



**ANÁLISIS DEL USO DE ROBOTS Y DRONES EN EL MANTENIMIENTO
AERONÁUTICO
ANÁLISIS DOCUMENTAL**

Jesús David Gómez Correa.

Jesus.gomez047@pascualbravo.edu.co

**INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO
FACULTAD DE INGENIERÍA
MEDELLÍN 2025**

Tradición - Transformación - Innovación



SC 7134-1



Resolución 012512 del MEN. 29 de junio de 2022 - 6 años.
Calle 73 No. 73A - 226, Vía El Volador
Apartado aéreo: 6564 / Línea única de atención: 604 448 0520 / Medellín - Colombia



Alcaldía de Medellín
Distrito de
Ciencia, Tecnología e Innovación

**ANÁLISIS DEL USO DE ROBOTS Y DRONES EN EL MANTENIMIENTO
AERONÁUTICO**

ANÁLISIS DOCUMENTAL

Jesús David Gómez Correa.

Jesus.gomez047@pascualbravo.edu.co

**INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO
FACULTAD DE INGENIERÍA
MEDELLÍN 2025**

**ANÁLISIS DEL USO DE ROBOTS Y DRONES EN EL MANTENIMIENTO
AERONÁUTICO**

ANÁLISIS DOCUMENTAL

JESÚS DAVID GÓMEZ CORREA.

**Trabajo de grado tipo monografía para optar al título de Tecnología en Gestión
del Mantenimiento Aeronáutico**

Asesor:

ING. BENJAMÍN GONZÁLEZ JARAMILLO

**INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA
MEDELLÍN, 2025**

DEDICATORIA

A mis padres amados, por ser la fuerza que sostuvo cada paso de este camino. Por ser esa compañía incondicional, por las palabras de aliento en los momentos de cansancio y por recordarme siempre el valor de la perseverancia para lograr cada paso en la vida. Este logro es también suyo, porque su amor, su fe en mí, el ser mis compañeros de camino y su apoyo constante fueron el impulso que me permitió alcanzar esta meta.

AGRADECIMIENTOS

A la Institución Universitaria Pascual Bravo, por brindarme el conocimiento y las bases necesarias para avanzar en mi formación educativa superior. Cada aprendizaje adquirido durante la tecnología ha sido fundamental para avanzar en mi desarrollo personal y profesional.

A mi asesor, Benjamín González Jaramillo, por su valiosa guía, su orientación práctica y precisa, y por acompañar con compromiso y claridad cada etapa de este proceso académico. Su apoyo fue esencial para culminar con éxito esta monografía.

CONTENIDO

RESUMEN	10
ABSTRACT	11
1. INTRODUCCIÓN	12
2. IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	14
3. JUSTIFICACIÓN.....	16
4. OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO	18
4.1 Objetivo general.....	18
4.2 Objetivos específicos.....	18
5. REFERENTES TEÓRICOS	19
5.1 La robótica y los drones como tecnologías emergentes.....	19
5.2 Mantenimiento aeronáutico y automatización tecnológica	21
6. METODOLOGÍA.....	24
6.1 Técnica de análisis documental	24
6.2 Fases de la investigación	25
7. RESULTADOS.....	27
7.1 A modo de introducción.....	27
7.2 Tecnologías de robótica y drones aplicadas al mantenimiento aeronáutico en América Latina	30

7.3 Implicaciones técnicas y operacionales de la robótica y los drones en el mantenimiento aeronáutico	36
7.4 Tendencias futuras del uso de robótica y drones en el mantenimiento aeronáutico en América Latina	43
CONCLUSIONES	49
BIBLIOGRAFÍA	52

LISTA DE ESPECIALES

Tabla 1	Criterios de inclusión y exclusión de la información.....	25
Tabla 1	Matriz de análisis documental.....	27
Tabla 2	Países interés del estudio.....	28

RESUMEN

La presente monografía tiene como propósito identificar los avances investigativos y las buenas prácticas en el uso de robots y drones en el mantenimiento aeronáutico en América Latina entre 2014 y 2024, mediante un análisis documental de enfoque cualitativo. A partir de una revisión sistemática de tesis, artículos científicos y publicaciones indexadas, se describen las principales tecnologías de robótica y drones aplicadas al mantenimiento aeronáutico; se analizan sus implicaciones técnicas y operacionales; y se exploran las tendencias futuras en su adopción dentro del contexto de los países latinos.

Se evidencia una limitada producción académica y científica en revistas o bases de datos indexadas o repositorios de universidades que se articularan al interés investigativo. Los estudios tienden a centrarse en otras áreas como lo son la agricultura, la vigilancia industrial, la seguridad o temas de topografía, más que al mantenimiento aeronáutico. Sin embargo, se identificaron avances significativos en países como Brasil, México y Colombia, por citar ejemplos, donde existen tesis o artículos que se centran en el uso de vehículos aéreos no tripulados (UAV) y sistemas robóticos en tareas de inspección, mantenimiento predictivo y monitoreo estructural de aeronaves. En estos textos se muestran progresos en materia de automatización de procesos, eficiencia operativa y seguridad en las operaciones aeronáuticas.

Se concluye que existen brechas investigativas y de aplicación de esta tecnología en América Latina; sin embargo, se evidenciaron múltiples publicaciones en otros medios como blogs o páginas de instituciones, especialmente, artículos informativos que demuestran interés creciente por la innovación, la digitalización y la integración de esta tecnología en la industria aeronáutica, más desde un análisis prospectivo de competitividad.

Palabras claves: Mantenimiento aeronáutico, Robots, Drones, América Latina, Innovación tecnológica

ABSTRACT

The purpose of this monograph is to identify research advances and best practices in the use of robots and drones for aircraft maintenance in Latin America between 2014 and 2024, through a qualitative documentary analysis. Based on a systematic review of theses, scientific articles, and indexed publications, the study describes the main robotic and drone technologies applied to aircraft maintenance; analyzes their technical and operational implications; and explores future trends in their adoption within the context of Latin American countries.

The findings reveal limited academic and scientific production in journals, indexed databases, or university repositories aligned with this research interest. Most studies tend to focus on other areas, such as agriculture, industrial surveillance, security, or topography, rather than on aircraft maintenance. However, significant advances were identified in countries such as Brazil, Mexico, and Colombia, among others, where theses and articles address the use of unmanned aerial vehicles (UAVs) and robotic systems in aircraft inspection, predictive maintenance, and structural monitoring tasks. These works highlight progress in process automation, operational efficiency, and safety in aeronautical operations.

It is concluded that there are research and application gaps regarding this technology in Latin America; nevertheless, numerous publications were found in other media such as blogs or institutional websites—particularly informative articles—reflecting a growing interest in innovation, digitalization, and the integration of such technologies in the aeronautical industry, mainly from a prospective analysis of competitiveness.

Keywords: Aircraft maintenance, Robots, Drones, Latin America, Technological innovation.

1. INTRODUCCIÓN

En un mundo globalizado e interconectado, el transporte aéreo es crucial ya que aporta al desarrollo económico y social de América Latina. Al realizar un análisis desde el punto de vista estratégico de su importancia, a parte del desarrollo económico y comercial, en donde la exportación y la importancia son un tema fundamental en el sistema económico actual, así como el crecimiento turístico y la atracción de inversión extranjera (CEPAL, 2017; ICAO, 2022), también contribuye a la integración territorial y la conectividad entre territorios, impactos en temas de logística y seguridad nacional y a temas como la innovación y la sostenibilidad (IATA, 2023).

En países como Colombia, el sector genera 15.5 mil millones de dólares de contribución al Producto Interno Bruto-PIB, que constituye el 4.3% de su total, así como la generación de 921 mil empleos (IATA, 2023). Sin embargo, a pesar de ser considerado el transporte más seguro del mundo, según Asociación Nacional de Transporte Aéreo-IATA, referenciada anteriormente, la accidentalidad para el 2023 de un avión está en una tasa de 1 por cada 1.26 millones de vuelo, mejorando en 1.30 puntos a la relación al año 2022, igual que el promedio de cinco años de posible accidente por cada 880.293 vuelos. Según las estadísticas el sector está llamado a renovar y mejorar las estrategias de prevención y disminución del riesgo, ya que a pesar de las estadísticas un solo accidente representa altos costos ambientales, económico y especialmente humano, solo por nombrar algunos.

Ahora bien, desde esta perspectiva los factores seguridad y operatividad aérea se erigen como puntos focales, debido al crecimiento exponencial del tráfico aéreo como lo señala el estudio realizado por Airbus en el 2021, que hace la predicción de una demanda de 39.000 nuevos aviones comerciales y cargueros en los próximos 20 años (world aviation Ato, 2021), lo que el mantenimiento es crucial para lograr estándares altos de calidad en el sector, pero también incrementar las tasas de seguridad y disminución del riesgo. Si algo dejó de legado la pandemia COVID-2019, es la innovación tecnológica constante en los diferentes sectores como factor crucial de bienestar.

Tomando en cuenta lo anterior, las innovaciones tecnológicas para el sector están llamadas a orientarse a indicadores como calidad, tiempo, seguridad y costos. En este contexto y dada la evolución tecnológica constante, la automatización mediante usos de dispositivos como los drones y los robots constituyen para la industria aeronáutica un avance hacia modelos estándares de mejoramiento continuo en los procesos y los procedimientos. A la par, promueve avances en el área de la ingeniería aérea, trascendiendo de la aplicabilidad exclusiva en el sector y aportando así también al sostenimiento ambiental. Sin embargo, el costo es alto, por eso es necesario conocer y profundizar sobre investigaciones y buenas prácticas en este campo.

Es precisamente en este interés este trabajo de grado tipo monográfico, en hacer una indagación documental analítica del uso de robots y drones en el mantenimiento aeronáutico en América Latina en los últimos diez años, periodo marcado por un tránsito temporal en el que las exigencias propias de un contexto particular de pandemia, marco hitos importante en diferentes sectores en el antes y el después, con la aparición de múltiples exigencias producto de los retos generados en las transformaciones de las operaciones y en la dinámica del mercado en general, impulsando innovaciones en la industria aeronáutica.

2. IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Los diferentes sectores de la economía y las industrias que hacen parte de la aeronáutica están en constante búsqueda de la implementación de estrategias que aumenten la productividad y los diferentes indicadores asociados con la calidad y las buenas prácticas. Entre esos ítems está el mantenimiento y la inspección a las aeronaves con el fin de un sector con índices crecientes en seguridad y operatividad. No obstante, los costos y el tiempo son significativos, de allí la necesidad de apoyarse en innovaciones tecnológicas que bajen costes y aumenten beneficios.

