienes nunca han tenido experiencia con XR. Además, se detecta una mayor expresión en las personas de menor edad, es decir, los niños de noveno grado de zonas rurales mostraron reacciones más pronunciadas. Sin embargo, el impacto generado no se limita a esta muestra. Las personas tienen comportamientos diversos debido al entorno en el que crecieron y las experiencias vividas, lo que dificulta la agrupación y la identificación de patrones. Aunque se pueden encontrar factores comunes, se necesita un análisis psicológico más estricto para confirmar la existencia de patrones profundos entre las personas. No obstante, se demostró que, aunque algunas reacciones sean menos intensas, existen.

En contraste con los resultados de la primera fase, las personas con experiencia en el desarrollo de proyectos en realidades extendidas tienen una vivencia diferente. Estas personas tienden a centrarse en los detalles menores y son más conscientes de su entorno virtual. Esto se debe a la exposición constante a un estímulo; es decir, cuando se está expuesto durante mucho tiempo a un factor, el cuerpo se adapta, y la sorpresa disminuye porque el estímulo se vuelve familiar.

Además, a diferencia de la población de la primera fase, estas personas utilizan otros sentidos para ser conscientes del espacio. En la experiencia de realidad virtual de la estación espacial, aunque en la primera fase las personas se emocionaron y expresaron su entusiasmo con un tono alto de voz, la población de la fase dos no exteriorizó su reacción de la misma manera. Sin embargo, manifestaron sentirse cautivados por el entorno virtual mostrado en el visor.

Aunque no se pudo realizar un estudio con implementos para el análisis de respuestas hormonales, se utilizó una metodología de deducción para encontrar una relación entre los comportamientos presentados y las hormonas que podrían estar presentes, así como su cantidad en comparación con otras. Esto se hizo a través de la observación de cómo la población exterioriza sus respuestas.

Se identifican dos comportamientos relacionados con hormonas específicas: una conducta de emoción o alegría, asociada a la dopamina, y un temor o estrés, relacionado con el cortisol (este último generalmente provocado por la experiencia de Zombies UNAL). Como se mencionó anteriormente, las reacciones más intensas se observan en la población de la primera fase, que no había tenido contacto previo, lo que indica niveles elevados de estas hormonas. Aunque la reacción pueda ser más fuerte, el objetivo es que las realidades extendidas mejoren la salud mental. Por lo tanto, no es beneficioso tener una alta concentración de hormonas, ya que estos niveles elevados pueden ser perjudiciales a largo plazo. En psicología, se recomienda controlar el entorno para que la población de la fase uno experimente un entorno virtual más conocido y no tan innovador, evitando así asociar la experiencia

de realidad virtual únicamente con emociones positivas. Un estímulo nuevo puede desencadenar miedo debido a su carácter repentino. Por otro lado, la segunda fase no presentó niveles tan altos de dopamina o cortisol; sus respuestas fueron más controladas.

Adicionalmente, durante las entrevistas con la población de la segunda fase, se mencionó que, cuando experimentaban sentimientos de tristeza o estrés intenso, recurrían a la realidad virtual para visualizar entornos que les proporcionaran calma, como entornos naturales. Otros preferían utilizar videojuegos o experiencias interactivas para distraerse de las situaciones que habían causado ese estrés.

Respondiendo a la pregunta inicial: ¿cómo puede influir el uso de las experiencias de realidades extendidas en la industria aeroespacial?

Las misiones en la industria aeroespacial están profundamente influenciadas por la salud del personal, tanto física como mental. Por lo tanto, con los resultados obtenidos, ¿se podría plantear un proyecto para mejorar las condiciones de quienes trabajan en la industria espacial? Los resultados indican que las realidades extendidas tienen un impacto en la psicología conductual y en la salud mental, lo que sugiere que esta tecnología podría tener aplicaciones futuras en este campo. No obstante, al escalar estos resultados a la magnitud de la industria, es evidente que se deben considerar diversas limitaciones existentes.

El objetivo del proyecto es evaluar la viabilidad de implementar esta tecnología en la industria aeroespacial, específicamente para quienes deben salir de la biosfera terrestre, es decir, los astronautas. Sin embargo, los resultados muestran que las experiencias son diferentes para cada persona y que, además de las variables inicialmente planteadas, se debe considerar el perfil psicológico, que es un conjunto de variables complejas y no un dato simple. Por lo tanto, es necesario realizar un proyecto específico para desarrollar una solución enfocada únicamente en la industria aeroespacial.

Finalmente, antes de aplicar los resultados a un campo específico de la industria, es necesario estudiar detenidamente esa población. Las necesidades psicológicas varían entre las personas, y se debe crear un entorno compatible con lo estudiado para la población. Un estímulo incorrecto podría tener efectos negativos y contrarios a los deseados.

## **5. Conclusiones**

Las realidades extendidas son herramientas que, a largo plazo, mejorarán el aprendizaje individual y colectivo no solo en los estudiantes, sino también

en usuarios que trabajen en campos donde la capacitación y el desarrollo de prácticas son esenciales para un desempeño eficaz en tareas que, de manera presencial, serían riesgosas o costosas.

Los simuladores, el desarrollo de componentes digitales y los escenarios virtuales permiten una activación cerebral óptima en la toma de decisiones y en la adaptabilidad a escenarios peligrosos o eventos catastróficos. Esto implica que quienes los utilicen podrán responder de manera adecuada a las situaciones que se presenten en la realidad. Para las personas en el área aeroespacial, ya sea como técnicos, pilotos, astronautas o mecánicos, será posible evitar realizar acciones riesgosas y establecer un entorno de trabajo más seguro y con un enfoque más claro.

El valor de estas tecnologías es especialmente evidente en la industria aeroespacial, donde incluso las pequeñas decisiones pueden tener consecuencias a largo plazo. Al permitir que los profesionales de este sector practiquen y se preparen en entornos virtuales altamente realistas, las realidades extendidas no solo mejoran la seguridad, sino que también enriquecen la comprensión y el juicio de quienes las utilizan, proporcionándoles mayor preparación y agilidad en la reacción a diversas circunstancias y preparándolos para cualquier situación que pueda surgir.

La aplicación de las realidades extendidas en el ámbito educativo va más allá de ofrecer herramientas de formación eficaces; también representa una oportunidad para cultivar el interés en temas relacionados con la tecnología aeroespacial. La utilización de la realidad aumentada afianza los conocimientos y enriquece el desarrollo cognitivo, el conocimiento y el razonamiento de quienes la utilizan.

Esto permite que los usuarios exploren elementos virtuales combinados con la realidad, investigando dispositivos y equipos aeroespaciales para comprender en detalle su funcionamiento y su historia. Estas experiencias inmersivas facilitan un proceso de aprendizaje más práctico e interactivo.

Sin embargo, el impacto va más allá de la adquisición de conocimientos técnicos. Al utilizar las realidades extendidas en la educación, se brinda al personal la oportunidad de apreciar la importancia de la tecnología aeroespacial en un contexto más amplio de la sociedad y la economía, impulsando la innovación, la conectividad global y el progreso científico.

Es importante aclarar que el presente artículo busca responder a la pregunta: ¿Cómo puede influir el uso de las experiencias de realidades extendidas en la industria aeroespacial? Más que plantear un desarrollo enfocado exclusivamente en lo aeroespacial, la información registrada aquí forma parte de un estudio destinado a observar la viabilidad de un proyecto con un enfoque psicológico dirigido a la aeronáutica y aeroespacial.

## 6. Referencias

1. Doolani, S., Wessels, C., Kanal, V., Sevastopoulos, C., Jaiswal, A., Nambiappan, H. y Makedon, F. (2020). Una revisión de las tecnologías de realidad extendida (XR) para la capacitación en fabricación. *Tecnologías*, 8(4), 77. MDPI AG. Extraído de <http://dx.doi.org/10.3390/technologies8040077>
2. Díaz Sabán, M. L. (2022). Medios inmersivos como experiencias corporizadas. De la creación de metaversos, y otras realidades extendidas, desde el cuerpo y su movimiento.
3. Basogain, X., Olabe, M., Espinosa, K., Rouèche, C. y Olabe, J. (2007). *Realidad aumentada en la educación: una tecnología emergente*. Madrid: Onli-ne Educa Madrid.
4. Rodríguez Juárez, R. (2004). Interactividad en un entorno virtual inteligente: Manejo de dispositivos de realidad virtual y gestión de interacciones.
5. Hurtado, J. S. (2021, November 10). ¿Qué es la Realidad Extendida? ¿Es lo mismo que Realidad Aumentada? Thinking for Innovation. <https://www.iebschool.com/blog/realidad-extendida-virtual-aumentada-mixta-tecnologia/>
6. Y. SHAPTUNOVA, "What Is Extended Reality and What Can We Do with It?", SaM Solutions, 2019.
7. Dantas, J. P. A. (2022, June 23). ASA: a simulation environment for evaluating military operational scenarios. [arXiv.org. https://arxiv.org/abs/2207.12084](https://arxiv.org/abs/2207.12084)
8. <https://www.agi.com/>
9. Item 1009/304 | Repositorio INAOE. (2017a, February 10). <https://inaoe.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1009/304>
10. <http://orbit.medphys.ucl.ac.uk/>
11. J. Pirker, "The Potential of Virtual Reality for Aerospace Applications," 2022 IEEE Aerospace Conference (AERO), Big Sky, MT, USA, 2022, pp. 1-8, doi: 10.1109/AERO53065.2022.9843324
12. Pradhan, P., Rostami, M., Kamoopuri, J., & Chung, J. (2023). The state of Augmented Reality in aerospace navigation and engineering. *IntechOpen*. doi: 10.5772/intechopen.1002358
13. Investigaciones de la Estación: Una nueva demostración de la realidad aumentada | Ciencia de la NASA. (n.d.). <https://ciencia.nasa.gov/investigaciones-de-la-estaci%C3%B3n-una-nueva-demostraci%C3%B3n-de-la-realidad-aumentad>

