

Capítulo 4

Avances de la inteligencia artificial en el empleo del poder aeroespacial brasileño*

DOI: <https://doi.org/10.25062/9786287818507.04>

Rafael Lemos Paes

Marcelo Ferreira dos Santos

Escuela Superior de Guerra "General Rafael Reyes Prieto"

Resumen: Este capítulo aborda los proyectos en desarrollo en Brasil que aplican la inteligencia artificial (IA) y su potencial para impactar significativamente el poder aeroespacial del país. El objetivo es destacar los principales proyectos en curso, analizándolos a la luz del escenario estratégico actual. A través de una revisión bibliográfica, se pone de manifiesto la complejidad del contexto contemporáneo y sus implicaciones en el nuevo entorno operacional. El concepto de *seguridad multidimensional*, promovido por la Organización de Estados Americanos, junto con el enfoque multidominio, la preparación para estrategias híbridas y el papel de las nuevas tecnologías impulsadas por la IA, resalta la necesidad de que Brasil invierta en investigación e innovación. Los resultados obtenidos revelan que los proyectos identificados impulsan el avance del poder aeroespacial brasileño, posicionándolo dentro de un nuevo modelo de gobernanza global, multipolar y asimétrico. En conclusión, estos avances son esenciales para enfrentar los desafíos emergentes en el escenario mundial.

Palabras clave: Ambiente operacional, fuerzas armadas, inteligencia artificial, poder aeroespacial, seguridad multidominio.

* Capítulo resultado del proyecto de investigación *Desafíos futuros en los dominios aéreo, ciberespacial y espacial por la aplicación de la inteligencia artificial en la transición de la revolución industrial (5.0)*, desarrollado por el grupo de investigación Masa Crítica de la Escuela Superior de Guerra "General Rafael Reyes Prieto". Este grupo está reconocido y categorizado como tipo A1 por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación y registrado bajo el código COL0123247. Los puntos de vista y los resultados presentados son responsabilidad de los autores y no necesariamente reflejan la posición de las instituciones participantes.

Rafael Lemos Paes

Coronel y piloto de la Fuerza Aérea Brasileña. Doctor en Sensoriamento Remoto Satelital por el Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Brasil. Máster en Administración de Negocios (MBA), Pontificia Universidad Católica de Rio Grande do Sul, Brasil. Especialista en Altos Estudios Militares, Escuela de Comandante y Estado Mayor da Aeronáutica, Brasil. Profesional en Ciencias Aeronáuticas, Academia de la Fuerza Aérea. <https://orcid.org/0000-0003-3599-8512>
Contacto: rafaelpaesrlp@fab.mil.br

Marcelo Ferreira dos Santos

Teniente Coronel de la Fuerza Aérea Brasileña. Máster en Administración de Negocios (MBA) y Gestión Estratégica, Fundación Getulio Vargas, Brasil. Especialista en Seguridad y Defensa Nacionales, Escuela Superior de Guerra "General Rafael Reyes Prieto", Colombia. Profesional en Ciencias Militares, Academia de la Fuerza Aérea, Brasil. Docente investigador, Escuela Superior de Guerra "General Rafael Reyes Prieto", Colombia. <https://orcid.org/0009-0002-0220-2696> - Contacto: marcelo.ferreira@esdeg.edu.co

Citación APA: : Lemos Paes, R., y Ferreira dos Santos, M. (2026). Avances de la IA en el empleo del poder aeroespacial brasileño. En F. Baquero-Valdés. (Ed.). *Desafíos futuros en los dominios aéreo, espacial y ciberespacial: IA y Revolución Industrial (5.0)* (pp. 97-129). Sello Editorial ESDEG. <https://doi.org/10.25062/9786287818507.04>

DESAFÍOS FUTUROS EN LOS DOMINIOS AÉREO, ESPACIAL Y CIBERESPACIAL: IA Y REVOLUCIÓN INDUSTRIAL (5.0)

ISBN impreso: 978-628-7818-49-1

ISBN digital: 978-628-7818-50-7

DOI: <https://doi.org/10.25062/9786287818507>

Colección Estrategia, Geopolítica y Cultura

Sello Editorial ESDEG

Escuela Superior de Guerra "General Rafael Reyes Prieto"

Bogotá D.C., Colombia

2026



Introducción

Brasil, el quinto país más extenso del mundo, comparte más de 16 000 km de frontera con diez países y se encuentra entre las diez naciones más pobladas del planeta. Su vasta riqueza natural y creciente potencial tecnológico e industrial le confieren un papel destacado en el escenario mundial.