Diferentes estudios evidencian casos exitosos en la implementación de robots y drones en el mantenimiento de la industria aeronáutica, destacando entre otras cosas, la reducción de tiempo de inactividad y mayor precisión en acciones de inspección y vigilancia, entre ellos están Smith y Lee (2018) que indagaron sobre la aplicación de drones con cámaras de alta resolución y sensores térmicos en el mantenimiento de aeronaves; o Kumar y Patel (2020) quienes presentaron un caso exitoso del uso de cobots, es decir, robots colaborativos, en el mantenimiento de motores aeronáuticos.

Ambos estudios, evidencian la industria potencial transformadora basada en robots y drones para la aeronáutica. No obstante, al mirar a nivel Latinoamérica, no se evidencia mayor dinamismo en este campo, ya que relativamente se ha limitado su implementación, sugiriendo así, como lo nombran Pérez y Rodríguez (2021) barreras asociadas a temas de infraestructura tecnológica, poco desarrollo de la investigación en este campo en estos países y limitaciones legislativas para avanzar al respecto. Por tanto, se hace necesario indagar por las investigaciones y experiencias exitosas en el uso de drones y robots en la aeronáutica en el América Latina, que repercute en mejoramiento del hacer profesional y en la búsqueda de la reducción de brechas de conocimiento sobre la implementación y los impactos que ha tenido este desarrollo en la última década en Latinoamérica, de allí que surja la pregunta:

¿Cuáles son los avances investigativos y las buenas prácticas identificados en el uso de robots y drones en el mantenimiento aeronáutico en América Latina durante la década de 2014 a 2024?

3. JUSTIFICACIÓN

Esta investigación se justifica en la necesidad creciente del perfeccionamiento de los avances, retos y limitaciones en relación con los estudios que se han hecho y la publicación de buenas prácticas con el uso de robots y drones en el mantenimiento aeronáutico en América Latina en los últimos años. Por una parte, debido al aceleramiento de los avances tecnológicos en cuanto a estos dispositivos, lo otro por la fragilidad que evidenciaron los diferentes sectores de la economía después de la pandemia, que mostró una necesidad urgente de la aplicación de estrategias innovadoras que generan menores costos e incremento de la productividad, la eficiencia, la eficacia, la efectividad, en general, de los estándares de calidad en el mantenimiento de las aeronaves.

Ahora bien, realizar un análisis documental, pretende contribuir a los estudios de conocimiento existente en esta área, con un estudio de las estrategias que se emplean en la reducción de los costes operativos y la seguridad en el mantenimiento, ya que se ha dependido de métodos de mantenimiento convencionales para realizarlo. Además, que la incorporación de tecnologías emergentes como los robots y los drones, han evidenciado impactos positivos en estudios realizados en otros países (Smith & Lee, 2018; Kumar & Patel, 2020).

Teóricamente, se contribuye a consolidar el conocimiento en el campo. Metodológicamente posibilita ampliar la perspectiva crítica en el análisis documental para la revisión de investigaciones sobre tecnologías emergentes especialmente drones y robots en mantenimiento aeronáutico, sentando un precedente para futuros estudios comparativos en América Latina y promoviendo la consolidación de conocimiento en torno a la automatización y digitalización del sector.

Desde una perspectiva social y práctica, se ofrece insumos relevantes en el campo de la Tecnología en Gestión del Mantenimiento Aeronáutico, en el que se proporciona un panorama actualizado sobre el uso de robots y drones en América Latina. Por tanto, los resultados no solo benefician a profesionales y estudiantes del área, sino que también aportan beneficios indirectos a las aerolíneas y empresas de mantenimiento, al facilitar la optimización de operaciones, la mejora de la competitividad y la reducción de costos asociados al mantenimiento. A su vez, estos avances repercuten en los pasajeros y usuarios del transporte aéreo, al contribuir al fortalecimiento de los estándares de seguridad, eficiencia y confiabilidad en la operación aeronáutica.

4. OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO

4.1 Objetivo general

Identificar los avances investigativos y buenas prácticas en el uso de robots y drones en el mantenimiento aeronáutico en América Latina, entre la década de 2014 a 2024 a partir de un análisis documental.

4.2 Objetivos específicos

Describir las principales tecnologías de robótica y drones aplicadas al mantenimiento aeronáutico en América Latina, resaltando sus características y funcionalidades.

Analizar las implicaciones técnicas y operacionales de la implementación de estas tecnologías en el mantenimiento aeronáutico.

Explorar las tendencias futuras en el uso de robots y drones para el mantenimiento aeronáutico en América Latina.

5. REFERENTES TEÓRICOS

Con el fin de responder a lo que busca esta investigación, este marco teórico se en dos apartados principales. Inicialmente, la robótica y los drones como tecnologías emergentes, donde se explora sus aplicaciones actuales y potenciales en la aeronáutica. El segundo, mantenimiento aeronáutico y la automatización tecnológica, que explora cómo estas herramientas han transformado los procesos tradicionales y la gestión de la operación de aeronaves.

5.1 La robótica y los drones como tecnologías emergentes

La robótica y los sistemas de drones se estipula como uno de los campos tecnológicos más dinámicos y transformadores en la actualidad. De allí, que en estudios como los de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe- CEPAL (2020) y los del Banco de Desarrollo de América Latina y el Caribe- CAF (2023), reconocen que tanto la robótica, como los drones y el proceso de automatización, se constituyen en tecnologías estratégicas para el desarrollo productivo de la región, el avance productivo sostenible, la innovación industrial y la transformación estructural en diversos sectores entre los que se encuentra la aviación.

Por tanto, desde una perspectiva teórica, en este campo se integra nociones referentes a la mecánica, la electrónica y la informática, que se orientan en el diseño, el control y la automatización de máquinas diseñadas para llevar a cabo tareas de forma autónoma o asistidas por el ser humano. En sus fundamentos, la robótica se interpreta como la ciencia y la tecnología que se aborda el estudio, diseño, desarrollo y utilización de robots. Autores como Craig (2005) expone que los principios mecánicos y de control se establecen como los pilares que provee el marco teórico necesario para analizar el desempeño de los manipuladores industriales, comprender la interacción entre sensores y actuadores, y optimizar los sistemas de control que aseguran movimientos precisos y consistentes.

Ahora bien, la teoría de Craig provee los fundamentos para comprender la evolución tecnológica y el funcionamiento de otros sistemas robóticos con mayor complejidad, en este caso los drones. De esta forma, la evolución tecnológica de los drones, es entendida como la aplicación masiva y especializada de los principios fundamentales de la robótica, combinados con avances en sensorica, computación y miniaturización. Tomando en cuenta esto, la evolución de la robótica ha estado caracterizada por la integración de múltiples disciplinas, entre las que se destacan la Inteligencia artificial (IA), la visión por computador y la mecatrónica, esto ha posibilitado mayor flexibilidad en la industria de los robots, ya que inicialmente los sistemas eran rígidos, pero actualmente es posible tener sistemas colaborativos y autónomos que tienen la capacidad de aprender y adaptarse.

Posteriormente, Siciliano y Khatib (2016), abordan con mayor profundidad y exhaustiva la evolución de robótica, que van desde los fundamentos teóricos hasta las aplicaciones más avanzadas para este tipo de tecnología, entre los que se incluye los sistemas humanoides, la robótica móvil, la interacción hombre-robot y los robots de servicios, resaltando como el paradigma de la industria 4.0 a propiciado que el desarrollo reciente se guíe hacia la creación de robots inteligentes e interconectados.

Para Siciliano y Khatib, los robots se clasifican según estructura entre las que están cartesianos, cilíndricos, esféricos, SCARA, antropomórficos; por su aplicación, es decir, industriales, de servicio, móviles, médicos, educativos, militares; o por su nivel de autonomía entre los que se encuentra teleoperados, semiautónomos y autónomos. La anterior clasificación evidencia el nivel de especialización y la capacidad de adaptabilidad de los sistemas robóticos para ser adaptados a distintos entornos.

En cuanto a la robótica aérea o tecnología de drones ha experimentado un notable auge en las actuales sociedades, gracias a su adaptabilidad y a su capacidad para operar en entornos complejos o potencialmente peligrosos. Floreano y Wood (2015) argumentan que los drones pequeños autónomos se constituyen en una tecnología transformadora cuya evolución futura esta sujeta en la superación de grandes desafíos inspirados en la naturaleza.

Lo anterior, es explicado por Floreano y Wood a que los microvehículos aéreos (MAVs) están inspirados en la biología de los insectos, que implica el desarrollo de formas, estructuras o configuraciones de vuelo más ágiles, sistemas de percepción y procesamiento eficientes en consumo energético que imiten el funcionamiento de los cerebros precisamente de los insectos, que se encarga de controlar la visión y las funciones superiores, de procesar la información a través de las antenas y de coordinar la información sensorial y el aparato bucal, unido con mecanismos de coordinación colectiva en enjambres orientados a la ejecución de tareas complejas. Superar desafíos referidos a la integración, la autonomía y el uso de la energía, posibilitará que los drones sea una tecnología ubicua que configurará la forma en que las máquinas interactúan con entornos cambiantes de esta forma se generará eficiencia, seguridad y nuevas posibilidades de innovación tecnológica.

5.2 Mantenimiento aeronáutico y automatización tecnológica

El mantenimiento aeronáutico se constituye en las bases que sustenta la seguridad operacional en la aviación. Se comprende como un conjunto de actividades, procedimientos y técnicas que se hacen de manera rigurosa, regulada y sistemática para garantizar que las diferentes aeronaves estén en las condiciones óptimas y seguras para prestar su uso. Por tanto, se entremezclan en ello la tripartita de seguridad ocupacional, eficiencias económica y confiabilidad técnica. Siguiendo lo estipulado por la La Federal Aviation Administration - FAA (2021) tradicionalmente se encuentra como clasificación de mantenimiento en preventivas, correctivas y predictivas; no obstante, los avances tecnológicos han permitido impulsar la innovación en este campo hacia modelos de mantenimiento automatizado, digitalizado y sustentado en datos.

Asimismo, La FAA (2022-2023) destaca que la integración de tecnologías emergentes tales como la robótica, los sistemas de drones y la inteligencia artificial, han aportado avances importantes en las operaciones de Maintenance, Repair and Overhaul - MRO, es decir, el ciclo de vida completo de la gestión técnica de una aeronave, en cuanto a tiempo

de respuesta, aumento de la precisión de fallas, ya sea estructurales o de superficie de las aeronaves y reducción de costos operativos. Complementariamente, la Administración Federal de Aviación enfatiza en la incorporación de sistemas aéreos no tripulados, en estas actividades de gestión operativa, facilita la inspección visual remota en zonas que se establecen como de difícil acceso, mejorando la seguridad del personal y la optimización del proceso.