14. Univision. (n.d.). 5 consecuencias de los viajes espaciales sobre la psicología de los astronautas. Univision. <https://www.univision.com/explora/5-consecuencias-de-los-viajes-espaciales-sobre-la-psicologia-de-los-astronautas>
15. Movie Vertigo. (2020, April 7). Mission ISS : AVR Space Station simulation! [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=lKGlyocViCg>
16. González, G. (2021). Método inductivo. Lifeder. <https://www.lifeder.com/metodo-inductivo/>
17. J, P. P., & Gardey, A. (2022). Vivencia - Qué es, definición y concepto. Definición.de. <https://definicion.de/vivencia/>
18. Rodríguez, V. (2022). Patrones de conducta: qué son, cómo se originan, tipos y ejemplos de patrones de comportamiento en psicología. Cinco Noticias. <https://www.cinconoticias.com/patrones-de-conducta/>
19. “UNAL en la Región”: el objetivo de crear ecosistemas que promuevan la innovación. (n.d.). <https://agenciadenoticias.unal.edu.co/detalle/unal-en-la-region-el-objetivo-de-crear-ecosistemas-que-promuevan-la-innovacion>
20. Mars, K. (2022). 60 Years Ago: Scott Carpenter Orbits the Earth aboard Aurora 7. NASA. <https://www.nasa.gov/feature/60-years-ago-scott-carpenter-orbits-the-earth-aboard-aurora-7>
21. Parsons, T. D., Gaggioli, A., & Riva, G. (2020). Extended Reality for the Clinical, Affective, and Social Neurosciences. *Brain Sciences*, 10(12), 922. MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/brainsci10120922>
22. Riva, G.; Wiederhold, B.K.; Mantovani, F. Neuroscience of Virtual Reality: From Virtual Exposure to Embodied Medicine. *Cyberpsychol. Behav. Soc. Netw.* 2019, 22, 82–96.
23. Fernández García, C. E. (2017). Neuroeducación en entornos de realidad aumentada. *Temática Psicológica*, 13(1), 43–50. <https://doi.org/10.33539/tematpsicol.2017.v13n1.1305>
24. Diemer, J.; Alpers, G.W.; Peperkorn, H.M.; Shiban, Y.; Muhlberger, A. The impact of perception and presence on emotional reactions: A review of research in virtual reality. *Front. Psychol.* 2015, 6, 26.
25. Lane, R.D.; Reiman, E.M.; Ahern, G.L.; Schwartz, G.E.; Davidson, R.J. Neuroanatomical correlates of happiness, sadness, and disgust. *Am. J. Psychiatry* 1997, 154, 926–933.
26. Damasio, A.R.; Grabowski, T.J.; Bechara, A.; Damasio, H.; Ponto, L.L.; Parvizi, J.; Hichwa, R.D. Subcortical and cortical brain activity during the feeling of self-generated emotions. *Nat. Neurosci.* 2000, 3, 1049–1056.
27. Posner, J.; Russell, J.A.; Peterson, B.S. The circumplex model of affect: An integrative approach to affective neuroscience, cognitive development, and psychopathology. *Dev. Psychopathol.* 2005, 17, 715–734.

28. Barbas, H. Flow of information for emotions through temporal and orbitofrontal pathways. *J. Anat.* 2007, 211, 237–249.
29. Raichle, M.E.; MacLeod, A.M.; Snyder, A.Z.; Powers, W.J.; Gusnard, D.A.; Shulman, G.L. A default mode of brain function. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 2001, 98, 676–682.
30. Greicius, M.D.; Krasnow, B.; Reiss, A.L.; Menon, V. Functional connectivity in the resting brain: A network analysis of the default mode hypothesis. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 2003, 100, 253–258.
31. Caballero, A. (n.d.). Las Emociones. Psicología positiva III. <http://psicologiaconalfonso.com/emociones-psicologia-positiva-ii/>
32. Tecnología educativa. Diseño y utilización de medios en la enseñanza. Paidós, España.
33. Arici, F., Yildirim, P., Caliklar, S., & Yilmaz, R. (2019). Research trends in the use of augmented reality in science education: Content and bibliometric mapping analysis. *Computers & Education*, 142, 103647. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2019.103647>
34. MIT Handheld Augmented Reality Simulations <http://education.mit.edu/ar/>
35. Cózar, R., del Moya, M., Hernández, J.A., & Hernández, J.R. (2015). Tecnologías emergentes para la enseñanza de las ciencias sociales. Una experiencia con el uso de realidad aumentada en la formación inicial de maestros. *Digital Education Review*, 27, 138-153. Recuperado de <http://revistes.ub.edu/index.php/der/article/viewFile/11622/pdf>





CAPÍTULO

8

## MODELO DE GESTIÓN DEL APRENDIZAJE PARA LA INNOVACIÓN: EL CASO DE CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES DE INGENIERÍA EN EL LABORATORIO DE RDAI-GRUPOS RDAI Y TPRM-E.I.MAT-UNIVALLE

**Juan Arturo Ortega-Gómez Dr. Ing.**  
Profesor Asistente Escuela de Ingeniería Industrial-EII  
Orcid: 0000-0003-0035-6130  
/ Grupo de investigación TPRM y GIT  
Universidad del Valle, Cali- Colombia

**Julio César Caicedo-Angulo Dr. Ing.**  
Profesor Asistente Escuela de Ingeniería de Materiales- EIMAT  
Orcid: 0000-0001-6914-2734  
/ Director Grupo de investigación TPRM  
Universidad del Valle, Cali- Colombia

**Christian Ortiz-Ortiz Dr. (C)**  
Profesor Asistente Escuela de Ingeniería de Materiales - EIMAT  
Orcid: 0000-0001-9800-2482  
/ Grupo de investigación TPRM  
Universidad del Valle, Cali- Colombia

**María del Pilar Rodríguez-Sánchez Mg.**  
Coach certificada. Profesora Asistente Facultad de Administración de Empresas  
Orcid: 0009-0009-5507-1416  
/ Universidad Autónoma de Occidente, Cali- Colombia.

**Resumen.** Objetivo: La investigación propone un modelo conceptual de Gestión del Aprendizaje para la Innovación en las organizaciones, basado en la capacidad de absorción y en los mecanismos de aprendizaje seleccionados: interacción, intermediación, e Investigación y Desarrollo (I+D). Metodología: Se revisa la literatura sobre antecedentes y estudios empíricos relacionados con la capacidad de absorción tecnológica y el diagnóstico de tendencias mediante el mapeo de rutas tecnológicas (Technology RoadMapping - TRM). Se propone un modelo para la sistematización del proceso de innovación, realizando un análisis cualitativo del caso de estudio del Laboratorio de Recubrimientos Duros y Aplicaciones Industriales (LRDAI-UNIVALLE) y los grupos RDAI y TPRM, y su relación con empresas vallecaucanas metalmecánicas para validar el modelo propuesto. Resultados: El modelo propuesto consta de tres etapas: 1) Iniciación por Interacción; 2) Imitación por Intermediación y Transferencia de Tecnología; y 3) Innovación por Investigación y Desarrollo (I+D).

**Palabras claves:** modelo de innovación; gestión del aprendizaje, mapeo de rutas tecnológicas.

**Abstract.** Objective: The research proposes a conceptual model of Learning Management for Innovation in organizations, based on the absorption capacity and the learning mechanisms chosen by interaction, by intermediation, and by Research and Development - R&D. Methodology: the literature on background and empirical studies related to technological absorption capacity is reviewed, and the diagnosis of trends through the mapping of technological routes (Technology RoadMapping - TRM), and a model is proposed for the systematization of the innovation process. and a qualitative analysis is used to explain the evolution in the case study of the Hard Coatings and Industrial Applications Laboratory - LRDAI-UNIVALLE and the RDAI and TPRM groups and their relationship with Valle del Cauca metal-mechanical companies to validate the proposed model. Results: the model consists of three stages: 1) Initiation by Interaction (interacting); 2) Imitation through intermediation and Technology Transfer (transfer of technology); and 3) Innovation through Research and Development (Research & Development).

**Keywords:** innovation model; Learning management, technology road mapping.

## 1. Introducción

Las teorías y estudios recientes sobre el desarrollo económico destacan el papel crucial de la capacidad de innovación como motor del crecimiento y el bienestar económico de las naciones. El estudio de la innovación y su contribución al desarrollo económico y al bienestar ha recibido importantes aportaciones teóricas de investigadores pioneros en las ciencias económicas y administrativas, y en menor medida, en las ingenierías (Becheik et al., 2006). Desde estas disciplinas, la innovación ha sido tratada predominantemente como un resultado. Por esta razón, se ha comenzado a reconocer la necesidad de estudiar la innovación como un proceso de aprendizaje acumulativo, en el que las empresas y los grupos de investigación universitarios puedan participar proactivamente a partir de sus propias decisiones (Ortega-Gómez, 2018).

La estructura de la presente ponencia es la siguiente: tras esta breve introducción, se comentarán los aportes encontrados en la literatura relacionada con las teorías de la innovación, y particularmente, los antecedentes hallados en los estudios empíricos sobre capacidad de absorción y esfuerzo en innovación. A continuación, se propondrá un modelo conceptual sobre el proceso de innovación, resultado de un proyecto de investigación doctoral de uno de los autores (Ortega Juan A., 2019: Programa de Doctorado en Diseño, Fabricación y Gestión de Proyectos Industriales de la Universidad Politécnica de Valencia). Este modelo servirá como guía para el análisis del proceso y las etapas de aprendizaje en la evolución del caso de estudio relacionado con los grupos de investigación en Recubrimientos Duros y Aplicaciones Industriales (RDAI) y Tribología, Polímeros, Pulvimetalurgia, y Transformación de Residuos Sólidos (TPRM) de la Escuela de Materiales de Ingeniería (EIMAT) de la Universidad del Valle en Cali, Colombia.

## 2. Metodología

A partir de la revisión de los modelos conceptuales sobre el proceso de innovación (Rothwell, 1994) disponibles en la literatura, la investigación se propone responder a la siguiente pregunta:

- ¿Cuáles mecanismos de generación de conocimiento y transferencia de tecnología elegir para solucionar las necesidades de aprendizaje en el proceso de innovación?

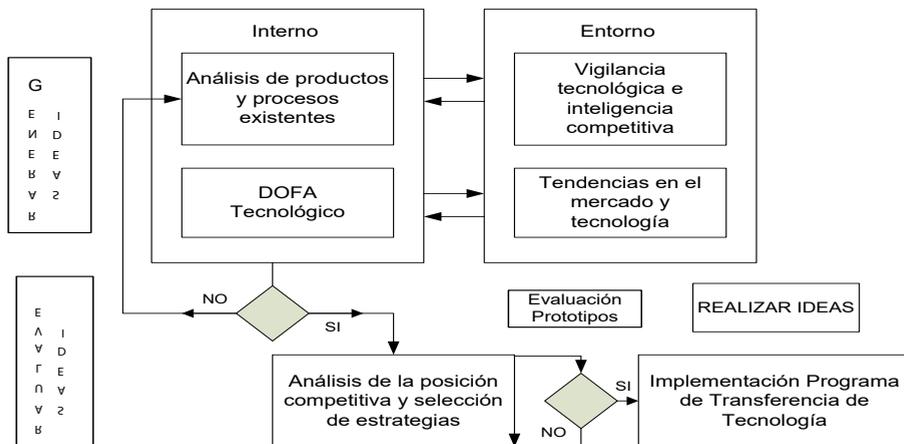
En la gestión de la innovación, se deben tomar muchas decisiones que afectan la posición estratégica de la organización, en particular en relación con sus diferentes líneas de productos, o en el caso de los grupos de investigación

universitarios, sobre la selección de las líneas de investigación. De acuerdo con algunos autores (Beneito, 2003), el proceso de innovación consiste en una secuencia compleja de decisiones acerca de en qué innovar y en elegir la estrategia y mecanismos para obtener el conocimiento tecnológico necesario, lo cual depende en gran medida de la capacidad de absorción previa de la propia organización (Cohen y Levinthal, 1990).

Para elaborar un modelo conceptual del proceso de innovación, se deben considerar los factores internos y externos que influyen directamente o moderan la capacidad de absorción y el esfuerzo en innovación, así como seleccionar las variables e indicadores para su operacionalización y evaluación (Vega-Jurado et al., 2008).

A continuación, se presentan y analizan los factores determinantes del esfuerzo en innovación en el contexto del proceso de gestión de la innovación, que se muestra en la Figura 1 y consta de tres etapas: primera, generar ideas de innovación; segunda, evaluar ideas de innovación con ayuda de los principales factores determinantes; y tercera, realizar ideas y evaluar el desempeño innovador. Estas etapas son comunes en todo proyecto de innovación de productos y procesos.