Consciente de los riesgos y las implicaciones de su creciente proyección, Brasil orienta sus relaciones internacionales según los principios constitucionales de no intervención, defensa de la paz y solución pacífica de conflictos, promoviendo una convivencia armónica como parte de su identidad nacional y sin perder de vista que

[...] la historia demuestra que las relaciones de fuerza desempeñan un papel relevante en la interacción estatal, de modo que "ningún Estado puede ser pacífico sin ser fuerte", como lo defendió José María da Silva Paranhos Júnior, barón de Río Branco, patrono de la diplomacia brasileña. (Brasil, 2020a, p. 13)

En los últimos años, la diplomacia brasileña ha promovido principios e intereses a nivel global, lo que ha permitido al país establecer una agenda exterior más autónoma y, por ende, impulsar su progreso nacional. Esta autonomía requiere protección, pues, aunque Brasil sea reconocido internacionalmente como un defensor de la paz, el contexto actual exige la preservación de capacidades disuasorias y una preparación adecuada para enfrentar posibles amenazas externas (Brasil, 2020b).

La tesis del barón de Río Branco, plasmada en el pensamiento estratégico que orienta la Política de Defensa Nacional (PND) de Brasil, se alinea con la *realpolitik*, un enfoque pragmático de las relaciones internacionales que combina habilidades diplomáticas con la imperiosa necesidad de mantener una postura defensiva sólida.

En el marco de la PND, el énfasis en la fuerza como componente de paz subraya la necesidad de un desarrollo continuo de las capacidades militares mediante la modernización de las fuerzas armadas, el fortalecimiento de la Base Industrial de Defensa (BID), inversiones en tecnología y la cualificación del capital humano.

Esto con el objetivo de fortalecer la capacidad de disuasión frente a amenazas externas y garantizar la estabilidad interna. Sin embargo, para que esta política sea asertiva y se traduzca en inversiones reales, será crucial adaptarse al nuevo entorno operativo en el que las fuerzas armadas estarán llamadas a participar.

En este sentido, en su artículo *El nuevo entorno operativo y las operaciones aeroespaciales*, Martínez (2022) señala que cualquier análisis prospectivo sobre el empleo del poder militar en el ambiente operacional de los próximos 20 años debe empezar con “una revisión del contexto estratégico y de los riesgos y amenazas que nos ayude a entender cómo se conforman los entornos operativos y cómo sus características afectan la aplicación del poder militar” (p. 187).

Nuevo contexto estratégico

En términos estratégicos, y tras analizar el escenario internacional, es importante destacar que el surgimiento de nuevos dominios, como el espacio ultraterrestre y el ciberespacio, sumado al clima generalizado de la *great power competition* y la inminente llegada de un nuevo orden mundial, son factores con la capacidad de desestabilizar todos los ámbitos, como el político, el diplomático, el económico, el tecnológico y el militar (Dacoba, 2021). Estos cambios están redefiniendo las dinámicas geopolíticas globales.

La ascensión de China y Rusia como actores clave en la competencia estratégica con Estados Unidos está reconfigurando el equilibrio de poder global y desafiando el orden internacional establecido tras la Guerra Fría. La era del fin de la historia y del unipolarismo norteamericano, que promovió la democracia liberal, ya ha quedado atrás.

En su lugar, está emergiendo un nuevo modelo de gobernanza global, multipolar y asimétrico, caracterizado por la proliferación de regímenes autoritarios que encuentran en la *zona gris* un terreno propicio para llevar a cabo procedimientos de confrontación híbrida (Dacoba, 2021; Lindberg y Kolvani, 2021).