En consonancia con lo anterior, desde una perspectiva global, la Organización de Aviación Civil Internacional - ICAO (2024) ha estimulado políticas enfocadas en innovación desde la sostenibilidad tecnológica en el sector, en el que componentes como la automatización y la digitalización son fundamentales en el Sistema de Gestión de la Seguridad Operacional (SMS) y por ende, en la modernización de la industria aérea. Por lo tanto, la ICAO enfatiza como la adopción de tecnologías inteligentes en el campo aeronáutico contribuye a disminuir los índices de riesgos laborales, el consumo de energía no renovable, materiales contaminantes que son empleados en el mantenimiento tradicional y al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

Ahora bien, Los Objetivos de Desarrollo Sostenible son un marco que busca orientar acciones mancomunadas entre las acciones de los Estados, las empresas y la sociedad civil para sentar las bases de un futuro posible que sea sostenible, incluso y equitativo para el año 2030, adoptado por 193 países entre los que se incluye Colombia (ONU, 2015). Explícitamente en el sector aeronáutico aplican los ODS 7 Energía asequible y no contaminante; ODS 8 Trabajo decente y crecimiento económico; ODS 9 Industria, innovación e infraestructura; ODS 12 Producción y consumo responsables; y ODS 17 Alianzas para lograr los objetivos. De forma general, estos ODS para la industria aeronáutica promueven la innovación tecnológica, la eficiencia energética y la reducción del impacto ambiental, potenciando la eficiencia y el desarrollo sostenible del ámbito aéreo.

Llevado al contexto latinoamericano, el mantenimiento aeronáutico relacionada con la automatización tecnológica ha experimentado un avance de la industria aeroespacial y de transporte aéreo, en el que se resaltan países como Brasil, México, Chile y Colombia con sus certificaciones internacionales (FAA, EASA, DGAC, entre otras.) (Bjerregaard, 2022) que se han consolidado como referentes de mantenimiento, reparación y revisión. Transformaciones que se enlazan con los procesos de transformación digital y modernización industrial incentivados por organismos internacionales referentes como la Comisión Económica para América Latina y el Caribe y el Banco de Desarrollo de América Latina (CEPAL, 2020; CAF, 2023).

En síntesis, las transformaciones en los procesos asociados al mantenimiento aeronáutico revelan que la gestión tecnológica se orienta hacia lograr una sinergia entre sostenibilidad, automatización y digitalización donde la presencia de la robótica y de los drones se constituye en estratégicos para incrementar los niveles de resultados optimizando recursos, tiempo o energía, a la vez que se redefine los estándares asociados a la seguridad y la eficiencia con la apertura de nuevas oportunidades para la investigación, el desarrollo y la innovación en el ámbito aeronáutico latinoamericano.

6. METODOLOGÍA

Al realizar un trabajo de grado sobre la identificación de los avances investigativos y buenas prácticas en el uso de robots y drones en el mantenimiento aeronáutico en América Latina, entre la década de 2014 a 2024, se parte del reconocimiento de avances en el área que requieren ser reconocidos porque aportan al propósito y el mejoramiento continuo de los estándares de calidad en el sector. Por lo tanto, se utiliza una metodología cualitativa de análisis documental basado en la consulta de fuentes secundarias indexadas, es decir, que hagan parte de una lista o base de datos organizada que permite la búsqueda, clasificación y acceso sistematizado a la información.

6.1 Técnica de análisis documental

Ahora bien, el análisis documental dentro de la investigación de corte cualitativo implica como técnica la revisión sistemática de textos, documentos y todas las fuentes secundarias por medio de un ejercicio interpretativo-analítico para extraer significados, identificar tendencias y construir significados a partir de lo encontrado (Sampieri et al., 2014). Por tanto, el rol del investigador es la aplicación de una comprensión analítica relacionada con su objeto de investigación, que le permita acceder a información de corte histórico, cultural e institucional. Por tanto, la tripartita y selección, evaluación e interpretación son claves para facilitar la triangulación de los datos, el análisis de la información y así contribuir a robustecer metodológicamente este trabajo de grado.

Igualmente, Sampieri et al. (2014) enfatiza en que el valor del análisis documental reside en la integración de diversas perspectivas de investigación, tipos de estudio y evidencias, que resultan claves para abordar fenómenos complejos, en este caso los avances que se ha tenido con el uso de los drones y los robots en el sector aeronáutico en América Latina. Además, fortalece el saber teórico crítico del investigador, ya que accede constantemente a otros documentos, relatos más complejos, y aplicaciones tanto prácticas

como teóricas del saber, que amplía su visión profunda y contextualizada sobre su tema de interés de forma sistemática e intencionada.

6.2 Fases de la investigación

Por tanto, en el desarrollo de la metodología se tienen en cuenta las siguientes fases:

Fase 1: Definición de criterios de selección de información.

Es necesario para el cumplimiento del objetivo de la investigación establecer criterios claros, en relación con la delimitación y enfoques de los estudios, calidad y confiabilidad, transparencia y replicabilidad y optimización de análisis. Por tanto, se tienen los siguientes criterios de inclusión y exclusión de los estudios tomando como referencia lo estipulado por Sampieri et al. (2014) para su elaboración:

Tabla 1 Criterios de inclusión y exclusión de la información

Criterios de inclusión	Criterios de exclusión
Fuentes durante el periodo 2014-2024.	Fuentes publicadas fuera del periodo 2014-2024.
Fuentes investigativas y académicas de avances y buenas prácticas con uso de robots y/o drones en el mantenimiento aeronáutico o en procesos relacionados dentro de la industria aeronáutica.	Documentos que no traten directamente el uso de robots y drones en el mantenimiento aeronáutico, o que se enfoquen en sectores o aplicaciones distintas a la industria aeronáutica o que aborden de manera general el uso de las tecnologías en este sector.
Investigaciones que se enfoquen en América Latina.	Investigaciones que se realizan fuera de América Latina.
Los documentos deben ser: de revistas indexadas, informes técnicos, tesis, monografías, disertaciones, libros, documentos de organismos nacionales e internacionales reconocidos en el ámbito aeronáutico o tecnológico.	Publicaciones generales que no profundizan en el tema o sin respaldo académico.
Presentados en idioma español, inglés o portugués.	Fuente duplicada

Nota. Elaboración propia.

Fase 2: Acopio de la información recolectada.

Se establecen tendencias en la documentación recolectada, con una clasificación clara y se cataloga el material. Elaboración de matriz de información con datos relevantes que aporten al estudio.

Fase 3. Análisis crítico de las tendencias de la información.

Se procede a hacer una análisis crítico de las tendencias de la información recolectada sobre el tema de interés en América Latina, resaltando aspectos técnicos que aporten al área de conocimiento en Tecnología en Gestión del Mantenimiento Aeronáutico y con esto responder a los objetivos de la investigación. Posteriormente, se realiza el apartado de conclusiones y recomendaciones.

7. RESULTADOS

7.1 A modo de introducción

Teniendo en cuenta que este análisis documental se centra en la identificación de los avances investigativos y buenas prácticas en el uso de robots y drones en el mantenimiento aeronáutico en América Latina durante el periodo 2014–2024, siguiendo lo establecido en la metodología se elaboró una matriz que permitió sistematizar la información clave de las fuentes, considerando aspectos como la referencia bibliográfica, año de publicación, país, tipo de documento, tecnologías descritas, características y funcionalidades, implicaciones técnicas y operacionales, buenas prácticas identificadas, tendencias futuras y observaciones del investigador, tal como se describe a continuación:

Tabla 2 Matriz de análisis documental

Ítems	Descripción
Referencia bibliográfica (APA 7)	Cita completa de la fuente para mantener el rigor académico.
Año de publicación	Permitirá ver la evolución de la investigación en el periodo 2014–2024.
País	Foco de interés es América Latina, sirve para mapear dónde se han dado los avances.
Tipo de documento	Revistas indexadas, informes técnicos, tesis, monografías, disertaciones, libros, documentos de organismos nacionales e internacionales reconocidos en el ámbito aeronáutico o tecnológico.
Tecnología descrita	Se especifica si se trata de robots, drones, o ambas, y detallar el tipo de tecnología.
Características y funcionalidades	Se describe cómo opera la tecnología, qué problemas resuelve, innovaciones relevantes.
Implicaciones técnicas y operacionales	Impacto en seguridad, costos, eficiencia, formación del personal, normatividad.
Buenas prácticas identificadas	Casos exitosos, protocolos aplicados, estándares o metodologías empleadas.
Tendencias futuras /	Usos emergentes, potencial de adopción tecnológica,

proyección	brechas por cerrar.
Observaciones	Reflexiones propias, utilidad de la fuente para los objetivos, conexiones con otras investigaciones.
Descriptor clave	Se pone el descriptor clave utilizado en el que apareció el documento en la base de datos indexadas.

Nota. Elaboración propia.

Ahora bien, en este estudio se entiende por América Latina el conjunto de países del continente americano donde predominan las lenguas derivadas del latín, específicamente el español y el portugués. Bajo este criterio lingüístico y cultural, se excluyen aquellos países cuya lengua oficial no es latina, como Haití, que utiliza el francés y el criollo haitiano, y Belice, cuya lengua oficial es el inglés y que se encuentra históricamente más vinculado al Caribe anglófono a través de organismos como la Comunidad del Caribe (CARICOM). De igual manera, se excluyen Guyana y Surinam, por ser anglófono y neerlandófono respectivamente, aunque geográficamente se encuentren en América del Sur. En muchos estudios de integración latinoamericana, por ejemplo, los que abordan Mercosur o la Alianza del Pacífico, estos países no suelen aparecer dentro del bloque central de análisis, lo que refuerza esta delimitación. Así, se privilegia la consideración de naciones hispanohablantes y lusófonas como núcleo de la identidad latinoamericana (Rojas, 2017; Bethell, 2009).

En ese sentido, se busca investigaciones de los siguientes países:

Tabla 3 Países interés del estudio

América del Sur	América Central	Caribe latino
Argentina	Costa Rica	Cuba
Bolivia	El Salvador	República Dominicana
Brasil	Guatemala	Puerto Rico
Chile	Honduras	

Colombia	México (se asume en esta tesis como Centro América Aunque es un país de Norte América).	
Ecuador		
Paraguay		Nicaragua
Perú		
Uruguay		Panamá
Venezuela		

Nota. Elaboración propia considerando los países hispanohablantes y lusófonos de América Latina.