**Figura 1.** Modelo del proceso de gestión de la innovación tecnológica



Fuente: Ortega-Gomez J.A. (2018), p.40.

En la primera etapa para generar ideas de innovación (proyectos de innovación tecnológica, ya sean productos o procesos), las empresas se apoyan en el conocimiento previo o capacidad de absorción (Cohen y Levinthal, 1990). Esta capacidad les permite realizar un análisis interno de sus productos y procesos existentes, así como identificar y valorar el conocimiento de fuentes externas, como la vigilancia tecnológica y la capacidad de absorción potencial, y las cadenas tecnológicas sectoriales (Ortega Juan A., 2007). De este modo, pueden

detectar los cambios tecnológicos y las tendencias del mercado (inteligencia competitiva) y buscar proactivamente nuevas oportunidades para explotarlo (Cohen y Levinthal, 1990; Zahra y George, 2002). En el mejor de los casos, esto requiere la existencia de un departamento de investigación y desarrollo (I+D) dentro de la organización, con el propósito de liderar y gestionar el proceso de innovación.

Actualmente, la literatura sostiene que un área interna de I+D es un determinante crucial de la innovación, ya que desempeña un papel variado: ayuda a la empresa a crear, explotar y transformar el nuevo conocimiento en nuevos productos y procesos (Graves y Langowitz, 1996; Stock et al., 2001; Keitzer et al., 2002; Landry et al., 2002; Li y Simerly, 2002; Stenberg y Arndt, 2001). También facilita la absorción (adquisición, asimilación, transformación y explotación) de nuevas tecnologías que aparecen en el mercado (Cohen y Levinthal, 1990; Debackere et al., 1996; Zahra y George, 2002; Vega-Jurado et al., 2008), y coordina y lidera el proceso de innovación para atraer colaboración con socios clave (Hall y Bagchi-Sen, 2002; Pisano et al., 1988; Rodríguez-Sánchez M.P., 2022).

En resumen, el departamento de I+D debe desarrollar mecanismos de monitoreo y vigilancia tecnológica, así como inteligencia de mercados, que proporcionen la información necesaria para realizar un diagnóstico tecnológico. En el contexto de la gestión de la cartera de proyectos tecnológicos, esto apoya la toma de decisiones sobre los siguientes aspectos:

- Evaluar la oferta y el potencial empleo de tecnologías emergentes en el mercado que tengan un alto grado de sinergia con la base de recursos tecnológicos y de producción de la empresa.
- Identificar las necesidades de fortalecer las competencias internas con respecto a la competencia (brecha tecnológica) y, en consecuencia, contratar talento humano con formación superior y técnicos especialistas, así como mejorar o crear infraestructuras propias en laboratorios de pruebas y ensayos. Esto implica analizar la capacidad de absorción para tomar decisiones estratégicas sobre la ejecución de proyectos de innovación, ya sea mediante esfuerzos propios de I+D o la compra de servicios de I+D externa, asistencia técnica, consultoría, ingeniería y diseño industrial, o mediante contratos de licencias para la transferencia de tecnología (know-how) de fuentes externas.
- Identificar fuentes externas de conocimiento y establecer relaciones de colaboración para el desarrollo de proyectos, tanto con agentes industriales (clientes, proveedores y competencia) como con entidades institucionales no industriales o científicas (centros tecnológicos privados, grupos universitarios de investigación, organismos públicos de investigación).

- Utilizar consultoría externa y otros servicios tecnológicos necesarios para fortalecer el liderazgo en el proceso de innovación, así como gestionar el presupuesto y financiación dedicada a I+D.

Estos aspectos podrían considerarse factores directos o condicionantes del proceso de innovación y, por lo tanto, podrían constituirse en criterios para la evaluación ex ante de las ideas y perfiles de proyectos de innovación de productos y procesos tecnológicos.

La evaluación de estas ideas de innovación constituye el propósito de la segunda etapa: evaluar ideas de innovación. En general, y de acuerdo con las técnicas de evaluación de proyectos de innovación, es conveniente para los directivos de la organización adoptar un enfoque integral y multicriterio, considerando aspectos estratégicos, tecnológicos y económicos.

Al evaluar los perfiles de los proyectos con las ideas de innovación, es importante que estos proyectos respondan a los objetivos estratégicos de la empresa y apoyen las estrategias corporativas. Por lo tanto, es natural que formen parte de los planes estratégicos de desarrollo, y en particular, del plan tecnológico y de innovación (Cooper, 1984).

En este último plan, se deben plasmar decisiones estratégicas sobre el desarrollo de las capacidades tecnológicas propias. Al considerar las oportunidades tecnológicas y las complejidades sectoriales, la capacidad de absorción podría servir como base para la creación, posicionamiento y sostenibilidad de una ventaja competitiva para la empresa (Zahra y George, 2002). Esto se relaciona con la selección de una estrategia tecnológica que mejore el desempeño innovador de la empresa (Cooper, 1984), para alcanzar una posición competitiva deseada de líder-innovador o imitador-seguidor.

En cuanto a la estrategia competitiva o posición deseada en el mercado para una unidad estratégica de negocio (es decir, una línea de productos) y cómo lograrla, la literatura sobre gestión empresarial propone, entre otras, dos estrategias competitivas genéricas: liderazgo en diferenciación y liderazgo en costos (Porter, 1990).

De acuerdo con un análisis sistemático de la literatura sobre los determinantes de la innovación (Becheikh et al., 2006), la estrategia de diferenciación está positivamente correlacionada con la innovación de productos (Beneito, 2003; Debackere et al., 1996; Galende y De la Fuente, 2003; Zahra, 1993). Esto supone para la organización una decisión consciente y deliberada de realizar productos innovadores, respaldada por el compromiso del alto nivel directivo



en el direccionamiento estratégico y tecnológico de la empresa. Esto se puede reflejar en la existencia de un plan o cartera de proyectos de innovación tecnológica, tanto en sectores de alto nivel tecnológico o basados en la ciencia (Pavitt, 1984), como en sectores tradicionales de media y baja complejidad tecnológica (Hervás-Oliver et al., 2011).

Para completar el análisis del contexto del proceso de innovación, la capacidad de absorción no solo se refiere a la adquisición y asimilación del conocimiento (capacidad de absorción potencial), sino también a la habilidad de transformarlo y explotarlo para convertir ideas en prototipos de productos y procesos, lo cual está relacionado con la capacidad de absorción realizada (Zahra y George, 2002). Por lo tanto, la capacidad de absorción en una organización no solo depende de las relaciones directas para obtener la transferencia de tecnologías provenientes de agentes externos, sino también de la implementación de programas de transferencia de tecnología entre sus propias subunidades internas (Cohen y Levinthal, 1990). En este contexto, para entender las fuentes de la capacidad de absorción, es necesario focalizarse tanto en las estructuras de cooperación entre los agentes externos y la organización como en la distribución de experticia y comunicación entre las subunidades internas (Cohen y Levinthal, 1990; Zahra y George, 2002; Vega-Jurado et al., 2008; Hervás-Oliver et al., 2011), con el propósito de comprender el proceso mediante el cual se asimilan y aplican los nuevos conocimientos. Esto se puede considerar como la gestión del proceso de innovación como un proceso de aprendizaje, el cual se desarrollará en el siguiente apartado.

## **La innovación como un proceso de aprendizaje**

Varios investigadores han señalado que el concepto de aprendizaje, aplicado en el modelo interactivo de la teoría moderna del cambio tecnológico, se refiere a la capacidad tecnológica y de innovación de las empresas. Esta capacidad se obtiene mediante un proceso de acumulación de formación, organización y experiencias (Freeman, 1987; Dosi et al., 1988; Cohen y Levinthal, 1989, 1990; Rothwell, 1994; Nonaka y Takeuchi, 1995; Zahra y George, 2002), así como en la habilidad de establecer relaciones con el entorno, particularmente con el sistema nacional y regional de innovación (Freeman, 1987; Nelson y Winter, 1992; Lundvall, 1993; Koschatzky, 2002; Buesa et al., 2002).

A diferencia del enfoque antiguo, donde los economistas neoclásicos consideraban la tecnología como un factor exógeno y asimilaban la información externa como fácilmente reproducible (Salter, 1966), los neoshumpeterianos evolucionistas reconocen que la innovación es un proceso de aprendizaje continuo en el cual las empresas deben invertir proactivamente. Los estudios

empíricos para la industria inglesa indican que aproximadamente tres cuartas partes de los gastos en I+D industrial se destinan al desarrollo, y una cantidad equivalente se invierte en pruebas y puesta en marcha de la manufactura (Pavitt, 1984).

En nuestra investigación, hemos considerado que el aprendizaje en los procesos de innovación se obtiene como un subproducto o resultado de la actividad empresarial, que podríamos denominar gestión de la tecnología e innovación. Proponemos definirla como el conjunto de funciones y responsabilidades de la dirección general relacionadas con la adquisición, adopción y generación de conocimientos científicos y empíricos necesarios para la innovación de productos y procesos, orientados a satisfacer necesidades y oportunidades del mercado, tanto local como internacional. Las innovaciones se realizan a través de proyectos agrupados en una cartera de proyectos estratégicos o un plan de innovación, lo cual implica direccionamiento estratégico, talento humano capacitado y una organización y sistematización de las actividades de investigación y desarrollo.

En el trabajo seminal de Keith Pavitt (1984), que describe y explica los patrones sectoriales del cambio técnico, se fundamenta en la premisa de que la mayoría del conocimiento tecnológico disponible en el entorno no se convierte en información generalmente aplicable y fácilmente reproducible para las necesidades específicas de conocimiento requeridas por una empresa en sus esfuerzos de innovación. Además, muchas empresas no disponen de información completa sobre técnicas alternativas (Rosenberg, 1976). Pavitt (1984, p. 348) concluye que la presunción de que la mayoría del conocimiento tecnológico está o podría estar públicamente disponible para su aplicación tiene poco fundamento en la realidad.

Pavitt (1984) asume la firma innovadora como la unidad básica de análisis y sugiere que los modelos de aprendizaje en la innovación son acumulativos, y que las trayectorias tecnológicas de las empresas están altamente determinadas por sus actividades pasadas. En este sentido, propone agrupar los sectores industriales de acuerdo con las fuentes de tecnología utilizadas, los requerimientos de los usuarios y las posibilidades de apropiación de los beneficios resultantes de las inversiones tecnológicas. Se identifican cuatro categorías generales: empresas dominadas por proveedores; empresas de producción intensiva en escala; empresas consideradas como proveedores especializados de otras empresas manufactureras; y empresas basadas en la ciencia.

Siguiendo a Pavitt (1984), debemos considerar dos evidencias para analizar los procesos de innovación en los sectores manufactureros, en cuanto al tipo de conocimiento requerido en determinadas actividades industriales: primero, la mayoría del conocimiento aplicado por las empresas en sus innovaciones no es de carácter general, fácilmente transmitido y reproducido, sino específico para aplicaciones particulares. Segundo, hay una variedad en los sectores o actividades

industriales respecto a la complejidad tecnológica, fuentes de tecnologías de procesos, tamaño y patrones de diversificación tecnológica de las firmas innovadoras. En algunos sectores, el cambio técnico proviene principalmente de los proveedores de equipos, mientras que en otros, las empresas participan más activamente en el desarrollo de tecnologías de proceso.