Tabla 1. Visión panorámica actual que destaca los elementos que caracterizan el nuevo contexto estratégico

Elementos destacados	Riesgos y amenazas
Transición hacia un nuevo equilibrio de poder, reflejado en el ascenso de China como potencia económica, tecnológica y militar.	Este escenario marca la transición de un orden unipolar, dominado por los Estados Unidos, hacia un modelo multipolar, caracterizado por una competencia agresiva y un ambiente de perturbación generalizada. Este cambio desestabiliza el orden mundial, propiciando la proliferación de regímenes autoritarios y el retroceso democrático en algunos países occidentales.
Disputa por la hegemonía y la influencia global, que involucra nuevos actores, destacándose China y Rusia.	El impulso de una nueva carrera armamentista y el desarrollo de armas de destrucción masiva, que incorporan tecnologías disruptivas e IA, representan una amenaza para la seguridad y la supervivencia humana.
Percepción de belicosidad generalizada e intensa	La degradación de la estabilidad y la seguridad global, sumada al desequilibrio entre el potencial de escalada y la capacidad de contención de los conflictos armados, ocurre en un tablero geopolítico marcado por numerosas rivalidades regionales.
Mayor acceso a la tecnología	Actores estatales y no estatales promueven el uso de estrategias híbridas a pesar de la asimetría en sus capacidades, y proliferan los dominios no físicos, marcados por acciones asimétricas y no convencionales.
La globalización y el progreso de las nuevas tecnologías	Esto ha dado lugar a una mayor interdependencia entre los actores globales. Los eventos ocurridos en una región del mundo tienen un impacto inmediato y directo sobre áreas geográficas distantes, lo que ha provocado un aumento del nacionalismo y el populismo como respuestas a las influencias exógenas.
Proliferación de nuevas formas de competencia entre las grandes potencias	Al evitar confrontaciones directas, estas potencias utilizan a terceros para enfrentar a un enemigo, fenómeno conocido como <i>guerra proxy</i> . A menudo, delegan sus acciones a agentes locales, lo que favorece el surgimiento de grupos terroristas y compañías militares y de seguridad privada.

Fuente. Adaptado de Cortés (2022).

En el nuevo contexto estratégico, con potencial para generar transformaciones significativas en el entorno operacional, sobresalen elementos comunes y transversales, como las estrategias híbridas, la interacción entre dominios, la globalización y la democratización de la tecnología. Anticiparse a estas transformaciones es esencial para salvaguardar la soberanía y promover el desarrollo nacional, especialmente en un país con la magnitud continental de Brasil.

Aunque no existe un consenso internacional sobre la definición de *dominio*, el *Manual de Campo 3.0*, del Ejército de Estados Unidos, lo describe como “una parte físicamente definida de un entorno operativo que requiere un conjunto único de

capacidades y habilidades de combate" (p. 1.18)¹. Por su parte, el Departamento de Defensa de los Estados Unidos (2005) relaciona el concepto de *multidominio* con cualquier espacio operativo capaz de influir en un sistema objetivo, incluyendo los dominios terrestre, marítimo, aéreo, espacial, virtual y humano.

En un entorno multidominio, la caracterización del contexto estratégico exige destacar la interacción, integral y coordinada, entre los diversos dominios. La complejidad de este nuevo espacio operativo abarca tanto la dimensión virtual, mediante operaciones cibernéticas y de información, como la dimensión humana, que incluye los factores cognitivos, morales y sociales que moldean las decisiones en todos los niveles del conflicto.

Ante las amenazas emergentes, el entorno multidominio demanda una adaptación estratégica constante, incorporando tecnologías avanzadas, como la IA y los sistemas autónomos. La flexibilidad y la resiliencia son esenciales para responder a los cambios y emplear distintos recursos en la consecución de objetivos estratégicos.