Teniendo en cuenta lo anterior, se establecieron siguiendo los objetivos de la investigación los siguientes descriptores claves: robots en mantenimiento aeronáutico; drones en mantenimiento aeronáutico; automatización e innovación tecnológica; características y funcionalidades de robots y drones; seguridad y eficiencia operacional; capacitación y formación del personal técnico; normatividad y estándares aeronáuticos; buenas prácticas en América Latina; y tendencias y adopción de tecnologías emergentes, teniendo en cuenta que deben ser de Latinoamérica o de uno de los países listados en la tabla 2 y que sea sobre robots drones o sobre ambos en la industria aeronáutica.

Es necesario resaltar que en muchos de los países de América Latina existe documentos sobre drones/robots, pero se orientan hacia otros sectores como la agricultura, la topografía, la vigilancia y el mantenimiento industrial, aplicaciones directas a la industria aeronáutica en las que puede estar inspección de boquillas, fuselajes, tren de aterrizaje, manipulación robótica en el hangar, solo por dar unos ejemplos aparece con mayor fuerza en otras regiones como Norte América y Europa. Aunque hay interés técnico en muchas de las publicaciones la aplicación práctica en el ámbito aeronáutico latinoamericano a nivel comercial es bastante incipiente.

A continuación se presentan los resultados teniendo en cuenta los objetivos específicos que guían esta investigación.

7.2 Tecnologías de robótica y drones aplicadas al mantenimiento aeronáutico en América Latina

Describir las principales tecnologías de robótica y drones aplicadas al mantenimiento aeronáutico resulta fundamental, debido a que posibilita la comprensión del grado de innovación y modernización en el que está avanzando la industria aeronáutica en América Latina. Para ello, se va a explicar por América del Sur, América Central y el Caribe, con el fin de ser más preciso en el análisis y demostrar como ciertas regiones tienen más avance que otras, que tienen en cierta forma relación con las dinámicas internas de los países que será descrita en los otros apartados. Asimismo, aunque México aparece como parte de América del Norte, se incluye en el análisis de América Central debido a que es un país latino.

En relación con América del Sur el análisis documental reveló que los avances más representativos en la región se concentran en Chile, Colombia, Ecuador, Perú y Paraguay, en contraste con países como Venezuela, Uruguay y Panamá donde la evidencia académica y técnica específica sobre mantenimiento aeronáutico mediante robótica o drones, interés de esta monografía, es todavía limitada o inexistente, debido a que se han concentrado los esfuerzos en otras áreas como la seguridad y la industria logística.

En el caso de Chile, los trabajos de González Leyton (2021) y Sepúlveda González (2024) resaltan la implementación de drones en actividades de inspección y apoyo a mantenimiento, con aplicaciones como la revisión de estructuras altas y la captura de imágenes aéreas de alta precisión. Estos estudios también abordan el marco regulatorio chileno y la incorporación de tecnologías inspiradas en iniciativas internacionales como el Hangar of the Future de Airbus, esta última es una iniciativa de Airbus lanzada en 2016 que busca revolucionar la industria de MRO (Mantenimiento, Reparación y Revisión – Maintenance, Repair and Overhaul) mediante la integración de tecnologías digitales,

robótica, drones y la Industria 4.0. Complementariamente, Marín Vásquez (2024) amplía la mirada hacia la industria aeroespacial, explorando las condiciones estructurales, económicas y tecnológicas que condicionan la innovación en este sector para este país latino.

Para Colombia, las investigaciones se enfocan hacia el desarrollo de herramientas automatizadas y sistemas informáticos que puedan ser aplicados al mantenimiento aeronáutico. Por ejemplo, Castillo y Álvarez (2023) diseñaron un dispositivo digital de prueba automatizado para helicópteros UH-60, mientras que Vacca Rojas (2024) desarrolló una plataforma digital para la gestión automatizada del mantenimiento, demostrando la integración de software propio en los procesos de MRO (Maintenance, Repair and Overhaul o en español mantenimiento, reparación y operación). A nivel teórico, Cáceres León y Alvarado Ortega (2023) se centraron en los sistemas aéreos remotamente tripulados (RPAS) en contextos militares, aportando al entendimiento de la tecnología subyacente en el campo bélico que puede transferirse al ámbito civil.

En el país de Ecuador, se identifican avances en la automatización de sistemas aeronáuticos y el uso de drones con propósitos técnicos o formativos. Granda Gualpa (2020) automatizó un tren de aterrizaje con controladores lógicos programables (PLC), mientras que Gómez Guerra (2022) diseñó un UAV (Vehículo aéreo no tripulado) modular de carga media con aplicaciones logísticas. Además, la Universidad Central del Ecuador (2021) propuso una certificación de competencias laborales para operadores de aeronaves no tripuladas, y Gutiérrez, Quishpe y Tipantuña (2021) abordaron la regulación jurídica de los drones, revelando el paso de un uso castrense a uno civil.

Por otro lado, en Perú, se documenta una iniciativa pionera de innovación aplicada, impulsada por la Fuerza Aérea del Perú (FAP) y la Universidad Nacional de San Agustín (UNSA). Según el comunicado institucional (Gobierno del Perú & UNSA, 2024), ambas entidades desarrollan robots para mantenimiento aeronáutico, destinados a tareas de inspección y soporte técnico, lo que representa uno de los pocos proyectos de I+D regional

enfocados directamente en mantenimiento aeronáutico robótico, y que representa una oportunidad para alianzas estratégicas con otros países en el mejoramiento de este proceso.

En Paraguay, aunque no se hallaron investigaciones académicas sobre la aplicación directa de estas tecnologías al mantenimiento, la Dirección Nacional de Aeronáutica Civil (DINAC, 2018) publicó un reglamento oficial para operaciones con RPAS (Remotely Piloted Aircraft Systems en español Sistemas de Aeronaves Pilotadas a Distancia), estableciendo categorías, restricciones operativas y protocolos de autorización. Este marco normativo es un paso imprescindible para la futura adopción segura y regulada de drones en operaciones aeronáuticas, incluidas potenciales tareas de inspección o monitoreo.

En contraste, Venezuela, Uruguay y Panamá presentan escasa evidencia investigativa sobre el uso de drones o robots en mantenimiento aeronáutico. En estos países, la literatura consultada se centra mayormente en aplicaciones industriales, agrícolas o de vigilancia, sin una conexión directa con la industria aeronáutica. En síntesis, la revisión evidencia que, aunque la región avanza de manera desigual, existen experiencias valiosas y modelos replicables que pueden guiar la innovación en otros países latinoamericanos. La consolidación de lineamientos legales claros, políticas públicas, la cooperación académica- económica, la tripartita academia-Estado-Industria y la formación técnica especializada se presentan como elementos clave para el fortalecimiento de la competitividad y la sostenibilidad del sector aeronáutico regional en el marco de la transformación digital.

El análisis documental realizado en los países de Centroamérica y México permite ver un panorama heterogéneo respecto al desarrollo y aplicación de tecnologías de robótica y drones en la industria aeronáutica. En términos generales, México se posiciona como el país con mayores avances en materia de automatización, digitalización e integración de tecnologías de la Industria 4.0 al ámbito aeronáutico, mientras que en las demás naciones centroamericanas (El Salvador, Costa Rica y Panamá) los estudios y documentos analizados se orientan hacia aspectos jurídicos, educativos o operacionales, más que hacia aplicaciones concretas en el mantenimiento aeronáutico.

En el caso de México, los aportes son particularmente relevantes. Castillo Malagón y Álvarez Medina (2023) identifican que el país ha comenzado a incorporar tecnologías transversales como la inteligencia artificial (IA), el Big Data, la robótica, la realidad virtual/aumentada y los gemelos digitales en procesos de fabricación, inspección y mantenimiento aeronáutico. Los autores resaltan la utilización de drones y robots especializados conocidos como “serpientes” o “escarabajos” para labores de mantenimiento predictivo y remoto, lo que indica un punto de encuentro entre la automatización y la optimización de costos en los talleres de mantenimiento (MRO). Complementariamente, la tesis de González Suastes (2022) profundiza en la noción de Fábricas Inteligentes (Smart Factories) dentro del sector aeronáutico, recalcando cómo la robótica autónoma y el Internet de las Cosas (IoT) permiten la toma de decisiones descentralizadas y el monitoreo en tiempo real. Estas investigaciones posicionan a México como referente regional en la adopción de tecnologías emergentes aplicadas a la aviación, impulsando la eficiencia y la seguridad operacional.

Por su parte, Campos López, Juárez Ortiz y Vieyra Flores (2015) desarrollan una propuesta tecnológica aplicada para el diseño de una aplicación Android para el control remoto de drones con fines de seguridad e inspección. El enfoque no es estrictamente aeronáutico, pero el estudio evidencia un dominio técnico en el desarrollo de arquitecturas cliente-servidor y transmisión de video en tiempo real, lo que podría ajustarse a futuro al mantenimiento de aeronaves, especialmente en tareas de inspección visual a distancia.

En relación con los países centroamericanos, el panorama es más incipiente. En El Salvador, García (2021) analiza la normativa vigente sobre vehículos aéreos no tripulados (VANT), resaltando su uso en levantamientos topográficos e inspecciones estructurales ligeras, es decir, en donde se determina la forma, la ubicación y características en la medición y representación gráfica de un terreno, común en proyectos relacionados con áreas de la ingeniería, la construcción, la arquitectura o estudios del suelo. El estudio de García hace énfasis en los procedimientos operativos y de seguridad en campo. Aunque no

se identifican aplicaciones específicas al mantenimiento aeronáutico, el estudio evidencia un interés institucional en regular el uso de drones en operaciones técnicas.

En Costa Rica, los aportes se concentran en dos frentes distintos. Por un lado, Sánchez y Robinson Mora (2016) abordan el régimen jurídico de las aeronaves no tripuladas, clasificándolas según peso, tipo de operación y responsabilidades legales. Este estudio establece bases normativas claves para el uso seguro de drones en espacios aéreos controlados. Por otro lado, Murillo-Vargas (2024) presenta el rediseño del robot móvil Atta-Bot, orientado a la educación STEM. Su propósito principal es pedagógico, no obstante, esta experiencia demuestra un fortalecimiento del conocimiento técnico en diseño, programación y manipulación robótica, capacidades que eventualmente podrían transferirse a la formación de personal técnico aeronáutico en la región, constituyéndose así en una buena práctica a ser replicada.

En síntesis, el panorama de Centroamérica y México revela que, mientras México avanza hacia la integración de tecnologías de automatización e inteligencia artificial en la industria aeronáutica a grandes pasos, los demás países aún se encuentran en etapas exploratorias o normativas. En Costa Rica y El Salvador, el énfasis está en la regulación y formación técnica, más que en la aplicación directa al mantenimiento aeronáutico. Estos hallazgos confirman la asimetría tecnológica regional y la urgencia de incentivar políticas de innovación que relacionen los desarrollos académicos con las demandas reales del sector aeronáutico en Centroamérica.