En este segundo aspecto, Cohen y Levinthal (1990, p. 140) indican que la complejidad tecnológica de un sector y la facilidad (o dificultad) de aprendizaje están determinadas por las características del conocimiento científico y tecnológico subyacente, lo que podría dificultar su valoración a priori, especialmente si el talento humano de la empresa no está actualizado en las nuevas tendencias tecnológicas. Por lo tanto, el nivel de formación del talento humano puede ser un factor determinante para la generación de ideas de innovación y la selección de mecanismos de aprendizaje más adecuados.

Siguiendo esta reflexión, se podría considerar la necesidad de optar por diferentes mecanismos de aprendizaje, teniendo en cuenta el nivel de aprendizaje acumulado previamente por la empresa y las particularidades y complejidad tecnológica de su sector o actividad industrial. Las fuentes de información utilizadas y los mecanismos de aprendizaje pueden variar en diferentes actividades industriales. Asimismo, se requeriría que en la selección y aplicación de dichos mecanismos, las empresas consideren las rutinas necesarias para la operacionalización, internalización y explotación del nuevo conocimiento tecnológico (Nonaka y Takeuchi, 1995; Zahra y George, 2002). En sectores con mayor complejidad tecnológica, como los basados en la ciencia, predominan las actividades relacionadas con el aprendizaje basado en investigación y desarrollo propia, así como los contratos de licencia para la transferencia de tecnología interempresarial.

A continuación, se presenta una reseña de los antecedentes desde 1998 y los resultados en las etapas del proceso de aprendizaje en el contexto del proceso de innovación, utilizando como ejemplo el caso de la creación del Laboratorio de Recubrimientos Duros y Aplicaciones Industriales (LRDAI) en la Escuela de Materiales de Ingeniería de la Universidad del Valle. Este caso permitió consolidar el programa académico de ingeniería de materiales, tanto a nivel de grado como de posgrado, y la creación de los grupos de investigación RDAI y TPRM. El siguiente es un resumen tomado de Ortega J.A. et al. (2009) en la participación en la 12<sup>a</sup> Conferencia Internacional sobre Política y Gestión de Tecnología (ICTPI), Porto 2009.

### **3. Resultados del proceso de aprendizaje y sus etapas: iniciación, intermediación e innovación**

#### **El caso del Laboratorio de Recubrimientos Duros y Aplicaciones Industriales - LRDAI-UNIVALLE**

La participación en el proceso de transferencia de tecnología en el área específica de Procesamiento de Materiales por Plasma es uno de los esfuerzos conjuntos de académicos y empresarios de la región del Valle del Cauca y del país. Estos esfuerzos se iniciaron en los años 70 del siglo pasado con el objetivo de incorporar nuevas tecnologías que mejoraran ostensiblemente la calidad de productos y procesos, y, por ende, la competitividad de las empresas del sector metalmeccánico colombiano.

#### ***Antecedentes de la Tecnología de Procesamiento de Materiales por Plasma en el sector productivo colombiano***

El interés en el procesamiento de materiales por plasma comenzó con la llegada de nuevos doctores en ciencias físicas y químicas a Colombia en los años 70 y 80. Estos doctores formaban parte de un programa del Gobierno Colombiano de formación de docentes en el exterior y habían sido testigos del auge de esta tecnología en Europa, Asia y Estados Unidos. En estos países, se invertía significativamente en investigación y desarrollo de nuevos procesos de producción asistidos por plasma, con una parte considerable del presupuesto destinada a Centros de Investigación Universitarios, donde estos nuevos docentes adquirieron experiencia como investigadores.

Al regresar a Colombia, estos investigadores fueron pioneros en la creación de nuevos grupos de investigación en diversos tipos de materiales, incluyendo polímeros, superaleaciones metálicas, materiales cerámicos y materiales compuestos, entre otros. Estos grupos fueron patrocinados por el Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología – COLCIENCIAS (actualmente MINCIENCIAS), bajo el programa de Innovación Tecnológica, el cual fue ganando fuerza tanto a nivel científico como industrial.

Paralelamente, nuevos estudiantes fueron introducidos a esta tecnología a través de cursos de pregrado y postgrado, y mediante su participación en proyectos de ciencias básicas patrocinados por COLCIENCIAS. Este proceso se intensificó a finales de los años 80 y principios de los 90, durante los cuales se adquirieron los primeros equipos de laboratorio para el procesamiento de materiales por plasma.

Esto conlleva entonces a una etapa de **iniciación** en el estudio de las bases científicas en este tipo de tecnologías en el país, lo cual se ve reflejado en el origen de algunas publicaciones a nivel nacional e internacional

en temas como protección a la corrosión, materiales de aplicaciones en microelectrónica y de aplicación en el sector metalmecánico como materiales resistentes al desgaste. En este contexto, se crea la necesidad de dar inicio a la segunda etapa de **imitación por intermediación y transferencia de tecnología**, considerada pertinente por interés nacional y la oportunidad de ser desarrollada y escalada a nivel industrial. Esta segunda etapa incluyó la formación de nuevos profesionales especializados en el procesamiento de materiales, una especialidad en la que convergen diversas disciplinas de las ciencias básicas (física, química) e ingenierías (mecánica, metalúrgica y, especialmente, ciencia de superficies). En 1994, la Universidad del Valle lanzó el programa académico de Ingeniería de Materiales, el primero en el territorio nacional, con el objetivo de formar ingenieros con fundamentos integrales relacionados con procesos de elaboración de materiales y las técnicas de caracterización de los mismos. Hasta ese momento, estas actividades se realizaban de manera independiente por diversas especialidades académicas como Física, Química, Mecánica, Metalurgia e ingenierías afines.

En 1997, ya con un número suficiente de estudiantes de pregrado en Ciencia de Materiales y bajo el liderazgo de los docentes investigadores, se sientan las bases para iniciar una tercera etapa de **investigación y desarrollo** mediante la creación del LRDAI - Laboratorio de Recubrimientos Duros y Aplicaciones Industriales, en la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Valle. Este laboratorio, único en su tipo en la región en ese momento, fue concebido como una **intermediación** científico-industrial para implementar la tecnología de procesamiento de materiales por plasma en aplicaciones tales como herramientas de corte de alta precisión, dados de conformado metálico y dados de extrusión de aluminio, entre otros. La infraestructura tecnológica inicial, ahora conocida como Laboratorio RDAI, fue creada bajo el marco del proyecto "Recubrimientos Duros y Superduros: Desarrollo y Aplicaciones Industriales", dirigido por el profesor Federico Sequeda y cofinanciado por UNIVALLE y patrocinado por COLCIENCIAS en 1999 (Ortega et al., 2009).

Simultáneamente, se iniciaron gestiones con el Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA) y su Centro de Desarrollo Tecnológico (CDT) ASTIN, encargado de la capacitación de personal técnico en nuevos procesos productivos. Este proyecto paralelo contó con la ayuda adicional del Gobierno Alemán para la creación de una Planta Piloto de Recubrimientos Duros en el CDT- ASTIN-SENA, financiada con recursos del gobierno local.

Tras la creación del Laboratorio de investigación en materiales (LRDAI) en UNIVALLE, la Planta Piloto de Recubrimientos Duros en el CDT-ASTIN-SENA y la cooperación de cinco de las empresas más importantes de la región en el sector metalmecánico (Alúmina, Propal, Fanalca, Sidelta y Proyectos Industriales), se continuó con una nueva etapa del proceso de transferencia de tecnología. Esta etapa implicó la adquisición de equipos de producción basados en la tecnología de plasma, equipos de caracterización

y el establecimiento de alianzas estratégicas con grupos de investigación a nivel nacional con experiencia previa en el tema desde el punto de vista de ciencias básicas. Al mismo tiempo, se iniciaron labores de búsqueda de pares a nivel suramericano, contactando a la Agencia Colombiana para el Avance de la Ciencia (ACCI), que notificó al director del proyecto sobre la disponibilidad de apoyo técnico-académico-científico relacionado con el procesamiento de materiales por plasma por parte del Gobierno Japonés a través de una agencia de cooperación internacional (JICA, filial Buenos Aires - Argentina) y la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA).

Estos esfuerzos conjuntos de académicos y empresarios han consolidado una base sólida para el desarrollo y la innovación en el procesamiento de materiales por plasma en Colombia, promoviendo la colaboración entre la academia, la industria y el gobierno para mejorar la competitividad del sector metalmeccánico del país.

### ***Impacto del Proceso de aprendizaje de los Grupos de investigación RDAI y TPRM y la interacción con pares académicos y de investigación***

El programa de capacitación de JICA (Agencia Internacional de Cooperación de Japón) se inició en 1998, con la participación de integrantes del Grupo de Investigación de Materiales RDAI en los años 2001-2003 y 2006. El objetivo de este programa era compartir experiencias con los pares argentinos de transferencia de tecnología y proporcionar formación avanzada a los ingenieros del equipo del Laboratorio RDAI en la Facultad de Ingeniería de UNIVALLE y la Planta Piloto en el ASTIN-SENA.

Gracias a esta interacción, el Grupo RDAI inició trabajos conjuntos con personal de la Comisión Nacional de Energía Atómica – Centro Atómico Constituyentes (CNEA) y con 24 grupos y laboratorios ubicados en países como Perú, México, Brasil, Chile, Paraguay, Venezuela, Cuba y México, aspecto crucial en este tipo de procesos. Además, con el apoyo de JICA, se establecieron contactos con especialistas japoneses en aplicaciones de materiales y especialistas suizos en caracterización de materiales, abriendo una oportunidad única de cooperación internacional para el programa de transferencia tecnológica.

Actualmente, bajo la dirección y liderazgo de los profesores Yesid Aguilar y Julio César Caicedo, el grupo TPRM ha creado una línea de investigación y desarrollo en tribología de materiales metálicos y poliméricos biocompatibles. Los principales resultados han sido publicados en revistas especializadas en tribología. Conjuntamente con los estudiantes de programas de grado, maestría y doctorado, se han caracterizado y validado las propiedades de resistencia al desgaste y biocompatibilidad de algunos aceros y sus recubrimientos

protectores (Ortiz C. et al., 2022), con un alto potencial para desarrollar aplicaciones y prototipos en diversos sectores como el metalmecánico, aeronáutico y en servicios de salud.

Principales Impactos y Beneficios:

**1. Capacitación y Formación Avanzada:**

- Los ingenieros y estudiantes involucrados han recibido formación avanzada y práctica en tecnología de procesamiento de materiales por plasma, lo que ha aumentado su competencia técnica y capacidad de innovación.

**2. Publicaciones y Difusión del Conocimiento:**

- Los resultados de las investigaciones han sido publicados en revistas especializadas, contribuyendo a la difusión del conocimiento y fortaleciendo la reputación académica de los grupos de investigación.

**3. Colaboración Internacional:**

- Las alianzas con instituciones de países como Japón, Suiza, Argentina y otros países latinoamericanos han permitido el intercambio de conocimientos y tecnología, enriqueciendo las capacidades locales.

**4. Desarrollo de Prototipos y Aplicaciones:**

- Las investigaciones en tribología y biocompatibilidad de materiales han permitido el desarrollo de prototipos y aplicaciones prácticas en sectores industriales clave, mejorando la competitividad y eficiencia.

**5. Apoyo y Financiación:**

- El respaldo de entidades como COLCIENCIAS, SENA y JICA ha sido crucial para la financiación de proyectos y adquisición de equipos avanzados, consolidando la infraestructura tecnológica necesaria.

**6. Innovación y Competitividad:**

- La implementación de tecnologías avanzadas ha mejorado la calidad de productos y procesos en el sector metalmecánico, impulsando la competitividad de las empresas colombianas en el mercado nacional e internacional.

El proceso de aprendizaje e interacción con pares académicos y de investigación ha sido fundamental para el desarrollo y consolidación de tecnologías avanzadas de procesamiento de materiales por plasma en Colombia. Los grupos de investigación RDAI y TPRM, mediante la cooperación internacional y la

formación avanzada, han logrado avances significativos en la caracterización y aplicación de materiales, contribuyendo al crecimiento y fortalecimiento del sector metalmecánico y otras industrias estratégicas.

#### 4. Conclusiones

- **Política de Ciencia y Tecnología:** La política de ciencia y tecnología puede servir como un instrumento eficaz para la cofinanciación de proyectos de investigación y desarrollo, y para la asimilación de tecnologías foráneas mediante la transferencia. Esto es especialmente relevante para apoyar a los grupos de investigación en instituciones de intermediación tecnológica en países en desarrollo, como es el caso de Colombia.
- **Consolidación de Aprendizaje y Liderazgo:** En el Grupo de Investigación TPMR de la Escuela de Ingeniería de Materiales de la Universidad del Valle, se está consolidando un proceso de aprendizaje y liderazgo en la interacción con socios clave en las tecnologías de recubrimientos duros y sus aplicaciones industriales. Esto permite liderar procesos de innovación con valor agregado a nivel nacional e internacional, y posibilita la formación de excelencia a nivel de grado y postgrado en ingeniería de materiales.
- **Fortalecimiento del Sector Metalmecánico:** Es importante fortalecer la interacción con las entidades del clúster aeroespacial y consolidar el sistema sectorial de innovación en el sector metalmecánico. Esto debe hacerse con el apoyo de políticas públicas de ciencia y tecnología, desarrollo industrial y comercio exterior.

#### 5. Referencias

- Amara, N., Landry, R., Becheikh, N., Ouimet, M., (2004). "What Factors Drive Radical Innovations in Traditional Manufacturing Industries?". In: DRUID Summer Conference, 14–16 June, Copenhagen, Denmark.
- Amara, N., Landry, R., Becheikh, N., Ouimet, M., (2008). Learning and novelty of innovation in established manufacturing SMEs. *Technovation* 28, 7, pp. 450-463.
- Arai, S., (2007). "Absorptive Capability of MNCs: Balance between Autonomy and Control of Foreign R&D Subsidiaries". In: PICMET Conference, 5-9 august, Portland, USA 2007.
- Archibugi, D., Pianta, M., (1996). Measuring technological change through patents and innovation surveys. *Technovation* 16 (9), 451–468.
- Archibugi, D., Sirilli, G., (2001). The direct measurement of technological innovation in business. In: European Commission (Eurostat) (Ed.),



Innovation and Enterprise Creation: Statistics and Indicators.  
European Commission

- Becheikh, N., Landry, R., Amara, N., (2006). Lessons from innovation empirical studies in the manufacturing sector: A systematic review of the literature from 1993-2003, *Technovation* 26, pp. 644-664.
- Beneito, P., (2003). Choosing among alternative technological strategies: an empirical analysis of formal sources of innovation. *Research Policy* 32, 693-713.
- Cohen, W.M., Levinthal, D.A., (1989). Innovation and learning: the two faces of R&D. *The Economic Journal* 99, 569-596.
- Cohen, W.M., Levinthal, D.A., (1990). Absorptive capacity: a new perspective on learning and innovation. *Administrative Science Quarterly* 35, 128-152.
- Cohen, W.M., 1995. Empirical studies of innovative activity. In: Stoneman, P., (Ed.), *Handbook of the Economics of Innovation and Technological Change*, Blackwell, Oxford, pp. 182-264.
- Cooper, R.G. (1984) "The Strategy-Performance link in New Product Development", *R&D Management*, Vol.14, No. 4, pp. 247-59.
- Darío, C. R. H. (2019b, diciembre 1). Influencia del número de bicapas en las propiedades mecánicas y tribológicas en recubrimientos multicapa [TIN/TICRN]n depositados por magnetrón Sputtering. Biblioteca Digital Universidad del Valle. <https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/entities/publication/335650f8-f1fc-4389-953d-62bcb0fceb6>
- Debackere, K., Clarysse, B., Rappa, M.A., (1996). Dismantling the ivory tower: the influence of networks on innovative output in emerging technologies. *Technological Forecasting and Social Change* 53, 139-154.
- Graves, S.B., Langowitz, N.S., (1996). R&D productivity: a global multiindustry comparison. *Technological Forecasting and Social Change* 53, 125-137.
- Hall, L.A., Bagchi-Sen, S., (2002). A study of R&D, innovation, and business performance in the Canadian biotechnology industry. *Technovation* 22, 231-244.
- Keizer, J.A., Dijkstra, L., Halman, J.I.M., (2002). Explaining innovative efforts of SMEs. An exploratory survey among SMEs in the mechanical and electrical engineering sector in the Netherlands. *Technovation* 22, 1-13.
- Landry, R., Amara, N., Lamari, M., (2002). Does social capital determine innovation? To what extent?. *Technological Forecasting and Social Change* 69, 681-701.
- Li, M., Simerly, R.L., (2002). Environmental dynamism, capital structure and innovation: an empirical test. *International Journal of Organizational Analysis* 10 (2), 156-171.

- Hervas, J.L., Albors, J., Gil, Ignacio. (2011). “ Making sense of innovation by R&D and non-R&D innovators in low technology contexts: A forgotten lesson for policymakers”. *Technovation* 31, 9, pp. 427-446.
- Nonaka, I. and Takeuchi, H. (1995) *The Knowledge-Creating Company How Japanese Companies Create the dynamics of Innovation*. Oxford University Press, New York. - References - Scientific Research Publishing.
- J. A. Ortega, “Management of Sectorial Technology Chains and Integral Evaluation of Potential Projects on Innovation Technology,” PICMET '07 - 2007 Portland International Conference on Management of Engineering & Technology, Portland, OR, USA, 2007, pp. 464-470, doi: 10.1109/PICMET.2007.4349359.
- Ortega, J.A., Neira, A., Sequeda, F.& Gribenchenko, I., (2009), “Management of Innovation and Technology Transfer process between University & Industry: the Material Research Center case in Universidad del Valle, Colombia”, presented at 12th International Conference on Technology Policy and Innovation (ICTPI) 12-14 July 2009, Porto.
- Ortega, J.A., (2012), Identificación de los factores que contribuyen a la capacidad de absorción tecnológica de las empresas españolas innovadoras: una aproximación a los factores explicativos de la Capacidad de Absorción desde el enfoque del proceso de innovación. TFM-FADE-UPV.
- Ortega-Gomez J.A. (2018). *Mecanismos de aprendizaje para la innovación: el caso de Colombia*. ISBN 978-620-2-12242-9. SIA OmniScriptum Publishing EAE, Riga.
- Ortega J.A., (2019). *Determinantes del esfuerzo en innovación de empresas seguidoras en economías en desarrollo: el caso de la industria manufacturera colombiana*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia.
- Ortíz, C. H., Aperador, W., & Caicedo, J. (2022). Electrochemical response of (*B*-TCP and HA) individual coatings and [*B*-TCP/HA] multilayers coatings exposed to biocompatible environments. *Surface & Coatings Technology*, 435, 128266. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128266>
- Ortíz, C. H., Sánchez, S., Caicedo, J., Aperador, W., Sánchez-Molina, J., & Bautista-Ruiz, J. (2022). Comparative Study on the Corro-Erosive Properties of Base Cemented Transition Metals TAC and HFC and TAX-HFX-C coatings. *Metals*, 12(9), 1516. <https://doi.org/10.3390/met12091516>
- Ortiz C.H. , Martínez D.G., Montilla L.N., I.J. Castro & J.C. Caicedo (2023), Tribological Evaluation of [ $\beta$ - TCP/HA]<sub>n</sub> Multilayer Coatings Immersed in Biological Fluids. *Biotribology* 35-36.

- Ortiz, C. H., Esguerra-Arce, A., Esguerra-Arce, J., Castañeda, A. B., Caicedo, J., & Aguilar, Y. (2022). The high temperature tribological behavior of an iron oxide strengthened iron compound obtained from an industrial byproduct. *Tribology International*, 175, 107834. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.107834>
- Ortíz, C. H., Caicedo, J., & Amaya, C. (2022b). Synthesis and tribo-mechanical characterization of [B-Tricalcium Phosphate/Hydroxyapatite] multilayer system as a function of the spatial periodicity. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 31(9), 7734-7747. <https://doi.org/10.1007/s11665-022-06764-x>
- Pavitt, K., (1984). Sectoral patterns of technical change: towards a taxonomy and a theory. *Research Policy* 13, pp. 343–373.
- Pisano, G.P., Shan, W., Teece, D.J., (1988). "Joint ventures and collaboration in the biotechnology industry". In: Mowery, D. (Ed.), *International Collaborative Ventures in US Manufacturing*. Ballinger Publishing Co., Cambridge, MA.
- Porter, M.E., (1990). *The Competitive Advantage of Nations*. The Free Press, New York.
- Rodriguez M.P., (2022). El AVC del liderazgo. LEGIS.
- Rothwell, R. (1994), "Industrial innovation: success, strategy, trends", en M.Dodgson y R. Rothwell (eds.), *Handbook of Industrial Innovation*, Elgar, Cheltenham.
- Sternberg, R., Arndt, O., (2001). The firm or the region: what determines the innovation behaviour of European firms? *Economic Geography* 77 (4), 364–382.
- Stock, G.N., Greis, N.P., Fisher, W.A., (2001). Absorptive capacity and new product development. *The Journal of High Technology Management Research* 12 (1), 77–91.
- Vega-Jurado, J., Gutierrez-Gracia, A., Fernandez-de-Lucio, I., Manjarrés-Henriquez L., (2008). The effect of external and internal factors on firms' product innovation. *Research policy* 37, 616-632.
- Zahra, S., George, G., (2002), "Absorptive capacity: a review, reconceptualization, and extension", *Academy of Management Review*, Vol.17, 2, pp. 185-203.