En la región del Caribe, los avances relacionados con la robótica y el uso de drones en el mantenimiento aeronáutico aún son incipientes, aunque se identifican esfuerzos relevantes de investigación técnica y de automatización aeronáutica en países como Cuba y República Dominicana, no se alinean con el interés central de esta monografía y aun distan de avances analizados en otros países. Estos estudios reflejan una orientación hacia la mejora de la confiabilidad operacional y la incorporación gradual de tecnologías automatizadas, más que hacia la aplicación directa de robots o drones en las tareas de mantenimiento.

En el caso de Cuba, el trabajo de Díaz Concepción, Romero García, Cabrera Gómez y Viego Ariégo (2016), desarrollado en el Instituto Superior Politécnico José A. Echeverría (CUJAE), es uno de los aportes técnicos más representativos. El estudio realiza un análisis de confiabilidad operacional aplicado a sistemas de climatización de aeronaves IL-96-300, utilizando modelos estadísticos como la distribución de Weibull para evaluar la fiabilidad y disponibilidad de los equipos. No se aborda el uso de drones o robots de manera explícita, pero evidencia un dominio avanzado de herramientas de ingeniería y modelado predictivo, que ponen las bases metodológicas para la automatización y mantenimiento inteligente en la aviación cubana.

Por su parte, en República Dominicana se muestra un interés creciente en la automatización y en la integración de sistemas aeronáuticos avanzados. En la revista País Dominicano Temático, Reyes Colón (2019) describe los Sistemas de Aeronaves Pilotadas a Distancia (RPAS) desde una perspectiva regulatoria y técnica, explicando su configuración, clasificación por peso y riesgo operativo según estándares internacionales (OTAN y Unión Europea). Si mismo, Alcántara Sánchez (2019) profundiza en la automatización de los sistemas aeronáuticos, tanto a bordo como en tierra, donde se incluye tecnologías como piloto automático, TCAS, GPWS, Fly-by-Wire, MCAS y sistemas de control automatizado de tráfico aéreo. Estos avances muestran cómo la automatización y la robótica aeronáutica empiezan a formar parte de manera transversal en la infraestructura técnica del país, enfocándose en mejorar la seguridad, reducir errores humanos y optimizar la gestión del tráfico aéreo.

En conjunto, los hallazgos para el Caribe evidencian un nivel intermedio de desarrollo tecnológico, donde la automatización y la confiabilidad operacional se asumen como un proceso inicial hacia su incorporación de robots y drones al mantenimiento aeronáutico. No obstante, persiste una limitada producción académica y técnica especializada en la región sobre este tema específico, lo que representa una oportunidad de investigación y cooperación regional para fortalecer las capacidades en innovación aeronáutica y mantenimiento inteligente.

En síntesis, el panorama latinoamericano revela un avance gradual, diverso y contextualizado en la incorporación de tecnologías de robótica y drones al mantenimiento aeronáutico, condicionado por las capacidades económicas, industriales y normativas de cada subregión. En Sudamérica, destacan las investigaciones orientadas a la automatización y digitalización de procesos de mantenimiento, con avances significativos en el uso de drones para inspecciones técnicas y sistemas inteligentes para mantenimiento predictivo. En Centroamérica, se evidencia un mayor énfasis en el desarrollo normativo, educativo y experimental, con proyectos vinculados al diseño y aplicación de plataformas robóticas, así como en la regulación de aeronaves no tripuladas. Mientras tanto, en el Caribe, los esfuerzos se concentran en la automatización de sistemas aeronáuticos y la confiabilidad operacional, estableciendo bases metodológicas para una futura integración de tecnologías más avanzadas.

En conjunto, estos hallazgos permiten concluir que América Latina avanza hacia una modernización tecnológica progresiva en el ámbito aeronáutico, donde la robótica, la inteligencia artificial, la analítica de datos y los drones se presentan como recursos de valor estratégico para la eficiencia, la seguridad y la sostenibilidad del mantenimiento aeronáutico regional, con retos persistentes en infraestructura, inversión y desarrollo de talento especializado.

7.3 Implicaciones técnicas y operacionales de la robótica y los drones en el mantenimiento aeronáutico

El análisis de las implicaciones técnicas y operacionales de la robótica y los drones en el mantenimiento aeronáutico permite no solo identificar los beneficios derivados de su aplicación, sino también los retos que surgen en términos de infraestructura, competencias humanas, normativa y gestión del riesgo, así como buenas prácticas. Este apartado busca ofrecer una comprensión integral de cómo estas tecnologías reorganizan los procesos de mantenimiento, promoviendo una transición hacia modelos más eficientes, seguros y sostenibles en la aviación actual.

Desde la perspectiva de los desarrollos recientes en Chile, Colombia, Ecuador, Perú y Paraguay, donde la incorporación de tecnologías robóticas y drones representa tanto una oportunidad de innovación como un reto de gestión técnica, organizacional y normativa. En Chile, las investigaciones de González Leyton (2021), Marín Vásquez (2025) y Sepúlveda González (2024) resaltan como es fundamental establecer protocolos de seguridad específicos para la operación de drones en hangares y zonas restringidas, la capacitación de operadores y técnicos en interpretación de imágenes de inspección, y la necesidad de desarrollar capacidades productivas y capital humano especializado. Estas experiencias reflejan que la integración de drones en el mantenimiento aeronáutico requieren de una planificación técnica rigurosa, en el que esta inmerso la infraestructura adecuada y cumplimiento regulatorio claro.

En Colombia, los estudios de Castillo y Álvarez (2023), Vacca Rojas (2024) y Cáceres León y Alvarado Ortega (2023) evidencian la importancia de la automatización y la robótica para mejorar la eficiencia de los procesos de mantenimiento, reducir los tiempos de diagnóstico y fortalecer la autonomía tecnológica. No obstante, su implementación requiere superar retos en cuanto a la capacitación del personal, la disponibilidad de infraestructura digital y la integración de la innovación dentro de estructuras organizacionales tradicionales. Asimismo, se hace énfasis en la necesidad de proveer protocolos operativos estandarizados y cumplir con las normativas internacionales sobre vuelos no tripulados (OACI).

Por su parte, en Ecuador, los trabajos de Gutiérrez, Quishpe y Tipantuña (2021), Granda Gualpa (2020), Gómez Guerra (2022) y la Universidad Central del Ecuador (2021) se centran en la evolución de la aplicación de tecnologías automatizadas al mantenimiento aeronáutico, que va desde la simulación de sistemas de trenes de aterrizaje hasta la certificación de competencias para operadores de drones. Estas investigaciones subrayan la integración de sistemas electrónicos y de comunicación, la estandarización de la formación técnica y la necesidad de marcos regulatorios robustos y coherentes que garanticen la seguridad y trazabilidad de las operaciones.

En Paraguay, el Reglamento para operaciones de RPAS emitido por la Dirección Nacional de Aeronáutica Civil (DINAC, 2018) estipula las condiciones técnicas y operacionales que rigen las operaciones con drones, donde se incluye los requisitos de coordinación con el control de tránsito aéreo, las limitaciones operativas en zonas restringidas y la obligatoriedad de contar con pilotos certificados y seguros de responsabilidad civil. Esta normativa es un paso fundamental hacia la formalización de las operaciones con drones en contextos aeronáuticos y a la vez aporta a la consolidación de buenas prácticas en la región.

Finalmente, en Perú, la colaboración entre la Fuerza Aérea del Perú (FAP) y la Universidad Nacional de San Agustín (UNSA) demuestra el interés institucional en el desarrollo de robots para mantenimiento aeronáutico (Gobierno del Perú & FAP & UNSA, 2024). Este proyecto piloto de innovación tecnológica se centran en la validación de prototipos, su integración en hangares y la capacitación del personal técnico, constituyendo un modelo de articulación entre la academia y las instituciones de defensa que fortalecen la autonomía tecnológica y el desarrollo industrial en el sector.

En conjunto, los avances observados en párrafos anteriores revelan que la implementación de tecnologías robóticas y drones en el mantenimiento aeronáutico latinoamericano va más allá del ámbito técnico, abarcando dimensiones de formación, regulación, seguridad operacional y gestión del cambio tecnológico. La puesta en práctica exitosa de estas herramientas depende por una parte del desarrollo de infraestructura y capacidades y del otro del establecimiento de marcos normativos coherentes y de una cultura organizacional orientada a la innovación y la seguridad.

En cuanto al desarrollo y la incorporación de tecnologías robóticas, automatización e innovación digital en el sector aeronáutico tienen una presencia significativa en México y Centroamérica, aunque su incorporación presenta ritmos diferenciados y desafíos particulares. Estas tecnologías, en los que se incluyen tanto robots de asistencia técnica como drones o sistemas aéreos no tripulados (UAS/RPAS), están reconfigurando los procesos de inspección, diagnóstico y mantenimiento en la aviación civil y militar. Su uso

no solo implica transformaciones técnicas, sino también la adaptación de marcos normativos, la capacitación del personal y la consolidación de una cultura de innovación tecnológica dentro de las organizaciones aeronáuticas.

En Costa Rica, los trabajos de Sánchez y Robinson Mora (2016) y de Murillo-Vargas (2024) muestran la integración entre la tecnología aeronáutica y la educación STEM, así como la necesidad de un marco regulatorio preciso para las operaciones con drones. Las investigaciones resaltan que el uso de aeronaves no tripuladas en contextos técnicos y educativos requieren de protocolos de seguridad, verificaciones previas, control de riesgos y coordinación con las autoridades aeronáuticas. A la vez, el rediseño de robots móviles como el Atta-Bot evidencian el interés del país por el desarrollo tecnológico autónomo, el fortalecimiento de competencias técnicas y la integración de soluciones asequibles y sostenibles en entornos de aprendizaje intensivo. Lo anterior refuerza la visión de una innovación aplicada y formativa en el país, orientada a la sostenibilidad y al fortalecimiento de capacidades humanas y técnicas.

En El Salvador, García (2021) subraya la importancia de consolidar protocolos y registros operacionales sólidos en el uso de drones, lo que resulta vital para su aplicación en tareas de mantenimiento e inspección aeronáutica. Se hace hincapié en las limitaciones derivadas de las condiciones climáticas y la capacidad técnica de los equipos disponibles, que condicionan la eficacia y continuidad de las operaciones. Igualmente, se identifican buenas prácticas como la implementación de checklists operativos, capacitaciones técnicas y la documentación sistemática de vuelos e inspecciones, elementos fundamentales para fortalecer la trazabilidad y la seguridad operacional del mantenimiento basado en RPAS.