CAPÍTULO

9



**PROCESAMIENTO  
DE FOTOGRAFÍAS  
AÉREAS PARA  
LA CREACIÓN  
DE MODELOS  
TRIDIMENSIONALES  
REFERENTES A  
REPRESENTACIÓN  
DE ESPACIOS**

**Santiago Román Montoya**  
Estudiante Ingeniería Civil  
Aula STEM FabLab  
Stem\_man@unal.edu.co

/ Dirección Académica  
Universidad Nacional de Colombia, sede  
Manizales

**Resumen.** Modelos 3D a partir de fotografías 2D, utilizando aeronaves no tripuladas de bajo peso, en la reconstrucción digital de edificaciones universitarias. Esto es parte de un proyecto que busca el reconocimiento de los espacios físicos por parte de los nuevos miembros de la comunidad académica. Las imágenes se obtuvieron a través de un dron DJI Mini 2 y los datos se procesaron en el software Agisoft Metashape Estándar para obtener el modelo 3D del campus Palogrande de la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales. El producto obtenido por el proceso de fotogrametría se ha utilizado como parte de la inducción y ha contribuido al proceso de adaptación y reconocimiento de los espacios físicos de la sede, permitiendo generar aplicaciones virtuales mediante el uso de software relacionado con la Realidad Virtual y la Realidad Mixta.

**Palabras clave:** Fotogrametría aérea; triangulación aérea; modelo 3D, edificio.

**Abstract.** The objective of this study was to analyze the use of photogrammetry, which is a technique that allows the creation of 3D models from 2D photography, using low weight unmanned aircraft, in the digital reconstruction of university buildings, as part of a project that seeks the recognition of physical spaces by the new members of the academic community. The images were obtained through a DJI Mini 2 Drone, the data were processed in the Agisoft Metashape Standard software to obtain the 3D model of the Palogrande campus of the National University of Colombia, Manizales. The product obtained by the photogrammetry process has been used as part of the induction and has contributed to the process of adaptation and recognition of the physical spaces of the campus, allowing the generation of virtual applications using software related to Virtual Reality and Mixed Reality.

**Keywords:** Aerial photogrammetry; aerial triangulation; 3D model, building.

## 1. Introducción

La fotogrametría es un campo de estudio que ha transformado y automatizado procesos en diversas áreas del conocimiento. Entre las aplicaciones de esta técnica se encuentran la ingeniería civil, la arquitectura, la conservación del patrimonio, la cartografía, la agricultura y la arqueología, entre otras. El uso de esta herramienta ha revolucionado los procesos tradicionales a través de los cuales se obtenía y se procesaba la información para cada uno de estos campos.

En un sentido técnico, la fotogrametría se define como “la ciencia y la tecnología que extrae información geométrica y temática tridimensional confiable, a menudo a lo largo del tiempo, de objetos y escenas a partir de datos de imágenes y rangos” (cita 1). La técnica de fotogrametría permite extraer



información diversa a partir de imágenes obtenidas con cámaras aéreas digitales o sistemas de aeronaves no tripuladas (UAS), que posteriormente, a través de un proceso de digitalización y procesamiento de datos, permite obtener productos como la generación de nubes de puntos, la generación de mallas y el modelado 3D, los modelos de elevación digitales (DEM), los mapas de ortofotos digitales (DOM) y los gráficos de líneas digitales (DLG), entre otros productos topográficos tradicionales (cita 2).

## **Aplicaciones de la fotogrametría aérea en ingeniería civil y arquitectura**

La fotogrametría es una herramienta de alto valor para el campo de la ingeniería civil, la arquitectura y la construcción. Su uso se ha incrementado significativamente durante los últimos años.

Las aplicaciones de la fotogrametría en el área de la ingeniería civil incluyen, entre otras, la evaluación de riesgos estructurales y la deformación de la infraestructura. En particular, se ha estudiado la deformación de elementos estructurales con un proceso que integra la prueba de carga a vigas con una toma de datos sincrónicos a través de fotogrametría de corto alcance. Posteriormente, los resultados se procesan y se comparan con los registros medidos manualmente. El ensayo arrojó que los puntos de deflexión analizados con el proceso de fotogrametría son confiables y consistentes con las mediciones manuales (Al-Ruzouq et al., 2023).

En el mismo sentido, Jeong, G.Y. et al. (2020) realizaron un estudio para dimensionar elementos estructurales en madera a través de fotogrametría, utilizando un sistema de aeronave no tripulada (UAS) para obtener las imágenes. Los resultados suponen una mejora significativa frente a los procesos de dimensionamiento tradicionales, ya que el proceso se realizó en un menor tiempo y no supuso exponer a los trabajadores a riesgos relacionados con la toma de dimensiones a grandes alturas.

En el ámbito de la arquitectura, la aplicación de la fotogrametría supone una mejora significativa en los procesos de relevamiento de construcciones existentes y en la salvaguardia del patrimonio. Mientras que los métodos tradicionales implican tareas manuales como el dibujo de planimetrías 2D y la creación de modelos 3D, la fotogrametría ofrece una alternativa. Esta técnica consiste en capturar secuencialmente imágenes que se convierten en una nube de puntos, brindando detalles rápidos y precisos del objeto 3D. El resultado es un modelo virtual que refleja con fidelidad las formas arquitectónicas existentes, contribuyendo así a la preservación del legado arquitectónico.

Por último, se evidencia una aplicación de la fotogrametría en el campo de la construcción. A través de procesos de fotogrametría UAS es posible recrear un modelo 3D de los sitios de construcción en varias ocasiones durante el tiempo en que se desarrolle la obra. De esta manera, es posible realizar un seguimiento y control más estricto de los procesos que se desarrollan directamente en el lugar de la construcción. La tecnología de vehículos aéreos no tripulados y las técnicas de fotogrametría pueden producir resultados tangibles en el monitoreo y la gestión automatizados de la construcción, especialmente en el mapeo y la visualización de sitios de construcción.

## 2. Metodología

El objeto de estudio son los edificios del campus Palogrande de la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales, Caldas. En este campus estudian alrededor de mil quinientas (1500) personas y se encuentran la mayoría de las oficinas administrativas de la sede Manizales.

**Figura 1.** *Fotografía del Campus Palogrande de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales*



*Fuente: Universidad Nacional de Colombia sede Manizales.*

### Preparación general

Se utilizan diversas herramientas para la toma de fotografías del objeto de estudio inicialmente planteado, entre ellas, celulares con cámara, cámaras semiprofesionales, cámaras profesionales y drones. A continuación, se presenta una tabla que detalla las herramientas según el tamaño del proyecto a realizar.

**Tabla 1.** *Tabla que relaciona el tamaño del proyecto a realizar, con respecto al dispositivo recomendado*

Tipo de cámara	Tamaño de proyecto	Nota
Celular/dispositivo móvil	Pequeño	Se usa para objetos que no requieran tanto detalle o precisión, que puedan tomarse fotos de una altura adecuada para la persona
Cámara semi profesional o profesional	Pequeño o Mediano	Se usa para objetos que requieran mayor detalle o calidad. También para objetos medianos que requieran el uso de trípode para mayor comodidad
Drone	Mediano o Grande	Se usa para objetos grandes, que permita tomar fotos desde diferentes perspectivas, fachadas o cubiertas, como edificios o monumentos

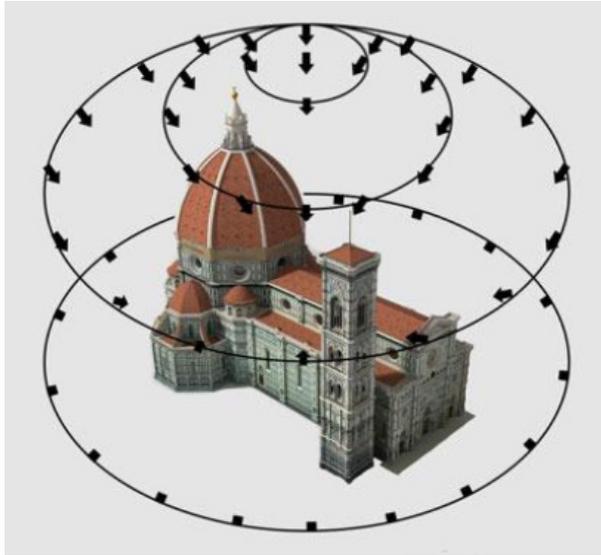
Teniendo en cuenta la Tabla 1, se analizó el objeto de estudio, en este caso, el Campus Palogrande. Este campus tiene un importante componente volumétrico, ya que está compuesto por construcciones denominadas "bloques", que incluyen edificios de aulas de clase, auditorios, oficinas y zonas comunes. A partir de este análisis, se decidió utilizar un drone DJI Mini 2 para la toma de fotografías aéreas.

### **Toma de fotografías**

Para la toma de fotografías, se consideraron los siguientes aspectos:

1. La luz es un factor crucial. Idealmente, las fotografías deben tomarse durante el día, entre las 6 a.m. y las 6 p.m. Además, para el procesamiento en software especializado, es recomendable evitar la toma de fotografías exactamente al mediodía, ya que la luz solar en ese momento no genera sombras sobre las edificaciones, lo cual es necesario para un procesamiento adecuado de las imágenes. Finalmente, no se recomienda realizar la toma de fotografías durante la noche para asegurar la mayor cantidad de información posible en cada toma.
2. Se deben tomar fotos desde distintas perspectivas, realizando un recorrido de 360° alrededor del objeto y a diferentes alturas, como se muestra en la Figura 2.

**Figura 2.** *Ángulo de toma de fotografías aéreas con Drone, para obtener información*

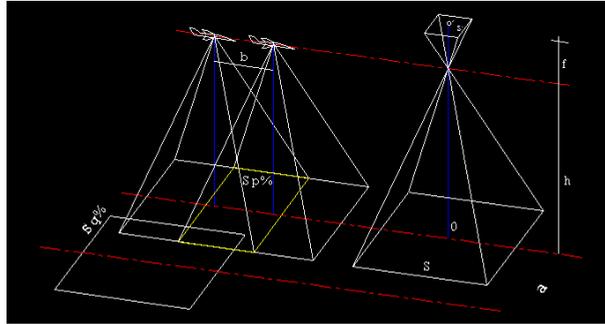


3. Se tomaron aproximadamente mil doscientas fotografías (1200) de cada uno de los bloques del Campus Palogrande. Las variables en las que se ajustaron las tomas fueron las siguientes:

- **Distancia de la cámara al objeto:** se ajustó entre cinco (5) y cincuenta (50) metros, tanto horizontal como verticalmente respecto al objeto. A medida que la distancia era más cercana, se obtenía información más precisa del cuerpo; por otro lado, con distancias mayores, se lograba captar una vista más amplia que permitía intersectar una mayor cantidad de información entre fotografías, utilizando la triangulación aérea.
- **Ángulo de inclinación de la cámara:** se ajustó entre  $90^{\circ}$  y  $30^{\circ}$ , permitiendo realizar tomas aéreas desde diferentes perspectivas, lo cual fue útil en el proceso de fotogrametría y postprocesado.

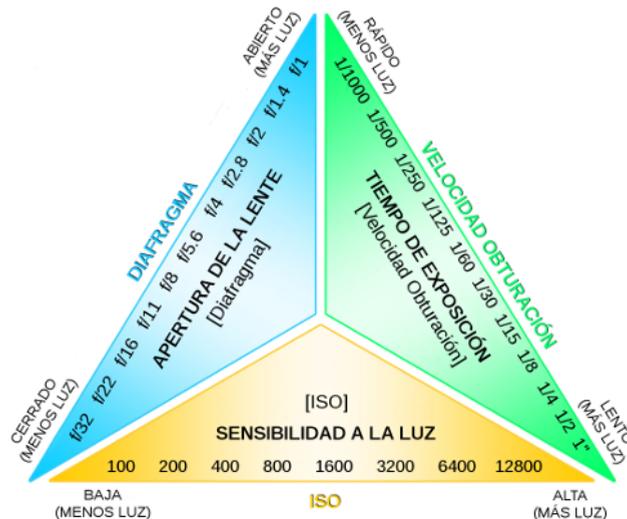
Se utilizó la técnica de triangulación aérea, que permite obtener información a partir de la toma de fotografías desde puntos específicos que se relacionan durante el procesamiento en un software especializado. Las fotografías se tomaron con una alta semejanza entre cada una, lo que permitió captar una gran cantidad de información general. Esta técnica aplica relaciones, como se muestra en la Figura 3.