En el caso de México, la literatura analizada revela un panorama más avanzado, aunque con retos estructurales, que responden a las tendencias en avances en estos aspectos en este país. Los estudios de Castillo Malagón y Álvarez Medina (2023), González Suastes (2022) y Campos López, Juárez Ortiz y Vieyra Flores (2015) visibilizan que el país avanza hacia la Industria 4.0 a través de la integración de tecnologías digitales y robóticas en la cadena de valor aeronáutica. Sin embargo, las pequeñas y medianas empresas (PyMES)

enfrentan dificultades para financiar la adquisición de equipos, software especializado y capacitación del personal técnico. A nivel operativo, se reconocen desafíos derivados de la baja repetitividad de los procesos de manufactura aeronáutica y de la resistencia cultural al cambio tecnológico. Sin embargo, México ha promovido iniciativas como TD-2035 y el fortalecimiento de clústeres aeronáuticos regionales (por ejemplo, el de Querétaro), que impulsan la cooperación entre gobierno, industria y academia.

Por otro lado, la investigación de Campos López et al. (2015) aporta un antecedente pionero en la integración de drones controlados por aplicaciones móviles Android, desarrollados bajo protocolos de comunicación cliente-servidor, para la gestión remota y la transmisión de datos en tiempo real. Si se centra en este tipo de proyectos, se hace evidente que se constituye en un referente en cuanto al potencial de la robótica y la conectividad inalámbrica para apoyar operaciones de vigilancia, inspección técnica y mantenimiento en entornos aeronáuticos, resaltando como se hace necesario aplicar pruebas de campo, calibración de sensores y verificación de estabilidad de comunicación como parte del diseño operativo.

En conjunto, los avances en México, Costa Rica y El Salvador revelan que la incorporación de robótica y drones en el mantenimiento aeronáutico en esta región avanza hacia un proceso de maduración técnica y normativa, donde la formación de capital humano, la certificación de competencias y la interoperabilidad tecnológica se establecen como pilares esenciales para ello. Si bien los países de Centroamérica avanzan con un enfoque normativo y educativo, es en México donde se posiciona como un referente regional por su capacidad industrial, su vinculación con las cadenas globales de valor y su impulso a la digitalización productiva. No obstante, todos comparten la necesidad de reducir brechas tecnológicas, fortalecer la infraestructura digital y adaptar las regulaciones aeronáuticas a los nuevos paradigmas de operación con robots y sistemas autónomos.

En síntesis, la región avanza de manera gradual hacia la modernización tecnológica de sus sistemas aeronáuticos, pero requiere establecer una estrategia integral que articule la regulación, la educación técnica y la inversión en innovación aplicada. De esta forma se

garantiza la seguridad operacional, la eficiencia de los procesos de mantenimiento y la sostenibilidad tecnológica en un entorno global marcado por la transformación digital de la industria aeronáutica.

El análisis de los desarrollos tecnológicos vinculados con la robótica y los drones en el Caribe muestran un panorama de avances moderados, pero con una orientación clara hacia la mejora de la eficiencia operacional y la confiabilidad en los procesos de mantenimiento aeronáutico. En el caso de Cuba, el estudio de Díaz Concepción, Abril Romero, Cabrera Gómez y Viego Ariégo (2016) resaltan la importancia de consolidar los sistemas de confiabilidad operacional como soporte técnico al mantenimiento. El contexto cubano, se caracteriza por limitaciones materiales y de acceso tecnológico, en donde se ha impulsado estrategias orientadas en el análisis estadístico de fallos, como el modelo de Weibull y en la gestión predictiva del mantenimiento, lo que posibilita optimizar la disponibilidad de las aeronaves incluso con recursos limitados. Este enfoque muestra una madurez técnica basada más en la ingeniería de mantenimiento que en la automatización plena, pero que sienta las bases para la incorporación futura de sistemas robotizados de diagnóstico y reparación.

Por su parte, en la República Dominicana, los estudios revisados por Reyes Colón (2019) y Alcántara Sánchez (2019) evidencian una tendencia orientada a la modernización del espacio aéreo y la gestión automatizada del tráfico, además de la incorporación progresiva de tecnologías autónomas. Reyes Colón (2019) sostiene sobre los desafíos regulatorios y técnicos que implica la integración de los drones en el sistema de aviación civil internacional, señalando la necesidad de marcos como el U-space o UTM (Unmanned Traffic Management), en el que se establecen marco de gestión del tráfico aéreo para drones, se orienta hacia la garantía en seguridad en operaciones complejas, permiten escalar el uso civil y comercial de drones en ciudades y zonas rurales. Además de representar un paso clave para la integración regulada y segura de la movilidad aérea no tripulada, lo que posibilita gestionar el espacio aéreo de baja altitud de forma segura y coordinada. Conjuntamente, se subraya la importancia de herramientas como la Evaluación

de Riesgos de Operaciones Específicas (SORA) y la creación de mesas de trabajo interinstitucionales, que son identificadas como buenas prácticas para armonizar el desarrollo tecnológico con la seguridad operacional.

A su vez, Alcántara Sánchez (2019) estipulan una reflexión crítica sobre la automatización de los sistemas aeronáuticos, en el que reconocen su aporte a la eficiencia y gestión del tráfico aéreo, al igual que los riesgos derivados de la dependencia tecnológica excesiva. La pérdida de habilidades manuales de los pilotos y las posibles fallas en sensores automatizados, tales como las documentadas en incidentes internacionales, demuestran que la automatización, si bien mejora la eficiencia, exige protocolos de formación continua y redundancia técnica. Por tanto, la capacitación rigurosa de los operadores y la instalación de sistemas redundantes se establecen como buenas prácticas para mitigar los riesgos derivados de la digitalización en aumento.

En conjunto, las experiencias de Cuba y República Dominicana muestran una etapa de transición tecnológica en el Caribe, donde la prioridad sigue siendo garantizar la confiabilidad operacional en contextos de recursos heterogéneos. Las buenas prácticas identificadas, como la implementación de metodologías de análisis de fallos, el desarrollo de marcos normativos adaptados al uso de drones, la creación de sistemas redundantes y la formación especializada del personal aeronáutico, constituyen pilares fundamentales para avanzar hacia una adopción sostenible y segura de la robótica y los sistemas no tripulados en el mantenimiento aeronáutico regional.

Además, el panorama latinoamericano evidencia que la implementación de la robótica y los drones en el mantenimiento aeronáutico avanza de forma gradual y heterogénea, influida por las capacidades tecnológicas, los marcos regulatorios y el nivel de articulación entre industria, academia y Estado en cada país. En América del Sur, se destaca el desarrollo de soluciones locales orientadas al fortalecimiento del mantenimiento predictivo y la inspección automatizada, mientras que en Centroamérica y México el énfasis recae en la regulación, la adaptación de las PYMES a las exigencias de la industria 4.0 y la formación de capital humano especializado. Por su parte, el Caribe afronta el reto

de mantener la confiabilidad operacional en contextos con recursos técnicos limitados, priorizando la gestión de riesgos y la estandarización de procedimientos.

A nivel regional, las buenas prácticas convergen en la integración de la innovación con la seguridad operacional, el desarrollo de marcos normativos adaptativos, la capacitación permanente del personal técnico y la colaboración entre sectores público, privado y académico. Estas tendencias reflejan que, aunque América Latina aún enfrenta brechas en automatización y digitalización aeronáutica, se está configurando una base sólida hacia un modelo de mantenimiento más eficiente, seguro y tecnológicamente resiliente.

7.4 Tendencias futuras del uso de robótica y drones en el mantenimiento aeronáutico en América Latina

Las tendencias emergentes en el uso de tecnologías robóticas y drones en el mantenimiento aeronáutico en América Latina reflejan una región en transición hacia la digitalización avanzada y la autonomía operacional. En este escenario, países como Colombia, Ecuador, Perú, Paraguay, Brasil y Chile evidencian una convergencia hacia la adopción de la Industria 4.0, la automatización inteligente y la integración de sistemas autónomos en entornos aeronáuticos, aunque con diferentes grados de madurez tecnológica y desarrollo normativo.

En Colombia, el trabajo de Castillo Malagón y Álvarez Medina (2023) constituye un referente sobre innovación tecnológica aplicada al mantenimiento del panel de precaución y advertencia de helicópteros UH-60. Su estudio anticipa una tendencia hacia la autosuficiencia operativa mediante la creación de servicios de mantenimiento internos sostenibles y económicamente viables, con potencial de replicarse en otros sectores de la defensa y la aviación civil. Este enfoque impulsa el tránsito hacia modelos de mantenimiento basados en simulación, automatización y gestión eficiente de recursos, en respuesta directa a limitaciones presupuestarias.

De manera complementaria, Vacca Rojas (2024) plantea una evolución progresiva del mantenimiento aeronáutico hacia un sistema predictivo y automatizado, fundamentado en la integración de bases de datos, el análisis de datos históricos y la conexión con tecnologías como el Internet de las Cosas (IoT). La automatización de procesos, la trazabilidad de componentes y la gestión en tiempo real de inventarios son elementos clave que anuncian una transformación estructural en la eficiencia operativa del sector.

Por su parte, Cáceres León y Alvarado Ortega (2023) exploran la expansión de los sistemas aéreos remotamente tripulados (RPAS) y proyectan el avance hacia una autonomía total mediante inteligencia artificial, aprendizaje automático y swarm technology o coordinación de enjambres de drones. Aunque su investigación se centra en aplicaciones militares, sus conclusiones son extrapolables a la aviación civil y al mantenimiento aeronáutico, especialmente en tareas de inspección, vigilancia y monitoreo de infraestructura crítica.

En Ecuador, el análisis jurídico de Gutiérrez, Quishpe y Tipantuña (2021) subraya la importancia de un marco normativo progresivo y armonizado con los estándares internacionales de la OACI. Los autores prevén una expansión sostenida del uso civil y comercial de drones, lo que exigirá ajustes en materia de privacidad, responsabilidad civil y certificación de operaciones técnicas. En el ámbito aeronáutico, esta proyección normativa es esencial para habilitar operaciones seguras de drones en entornos aeroportuarios y de mantenimiento, donde la seguridad operacional es prioritaria.

En Paraguay, el Reglamento para operaciones de RPAS emitido por la Dirección Nacional de Aeronáutica Civil (DINAC, 2018) establece una base sólida para la futura expansión de operaciones comerciales especializadas, incluyendo inspecciones y monitoreo en aeropuertos. El documento apunta a una armonización con los lineamientos de la OACI, incorporando categorías operativas, restricciones y requisitos de certificación que, en el mediano plazo, podrían facilitar el desarrollo de proyectos piloto en mantenimiento, reparación y operaciones (MRO) mediante drones especializados.

Por su parte, en Perú, la iniciativa conjunta entre la Fuerza Aérea del Perú (FAP) y la Universidad Nacional de San Agustín (UNSA) (Gobierno del Perú, 2024) representa un hito en la fabricación local de robots para mantenimiento aeronáutico, con potencial de transferencia tecnológica hacia aplicaciones civiles y comerciales. Esta colaboración interinstitucional constituye una buena práctica de innovación abierta, orientada a fortalecer las capacidades nacionales en diseño, ingeniería y manufactura de sistemas robóticos adaptados al contexto latinoamericano.

En Brasil, las investigaciones de Silva (2019) y Almeida (2024) destacan la consolidación de la Industria 4.0 como eje del desarrollo aeronáutico futuro. Silva identifica que tecnologías como la inteligencia artificial y la computación cuántica serán campos críticos de inversión, aunque advierte sobre las brechas estructurales que pueden limitar la modernización tecnológica del país. Por su parte, Almeida enfatiza la necesidad de fortalecer el capital humano mediante programas de formación en competencias “4.0”, como gestión del conocimiento, adaptabilidad e innovación para lograr una integración sostenible entre tecnología y personas. Ambas perspectivas coinciden en que la transformación digital del mantenimiento aeronáutico dependerá tanto de la infraestructura tecnológica como de la madurez organizacional de las instituciones involucradas.

En Chile, el trabajo de González Leyton (2021) propone el incremento del uso de drones en inspecciones de aeronaves comerciales, orientado a reducir tiempos de mantenimiento y mejorar la precisión técnica mediante sistemas autónomos y análisis de imágenes con inteligencia artificial. Esta línea se complementa con Marín Vásquez (2025), quien identifica una fase de crecimiento incipiente del sector aeroespacial chileno, dependiente de la inversión en políticas públicas de innovación y formación. Finalmente, Sepúlveda González (2024) evidencia una institucionalización progresiva del uso de drones en cuerpos de emergencia, experiencia que podría extrapolarse al mantenimiento aeronáutico en tanto demuestra la factibilidad técnica y la interoperabilidad de los sistemas en entornos complejos.

En conjunto, las tendencias identificadas en los distintos países de América Latina revelan un movimiento hacia un ecosistema aeronáutico más digitalizado, autónomo y sostenible. La región avanza hacia la implementación de mantenimiento predictivo y automatizado, el fortalecimiento de capacidades técnicas locales y la consolidación de alianzas estratégicas entre gobiernos, universidades y fuerzas armadas para la transferencia de conocimiento. No obstante, los desafíos persisten tales como la falta de políticas industriales continuas, la dependencia tecnológica externa y las brechas regulatorias limitan la velocidad de adopción. Aun así, los avances observados consolidan a América Latina como un espacio en evolución hacia la modernización del mantenimiento aeronáutico, basado en la robótica, la inteligencia artificial y la integración de sistemas autónomos de inspección y soporte técnico.

En Centroamérica y México, el desarrollo y adopción de tecnologías robóticas y de drones en el ámbito aeronáutico presentan un escenario de rápida evolución, caracterizado por la convergencia de automatización, digitalización e integración de la Industria 4.0. En Costa Rica, se observa un avance en la regulación de vehículos aéreos no tripulados (UAS) con fines comerciales y civiles, así como la utilización de robótica educativa para fortalecer competencias STEM (Sánchez & Robinson Mora, 2016; Murillo-Vargas, 2024). En El Salvador, la profesionalización y formalización normativa apunta hacia la migración de aplicaciones civiles a operaciones de mantenimiento aeronáutico, con protocolos más rigurosos que permitan un despliegue seguro y eficiente de estas tecnologías (García, 2021).

Por su parte, México evidencia un enfoque más amplio, que combina la consolidación del nearshoring, la automatización de procesos productivos, el desarrollo de competencias 4.0 y la implementación de sistemas de drones y robótica para inspección, monitoreo y mantenimiento (Castillo Malagón & Álvarez Medina, 2023; González Suastes, 2022; Campos López, Juárez Ortiz, & Vieyra Flores, 2015). La tendencia regional apunta hacia la expansión de aplicaciones operativas y educativas, la integración de inteligencia

artificial para análisis de datos y visión computarizada, y la necesidad de actualizar marcos regulatorios para garantizar la seguridad y eficiencia de las operaciones.

De manera convergente, estos desarrollos reflejan la importancia de formar capital humano especializado, fortalecer capacidades locales y fomentar la adopción tecnológica estratégica, asegurando que los países de la región puedan aprovechar los beneficios de la automatización y la robótica sin comprometer la seguridad operacional ni la competitividad industrial.

En el Caribe, la incorporación de tecnologías emergentes como drones y sistemas automatizados en el mantenimiento aeronáutico se encuentra en una etapa inicial, con un énfasis destacado en la confiabilidad operacional y la integración progresiva con la aviación tripulada. En Cuba, los estudios apuntan a la necesidad de integrar análisis de confiabilidad en sistemas MRO más amplios y eventualmente incorporar tecnologías de inspección avanzada, con el objetivo de mejorar la eficiencia y seguridad del mantenimiento aeronáutico, especialmente en contextos con recursos limitados (Díaz Concepción, Romero García, Cabrera Gómez, & Viego Ariégo, 2016).

Por su parte, en República Dominicana, se proyecta una integración total de drones en el sistema de aviación civil hacia 2037, con la implementación gradual de servicios UTM/U-space y la armonización internacional de regulaciones, así como un enfoque en la automatización de la gestión del tránsito aéreo (ATM), cambiando el rol del controlador de operador a supervisor de sistemas (Reyes Colón, 2019; Alcántara Sánchez, 2019). Estos desarrollos reflejan una tendencia regional hacia la automatización, la mejora de la seguridad y la optimización de operaciones, al tiempo que subrayan la importancia de la formación especializada del personal y la creación de marcos regulatorios robustos para garantizar una implementación segura y efectiva de las tecnologías emergentes en el mantenimiento aeronáutico del Caribe.

En conjunto, las tendencias futuras en América Latina muestran un panorama de creciente integración de tecnologías emergentes, como drones, robótica y automatización,

en el mantenimiento aeronáutico, con particular atención a la eficiencia operativa, la seguridad y la sostenibilidad. En Suramérica, países como Argentina, Brasil, Bolivia y Chile avanzan en la implementación de sistemas autónomos, movilidad aérea urbana, simuladores de alta fidelidad y el fortalecimiento de competencias de Industria 4.0, mientras se enfrentan a desafíos regulatorios, resistencia al cambio y limitaciones de infraestructura (Espitia Cubillos, 2020; Gaggioli & Hidalgo, 2018; Silva, 2019; Mamani-Chuquimia, 2024).

En Colombia, Ecuador, Paraguay y Perú, los estudios destacan la evolución hacia mantenimiento predictivo, automatización de procesos, coordinación de enjambres de drones y fortalecimiento de capacidades nacionales, siempre bajo la necesidad de consolidar marcos regulatorios y capacitación especializada (Castillo Malagón & Álvarez Medina, 2023; Gutiérrez, Quishpe, & Tipantuña, 2021; DINAC, 2018; Gobierno del Perú/FAP & UNSA, 2024).

En Centroamérica y México, la tendencia se centra en la profesionalización regulatoria, la integración de sistemas MRO con drones y robótica, la formación de perfiles laborales polivalentes y la digitalización progresiva de procesos, aunque la automatización total aún es incipiente y depende de políticas públicas y apoyo a las PYMES (Sánchez & Robinson Mora, 2016; García, 2021; Castillo Malagón & Álvarez Medina, 2023; González Suastes, 2022).

Finalmente, en el Caribe, se observa una orientación hacia la confiabilidad operacional, la automatización de la gestión del tránsito aéreo y la gradual incorporación de UAS en sistemas MRO, destacando la necesidad de formación especializada y marcos normativos robustos para garantizar seguridad y eficiencia (Díaz Concepción et al., 2016; Reyes Colón, 2019; Alcántara Sánchez, 2019). En conjunto, América Latina avanza hacia una modernización tecnológica del mantenimiento aeronáutico que combina innovación, sostenibilidad, regulación y desarrollo del capital humano, aunque persisten brechas significativas entre los países en capacidad industrial, normativa y recursos.

CONCLUSIONES

Se puede concluir después del análisis documental que en América Latina se muestra avances de manera desigual en la adopción de tecnologías referidas a la robótica y los drones en el mantenimiento aeronáutico. Es necesario precisar que América del Sur lidera los avances con proyectos aplicados a la automatización e inspección técnica, destacando experiencias de países como Chile, Colombia y Perú. Por su parte en Centroamérica prevalece la fase normativa y educativa, con México como referente regional en Industria 4.0 y automatización. En el Caribe, la investigación se enfoca en confiabilidad y gestión de riesgos más que en la aplicación directa, por lo tanto sus avances son más incipientes. En ese sentido, la cooperación interinstitucional, la regulación especializada y la formación técnica para los países latinoamericanos como pilares para fortalecer la competitividad tecnológica y operativa del sector de interés de esta monografía.

En relación con las implicaciones técnicas y operacionales de la robótica y los drones en la aviación latinoamericana se evidenció que está trascienden el ámbito tecnológico, abarcando dimensiones de infraestructura, capacitación, regulación y gestión del riesgo. Los avances en países como Chile, Colombia, Perú y México confirma que la incorporación de estas herramientas optimiza la eficiencia, reduce tiempos de mantenimiento y fortalece la seguridad operacional. Sin embargo, para lograr una implementación efectiva requiere superar brechas en infraestructura digital, certificación de competencias y resistencia organizacional al cambio. Por tanto, se hace imprescindible políticas coherentes, marcos regulatorios actualizados y una cultura de innovación para su adopción efectiva, que garantice así la integración segura y sostenible de la automatización en la aviación regional.

En cuanto a las tendencias emergentes evidencian que la región transita hacia un modelo de mantenimiento inteligente sustentado en la automatización, el Internet de las Cosas (IoT), la inteligencia artificial y la gestión de datos en tiempo real. Es así que en países como Colombia, Perú y Brasil se están impulsando la fabricación y uso de robots

locales, mientras que en otros como Ecuador y Paraguay se consolidan marcos normativos con el fin de buscar la expansión de operaciones con RPAS en entornos aeroportuarios. Las dinámicas anteriormente expuestas anuncian un cambio estructural hacia la autonomía operativa y la digitalización avanzada del mantenimiento aeronáutico en la región, en el que la cooperación tripartita entre Estado, industria y academia será determinante para reducir las brechas tecnológicas y avanzar hacia una mayor soberanía tecnológica regional.