**Figura 3.** Representación de triangulación aérea entre fotografías tomadas con un Drone<sup>3</sup>



4. Se tuvo en cuenta el triángulo de exposición, un concepto fotográfico que permitió obtener imágenes de alta calidad mediante los ajustes de luz proporcionados por el sensor de la cámara del dron, con el fin de lograr resultados con excelente detalle (ver Figura 4). Sin embargo, en algunas zonas también fue viable tomar fotografías en modo “automático” debido a las buenas condiciones visuales y climatológicas del lugar.

**Figura 4.** Triángulo de exposición. Guía usada según las condiciones de luz para la obtención de resultados adecuados<sup>4</sup>



3 Fotografía tomada de: <https://gsr.efn.unc.edu.ar/fotogrametria.html>

4 Imagen tomada de <https://www.fotografoenlanoche.com/2020/02/19/1328/>

## Creación del modelo de fotogrametría

Una vez se tomaron las fotografías con el dron, se procedió al procesamiento de estas utilizando una licencia comercial del software de análisis de datos fotográficos llamado Agisoft Metashape Estándar. Este programa se puede instalar desde la web: <https://www.agisoft.com/>.

El software requiere altos requisitos de sistema computacional (ver Figura 5). Por lo tanto, se utilizó uno de los computadores de alto rendimiento del Aula STEM FabLab de la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales, para procesar todas las fotografías con alta calidad.

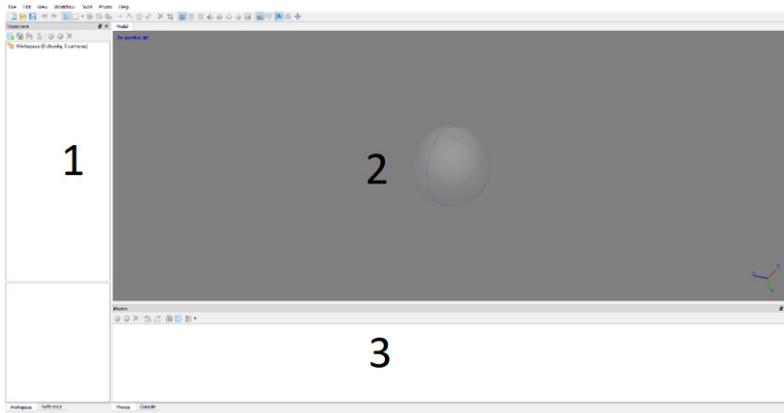
**Figura 5.** *Requerimientos mínimos de sistema para la creación de un modelo 3D haciendo uso de técnicas de fotogrametría*



Posteriormente a la compra de la licencia de Agisoft Metashape Estándar, se hizo el procesamiento de las fotografías haciendo uso de los siguientes pasos:

- A. Inicio del proyecto:  
Se van a ubicar las pantallas y paneles del software para navegar sobre el espacio de trabajo (ver Figura 6.)

**Figura 6.** Paneles de trabajo de Agisoft Metashape Estándar



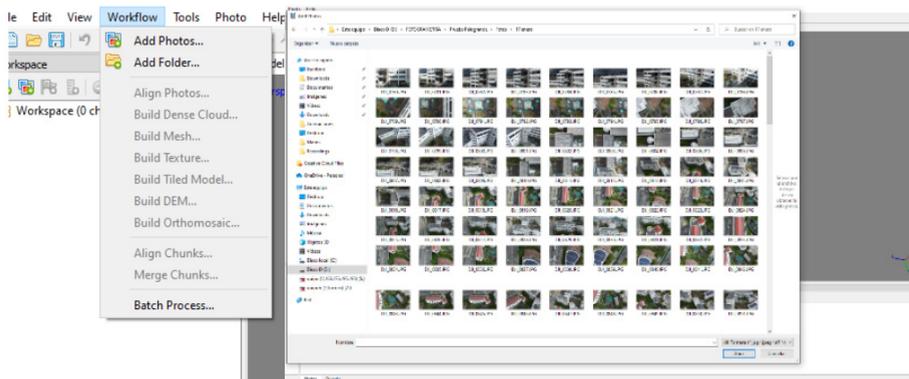
En relación con la Figura 6. la descripción de cada una de las secciones está dividida en:

1. Será el espacio de trabajo, en donde aparecerán las fotos a procesar con sus características
2. Será el espacio donde aparecerá el modelo, y se podrá interactuar bajo una rueda de ejes X, Y, Z
3. Aparecerán las fotos colocadas

**B. Colocación de imágenes:**

Se importaron las fotografías tomadas con drone, a una carpeta, que será asignada por el software Agisoft Metashape Estándar para analizar el caso de estudio. Esta opción se encuentra en los paneles superiores del programa, en la sección "WorkFlow" (ver Figura 7.)

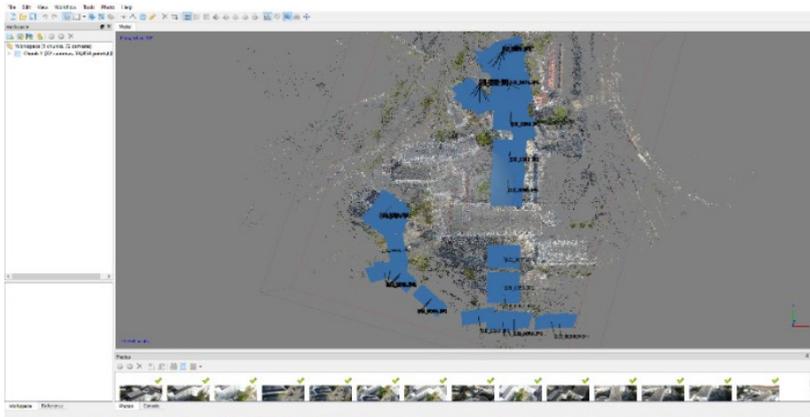
**Figura 7.** Importación de imágenes aéreas tomadas con Drone



C. Alineación de fotos:

Utilizando la triangulación aérea, se analizará cada fotografía aérea por separado y se obtendrá información que coincida de un elemento a otro. Esta opción se encuentra en los paneles superiores del programa, en la sección “WorkFlow” (ver Figura 8).

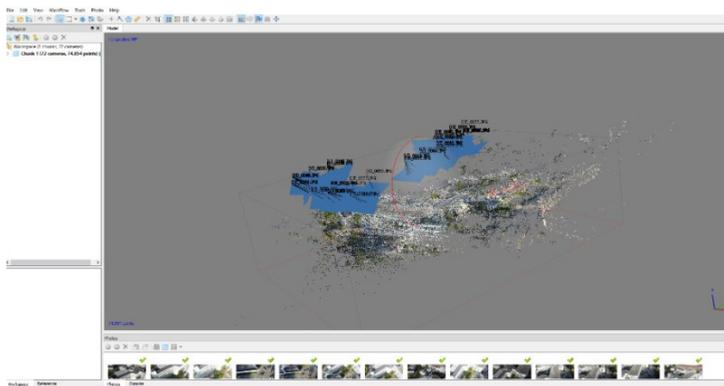
**Figura 8.** Alineación de imágenes aéreas tomadas con Drone



D. Creación de nube de puntos densa:

Sobre cada fotografía se creó una nube de puntos más densa, extrayendo más información relevante de cada imagen. Para esto, se utilizó el proceso de “Build Dense Cloud”, ubicado en los paneles superiores del programa, en la sección “WorkFlow” (ver Figura 9).

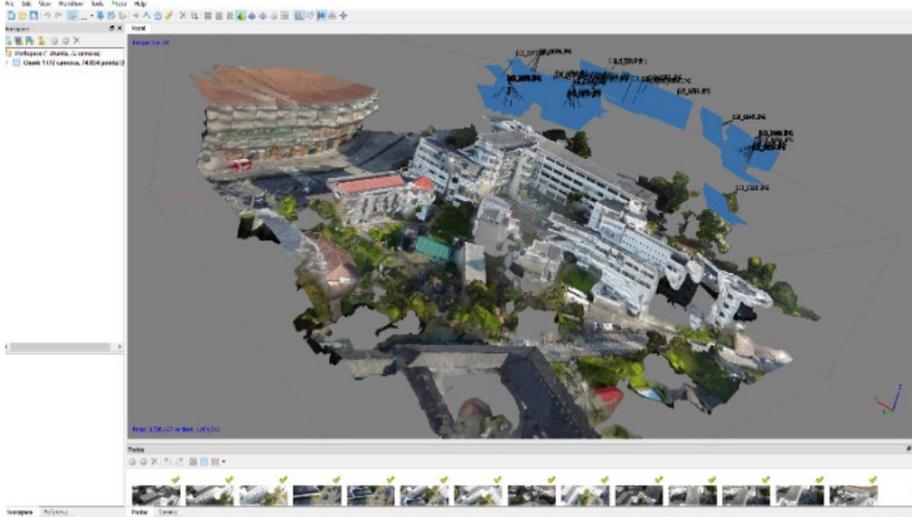
**Figura 9.** Creación de nube de puntos densa sobre el modelo





- E. Creación de malla de puntos:  
Se conectaron todos los puntos creados en el paso anterior para formar polígonos que constituyen un modelo 3D, utilizando el proceso "Build Mesh", que se observa en la Figura 10.

**Figura 10.** Creación de la malla sobre el modelo



- F. Colocación de textura:  
A partir de la toma de fotografías y el procesamiento realizado, se aplicará la textura general al modelo, lo que permitirá obtener un modelado 3D más realista y acorde con las fotografías aéreas tomadas (ver Figura 11).

**Figura 11.** Modelo 3D con textura terminado



### 3. Resultados

En esta investigación, realizada mediante la toma de fotografías aéreas para la creación de modelos 3D utilizando la fotogrametría con el propósito de representar edificios en aplicaciones de realidad virtual, se han obtenido hallazgos de gran relevancia. En primer lugar, se encontró que el modelo generado posee una alta precisión, lo que garantiza una representación fiel de los edificios y su entorno. Esta precisión es esencial para la inmersión y la experiencia realista en aplicaciones de realidad virtual, así como en el campo de la ingeniería civil.

Además, se destacan los detalles constructivos observados en el modelo resultante. La metodología aplicada permitió capturar un nivel alto de detalle en los edificios de la universidad, revelando características arquitectónicas notables. Estos hallazgos, obtenidos a partir de imágenes aéreas, fueron esenciales para el desarrollo de aplicaciones de realidad virtual orientadas a proyectos de arquitectura del Aula STEM FabLab de la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales, ya que ofrecen a los usuarios una experiencia enriquecedora y educativa al explorar y estudiar edificios de manera virtual. En conjunto, estos hallazgos respaldan la eficacia de la fotogrametría aérea en la generación de modelos 3D de alta calidad y destacan su relevancia en la creación de entornos virtuales inmersivos.