En síntesis, esta monografía confirma que América Latina se encuentra en una etapa de consolidación tecnológica gradual en el mantenimiento aeronáutico, más desarrollada en unos países que en otros, en los de menos por múltiples causas en las que están procesos de regulación estrictas e incluso acceso a tecnologías de este tipo por medio de alianzas necesario que no se dan con otros países (ejemplo Cuba), pero en los que muestran avances la robótica y los drones se perfilan como herramientas estratégicas para la eficiencia, la seguridad y la sostenibilidad. Si bien los adelantos son heterogéneos entre subregiones, existen experiencias significativas que muestran la viabilidad de integrar soluciones de automatización y digitalización adaptadas al contexto latinoamericano, pero se requiere fortalecer la infraestructura tecnológica, la formación especializada y la articulación institucional para lograr una transición efectiva hacia la Industria 4.0.

Teniendo en cuenta lo anterior, se recomienda que los gobiernos y las instituciones aeronáuticas latinoamericanas adopten una estrategia regional coordinada de innovación tecnológica que promueva la inversión en I+D, la formación de talento especializado y la armonización normativa conforme a los estándares de la OACI. Dado el adelanto de unos países más que de otros, se hace necesario un diálogo continuo y especialmente la adopción de experiencias exitosas para lograrlo. Asimismo, es imprescindible fomentar alianzas entre universidad, empresa y Estado que impulsen la transferencia tecnológica, el desarrollo de prototipos locales y la creación de laboratorios de mantenimiento inteligente en el impulso de la autonomía y sostenibilidad del sector.

Así mismo, como proyección de otros posibles trabajos se propone ampliar la investigación hacia el análisis comparativo de desempeño entre los modelos de

mantenimiento tradicionales y los automatizados, evaluar el impacto económico y ambiental de la robótica en los procesos MRO y explorar la incorporación de tecnologías emergentes como la inteligencia artificial generativa, los gemelos digitales y la computación cuántica en el diagnóstico aeronáutico, teniendo como contexto específicos los países latinoamericanos. De igual modo, sería pertinente desarrollar estudios longitudinales que midan la evolución del nivel de madurez tecnológica en cada país y su correlación con indicadores de competitividad y sostenibilidad en la aviación latinoamericana. Asimismo, estudios prospectivos que permitan afianzar el nivel de confianza y avance hacia mejores resultados.

BIBLIOGRAFÍA

Airbus. (2016). Hangar of the Future. Airbus Newsroom. <https://www.airbus.com/newsroom/news/2016-12-hangar-of-the-future>

Airbus. (2018). Digitising maintenance for end-to-end continuity. Airbus Newsroom.

Alarcón, J., & Sánchez, D. (2021). Aplicaciones de drones en el mantenimiento de aeronaves comerciales. *Revista Ingeniería Aeronáutica y Espacial*, 45(2), 67–84.

Alcántara Sánchez, C. R. (2019). La automatización en los sistemas aeronáuticos. *País Dominicano Temático*, 3(7), 48–51.

Alvarado Ortega, I. A., & Cáceres León, R. H. (2020). Sistemas aéreos remotamente tripulados en aplicaciones militares: una revisión [Tesis de licenciatura, Universidad Israel]. Repositorio UISRAEL. <http://repositorio.uisrael.edu.ec/bitstream/47000/2422/1/UISRAEL-EC-ELDT-378.242-2020-007.pdf>

Banco de Desarrollo de América Latina y el Caribe (CAF). (2023). Robótica y automatización para el desarrollo productivo sostenible. CAF.

Benítez, L., & Méndez, F. (2022). Innovación y automatización en el mantenimiento aeronáutico en América Latina. *Revista de Tecnología y Aeronáutica*, 10(1), 45–63.

Bethell, L. (2009). *Historia de América Latina. Crítica*.

Bjerregaard, L. (2022, 17 agosto). StandardAero grows Latin American MRO footprint. Aviation Week Network. <https://www.aviationweek.com/mro/standardaero-grows-latin-american-mro-footprint/>

Boeing. (2023). Commercial Market Outlook 2023–2042. Boeing Global Services.

Cárdenas, P., & Gutiérrez, J. (2021). Robótica industrial aplicada al mantenimiento aeronáutico: desafíos para América Latina. *Revista Latinoamericana de Innovación Tecnológica*, 12(3), 55–72.

Caribbean Community (CARICOM). (2025). CARICOM – Caribbean Community. <https://caricom.org/>

Cáceres León, R. H., & Alvarado Ortega, I. A. (2020). Sistemas aéreos remotamente tripulados en aplicaciones militares. Una revisión. Universidad Israel.

Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2017). Transporte aéreo como motor del desarrollo sostenible en América Latina y el Caribe: retos y propuestas de política [PDF]. *Boletín FAL: Facilitación del transporte y el comercio en América Latina y el Caribe*, (359). <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/3b1e7acc-2c7a-4968-9f5d-4c548cbf455f/content>

Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2020). La transformación digital en América Latina. Naciones Unidas.

Craig, J. J. (2005). *Introduction to robotics: Mechanics and control* (3rd ed.). Pearson Education.

Dávila, R. A., & Jiménez, O. C. (2022). Tendencias emergentes en el uso de drones para inspección y mantenimiento aeronáutico en la región andina. *Revista Ciencia y Tecnología Aeroespacial*, 15(2), 33–58.

Díaz Concepción, A., Abril Romero García, J., Cabrera Gómez, J., & Viego Ariégo, N. (2016). Estudio de confiabilidad operacional como soporte al mantenimiento aeronáutico en Cuba. Instituto Superior Politécnico José A. Echeverría (CUJAE) / Empresa de Aviación ECA.

EASA. (2022). Artificial Intelligence Roadmap 2.0 – Human-centric approach to AI in aviation. European Union Aviation Safety Agency.

Federal Aviation Administration (FAA). (2021). Maintenance, Repair and Overhaul (MRO) Digital Transformation Report 2021–2022. U.S. Department of Transportation. <https://www.faa.gov/>

Federal Aviation Administration (FAA). (2022). Integration of Robotics and Artificial Intelligence in MRO Operations. U.S. Department of Transportation. <https://www.faa.gov/>

Federal Aviation Administration (FAA). (2023). Unmanned Aircraft Systems (UAS) for Aviation Maintenance and Inspection. U.S. Department of Transportation. <https://www.faa.gov/>

Fernández, M., & Rodríguez, C. (2021). Integración de sistemas robóticos en la inspección de aeronaves: estudio de caso en LATAM Airlines. *Revista de Ingeniería y Aviación*, 9(4), 21–38.

Floreano, D., & Wood, R. J. (2015). Science, technology and the future of small autonomous drones. *Nature*, 521(7553), 460–466. <https://doi.org/10.1038/nature14542>

García, J. M., & Molina, T. E. (2020). Drones y mantenimiento predictivo: oportunidades para la aviación civil. *Journal of Aerospace Maintenance*, 5(3), 11–27.

IATA. (2022). Digital transformation in aircraft maintenance operations. International Air Transport Association.

IATA. (2023). El valor del transporte aéreo para Colombia. <https://www.iata.org/contentassets/bc041f5b6b96476a80db109f220f8904/voa-translations/el-valor-del-transporte-aereo-para-colombia--sp.pdf>

International Civil Aviation Organization (ICAO). (2024). Innovation and Sustainable Technology in Civil Aviation. Montréal, Canada: ICAO. <https://www.icao.int/>

International Civil Aviation Organization (ICAO). (2022, 19 octubre). States at ICAO Assembly recognize critical role of air transport in progressing global sustainable development. <https://www.icao.int/Newsroom/Pages/ES/States-at-ICAO-Assembly-recognize-critical-role-of-air-transport-in-progressing-global-sustainable-development.aspx>

Kumar, R., & Patel, S. (2020). Collaborative robots in aerospace engine maintenance: A technological revolution. *Aerospace Maintenance Journal*, 8(1), 45–60.

López, P., & Ramírez, A. (2022). Automatización y robótica en los hangares latinoamericanos: situación actual y proyección al 2030. *Revista Aeroespacial del Cono Sur*, 8(2), 77–95.

Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2015). Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. Naciones Unidas. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>

Pérez, J., & Rodríguez, M. (2021). Innovación tecnológica en la aviación: Desafíos y oportunidades en América Latina. Editorial Aeronáutica.

Pérez, L. M., & Ruiz, A. (2021). Transformación digital y mantenimiento predictivo en el sector aeronáutico latinoamericano. *Revista de Ciencia y Tecnología Aeroespacial*, 6(2), 59–80.

Reyes Colón, J. D. (2019). Los drones en el sistema de aviación civil internacional. *País Dominicano Temático*, 3(7), 84–85. <https://paisdominicanotematico.com/revistas/Pais-Dominicano-Ed7-digital.pdf>

Rojas, C. (2017). América Latina en el mundo: narrativas y perspectivas. Siglo XXI.

Rodríguez, D., & Herrera, F. (2023). La adopción de robots y drones en el mantenimiento aeronáutico latinoamericano: análisis comparado Brasil–México–Colombia. *Revista de Estudios Aeroespaciales*, 11(3), 41–65.

Salazar, J., & Pineda, V. (2022). Robótica colaborativa y mantenimiento inteligente en la aviación comercial: perspectivas para América Latina. *Revista Aeronáutica y Espacial Latinoamericana*, 14(1), 15–36.

Sampieri, R. H., Collado, C. F., & Lucio, M. de. (2014). *Metodología de la investigación* (6ª ed.). McGraw-Hill Interamericana.

Siciliano, B., & Khatib, O. (Eds.). (2016). *Springer handbook of robotics* (2nd ed.). Springer.

Silva, R., & Duarte, P. (2023). Drones, inteligencia artificial y big data en mantenimiento aeronáutico: el caso Airbus Hangar of the Future. *Aerospace Innovation Review*, 4(1), 98–112.

Smith, J., & Lee, A. (2018). Implementation of drone technology in aircraft maintenance: A case study at Lufthansa Technik. *Journal of Aerospace Technology*, 12(3), 123–137.

Torres, E., & González, M. (2023). Mantenimiento predictivo y gestión de datos en la aviación civil latinoamericana: una mirada hacia el 2035. *Revista Técnica Aeroespacial*, 19(2), 75–93.

World Aviation ATO. (2023, 12 octubre). Previsión de crecimiento de la aviación. <https://worldaviationato.com/es/prevision-de-crecimiento-de-la-aviacion/>