### 4. Discusión

Los hallazgos de esta investigación, basada en la toma de fotografías aéreas para la creación de un modelo 3D mediante fotogrametría, tienen un significado profundo para la disciplina de la geomática. En primer lugar, los resultados obtenidos demuestran la efectividad de esta técnica en la generación de modelos 3D precisos y detallados de áreas delimitadas, lo que tiene un gran impacto en la creación de objetos virtuales que podrán ser usados en aplicaciones de realidad virtual o mixta. Además, esta investigación ha validado las hipótesis iniciales sobre la viabilidad de la fotogrametría aérea como una herramienta eficaz para el procesamiento de datos de alta resolución, respaldando así la teoría existente en este campo.

En resumen, estos hallazgos no solo fortalecen nuestra comprensión de la fotogrametría aérea, sino que también abren nuevas puertas para la investigación y la aplicación de esta tecnología en diversas disciplinas. Esta interpretación subraya la importancia de la investigación y su potencial para generar avances significativos en la ciencia y la tecnología geoespacial.

## 5. Conclusiones

Una vez discutidos los resultados de esta investigación basada en la fotogrametría aérea para la creación de modelos 3D destinados a diversas aplicaciones, es posible formular conjeturas que podrían tener un impacto significativo en el propósito del estudio. Los resultados sugieren que esta técnica es altamente efectiva en la representación de edificios con un nivel de detalle impresionante, lo que podría revolucionar la experiencia del usuario en aplicaciones de realidad virtual relacionadas con la arquitectura y el urbanismo. Esto abre la puerta a un mundo de posibilidades para la visualización y la interacción en entornos virtuales, permitiendo a los usuarios explorar y comprender mejor los espacios construidos. Además, la comparación de los resultados con investigaciones previas en la introducción respalda la validez de este enfoque y destaca su relevancia en el contexto de la fotogrametría y la realidad virtual.

En el análisis de los resultados, es evidente que esta investigación ha logrado un avance significativo en la representación de los bloques de la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales, superando las limitaciones previas en cuanto a precisión y detalle. Este logro tiene implicaciones profundas en el propósito del estudio, ya que ofrece la posibilidad de mejorar la percepción y comprensión de la arquitectura y el espacio a través de técnicas especializadas. En última instancia, estos hallazgos subrayan el alcance y el impacto potencial de la investigación en la comunidad académica, abriendo nuevas oportunidades para el diseño y la visualización de espacios construidos de manera más inmersiva y detallada.

## 6. Referencias

1. Información a partir de imágenes: visión científica y agenda de investigación del ISPRS. <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.unal.edu.co/science/article/pii/S092427161500218X?via%3Dihub>
2. Hacia un marco teórico unificado para la fotogrametría. <https://www-tandfonline-com.ezproxy.unal.edu.co/doi/full/10.1080/10095020.2020.1730712?scroll=top&needAccess=true&role=tab>
3. Yohannes Firzal. (2021). Fotogrametría arquitectónica: un método de adquisición de imágenes de bajo costo para documentar el entorno construido. *Revista GEOMATE*, 20 (81), 100–105. Obtenido de <https://geomatejournal.com/geomate/article/view/207>
4. Mediciones de deformación no destructivas y evaluación de grietas de estructuras de hormigón mediante fotogrametría de corto alcance. ht-

- [tps://www-sciencedirect-com.ezproxy.unal.edu.co/science/article/pii/S2590123023001858?via%3Dihub](https://www-sciencedirect-com.ezproxy.unal.edu.co/science/article/pii/S2590123023001858?via%3Dihub)
5. Aplicación de fotogrametría de vehículos aéreos no tripulados para medir las dimensiones de elementos estructurales en construcciones tradicionales de madera. <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.unal.edu.co/science/article/pii/S0263224119312539?via%3Dihub>
  6. Análisis de comparación de rendimiento del software de modelado de reconstrucción 3D en visualización y mapeo de sitios de construcción. <https://journals-sagepub-com.ezproxy.unal.edu.co/doi/10.1177/14780771211066876>
  7. <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.unal.edu.co/science/article/pii/S0924271609001403?via%3Dihub>
  8. <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.unal.edu.co/science/article/pii/S0924271614000100?via%3Dihub>
  9. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/363283>
  10. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fbuil.2023.1206947/full>
  11. <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/21/9966>
  12. <https://link-springer-com.ezproxy.unal.edu.co/article/10.1007/s40996-017-0080-1>
  13. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926580514000193?via%3Dihub>
  14. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8682048>
  15. [https://scholar.google.com/scholar\\_lookup?title=A+systematic+review+of+unmanned+aerial+vehicle+application+areas+and+technologies+in+the+AEC+domain&author=Albeaino,+G.&author=Gheisari,+M.&author=Franz,+B.W.&publication\\_year=2019&journal=J.+Inf.+Technol.+Constr.&volume=24&pages=381%E2%80%93405&doi=10.36680/j.itcon.2019.020](https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=A+systematic+review+of+unmanned+aerial+vehicle+application+areas+and+technologies+in+the+AEC+domain&author=Albeaino,+G.&author=Gheisari,+M.&author=Franz,+B.W.&publication_year=2019&journal=J.+Inf.+Technol.+Constr.&volume=24&pages=381%E2%80%93405&doi=10.36680/j.itcon.2019.020)
  16. [https://scholar.google.com/scholar\\_lookup?title=UAV-based+urban+structural+damage+assessment+using+object-based+image+analysis+and+semantic+reasoning&author=Fernandez+Galarreta,+J.&author=Kerle,+N.&author=Gerke,+M.&publication\\_year=2015&journal=Nat.+Hazards+Earth+Syst.+Sci.&volume=15&pages=1087%E2%80%931101&doi=10.5194/nhess-15-1087-2015](https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=UAV-based+urban+structural+damage+assessment+using+object-based+image+analysis+and+semantic+reasoning&author=Fernandez+Galarreta,+J.&author=Kerle,+N.&author=Gerke,+M.&publication_year=2015&journal=Nat.+Hazards+Earth+Syst.+Sci.&volume=15&pages=1087%E2%80%931101&doi=10.5194/nhess-15-1087-2015)
  17. <https://www.mdpi.com/2220-9964/9/1/14>
  18. [https://scholar.google.com/scholar\\_lookup?title=Meshing%20and%20simplification%20of%20high%20resolution%20](https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Meshing%20and%20simplification%20of%20high%20resolution%20)

- urban%20surface%20data%20for%20UAV%20path%20plan-  
ning&journal=J.%20Intell.%20Robot.%20Syst.&doi=10.1007%-  
2Fs10846-010-9478-8&volume=61&issue=1&pages=169-180&publi-  
cation\_year=2011&author=Adolf%2CFM&author=Hirschm%C3%B-  
Cller%2CH
19. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352409X16305661?via%3Dihub>
  20. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0191814114002429?via%3Dihub>
  21. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926580519306545?via%3Dihub>
  22. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926580517301929?via%3Dihub>
  23. [https://scholar.google.com/scholar\\_lookup?title=Modeling+and+deterioration+mapping+of+fa%C3%A7ades+in+historical+urban+context+by+close-range+ultra-lightweight+UAVs+photogrammetry&author=Russo,+M.&author=Carnevali,+L.&author=Russo,+V.&author=Savastano,+D.&author=Taddia,+Y.&publication\\_year=2019&journal=Int.+J.+Archit.+Herit.&volume=13&pages=549%E2%80%93568&doi=10.1080/15583058.2018.1440030](https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Modeling+and+deterioration+mapping+of+fa%C3%A7ades+in+historical+urban+context+by+close-range+ultra-lightweight+UAVs+photogrammetry&author=Russo,+M.&author=Carnevali,+L.&author=Russo,+V.&author=Savastano,+D.&author=Taddia,+Y.&publication_year=2019&journal=Int.+J.+Archit.+Herit.&volume=13&pages=549%E2%80%93568&doi=10.1080/15583058.2018.1440030)
  24. <https://www.mdpi.com/2072-4292/10/7/1148>
  25. [https://scholar.google.com/scholar\\_lookup?title=Use+of+active+learning+for+earthquake+damage+mapping+from+UAV+photogrammetric+point+clouds&author=Xu,+Z.&author=Wu,+L.&author=Zhang,+Z.&publication\\_year=2018&journal=Int.+J.+Remote+Sens.&volume=39&pages=5568%E2%80%93595&doi=10.1080/01431161.2018.1466083](https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Use+of+active+learning+for+earthquake+damage+mapping+from+UAV+photogrammetric+point+clouds&author=Xu,+Z.&author=Wu,+L.&author=Zhang,+Z.&publication_year=2018&journal=Int.+J.+Remote+Sens.&volume=39&pages=5568%E2%80%93595&doi=10.1080/01431161.2018.1466083)
  26. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926580518300165?via%3Dihub>
  27. <https://www.mdpi.com/2072-4292/15/11/2856>
  28. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452321620308295>
  29. <https://www.mdpi.com/1424-8220/15/7/15520>
  30. <https://www.mdpi.com/2504-446X/3/4/79>
  31. <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85060135062&origin=inward&txGid=eff837ecf16caff-0661d9a80dbdefda2>

**Diagramación y diseño:**

Chako Hernández  
Correo: [contactochako@gmail.com](mailto:contactochako@gmail.com)  
Cel: +57 312 440 5897  
<https://www.behance.net/chako>

Este libro fue diagramado utilizando fuentes tipográficas Georgia en sus respectivas variaciones a 10 puntos para el contenido y para títulos a 20 pts.

**Diseño de portada:**

Las imagen de esta publicación fue generada con el apoyo de herramientas de inteligencia artificial [OpenAI - ChatGPT].

Impreso en el mes de agosto de 2024.  
100 ejemplares

**EF Business Outsourcing SAS**

Carrera 10 D 23 26 Sur  
Bogotá, Cundinamarca  
Colombia  
Cel: (+57) 310 774 012



En esta quinta entrega de la Colección Gestión, Ciencia y Poder Aeroespacial, se presentan los avances más recientes y trascendentales de Colombia en los campos científico y tecnológico, con un enfoque especial en la investigación y exploración espacial. Este volumen recoge las investigaciones destacadas de la Semana Universitaria EMAVI 2023, reflejando el rigor y compromiso académico de las ponencias.

Se abordan temas cruciales como la protección de comunidades vulnerables ante amenazas volcánicas mediante observaciones remotas, la integración de herramientas digitales en la enseñanza de modelos dinámicos en álgebra booleana y el impacto transformador de la inteligencia artificial. Además, se destacan innovaciones en el diseño de simuladores y el lanzamiento de nanosatélites, evidenciando el ingenio continuo en el sector aeroespacial.

Este libro no solo documenta el presente, sino que inspira a futuros investigadores, fomentando alianzas estratégicas que posicionan a Colombia en la vanguardia de la exploración espacial y el desarrollo tecnológico.

**FUERZA AÉREA  
COLOMBIANA**



**ASÍ SE VA A LAS  
ESTRELLAS**



ISBN: 978-628-96090-2-8