Figura 1. Complejidad del nuevo ambiente operacional



Nota. Se analiza la complejidad del nuevo ambiente operacional, relacionando las características del enfoque multidominio y haciendo énfasis en la adaptación estratégica, con el objetivo de enfrentar eficazmente las amenazas emergentes.

Fuente. Elaboración propia.

¹ Traducción realizada por los autores.

El concepto de *hibridez* combina métodos convencionales y no convencionales, como los ataques cibernéticos, las operaciones relacionadas con la información, el uso de armas de destrucción masiva y la violencia indiscriminada (Hoffman, 2017). La guerra híbrida, noción acuñada para describir los conflictos del siglo XXI, amplió las opciones estratégicas contra los adversarios al evitar el enfrentamiento directo, especialmente en contextos de creciente disparidad tecnológica.

Además del contexto internacional, es fundamental analizar el escenario regional, especialmente en América Latina. Brasil, al compartir fronteras con diez de las doce naciones sudamericanas, goza de una posición geoestratégica. Su vasta extensión territorial, su población y su economía robusta refuerzan su relevancia, aunque no lo eximen de los desafíos de seguridad en la región.

La Declaración sobre Seguridad en las Américas, adoptada por la OEA en 2003, introdujo el concepto de *seguridad hemisférica*, que abarca aspectos políticos, económicos, sociales, de salud y ambientales (Chillier y Freeman, 2005). Los Estados miembros se comprometieron a adoptar un enfoque multidimensional para abordar los problemas de seguridad que afectan a la región, reconociendo el carácter multifacético de los conflictos (OEA, 2011).

Rebolar et al. (2016) clasifican la seguridad en dos categorías: i) internacional, que hace referencia al sistema internacional; y ii) nacional, que abarca los problemas de seguridad regional. Por su parte, Ocampo et al. (2022) señalan que el enfoque de seguridad multidimensional ha transformado las funciones estatales y la estructura administrativa, ampliando las responsabilidades de las fuerzas armadas para incluir tareas como seguridad pública, combate al narcotráfico, protección cibernética y respuesta a desastres naturales (véase la Tabla 2).

Tabla 2. Dimensiones de la seguridad y nuevas amenazas

Dimensiones de la seguridad	Nuevas amenazas a la seguridad
Seguridad internacional	El terrorismo, el crimen organizado transnacional, el narcotráfico, la corrupción, el lavado de dinero, el tráfico ilegal de armas y sus interconexiones.
	Trata de personas.
	Los ataques a la seguridad cibernética.
Seguridad nacional	La posibilidad de que los terroristas no solo adquieran armas de destrucción masiva, sino que también hagan un uso indebido de sus vectores.
	La pobreza extrema y la exclusión social no solo socavan la estabilidad y la democracia, sino que también debilitan la cohesión social y amenazan la seguridad de los Estados.
	Los desastres naturales y los causados por el hombre, así como las enfermedades que afectan a la población.

Dimensiones de la seguridad	Nuevas amenazas a la seguridad
Seguridad nacional	Otros riesgos para la salud y la degradación del medioambiente. El riesgo de daños causados por accidentes o incidentes durante el transporte marítimo de materiales potencialmente peligrosos, como el petróleo y los residuos tóxicos.

Fuente. Adaptado de Rebolar et al. (2016).

En Brasil, las Fuerzas Armadas, especialmente la Fuerza Aérea, han ampliado sus funciones para incluir tareas subsidiarias relacionadas con el desarrollo nacional, la defensa civil, la seguridad pública y la lucha contra el crimen transfronterizo. Esta expansión responde a las exigencias del nuevo contexto estratégico. A pesar de un prolongado período de baja percepción de amenazas externas, Brasil debe identificar y analizar el entorno operacional emergente. La adaptación a estos cambios es esencial para garantizar la operatividad y la eficacia de sus Fuerzas Armadas, así como la seguridad y el desarrollo nacional.

Nuevo ambiente operacional y sus efectos en el empleo del poder aeroespacial

Hasta el momento, el contexto estratégico analizado permite identificar las características del nuevo entorno operacional, las cuales resultan útiles para anticipar los efectos del empleo del poder aeroespacial.

En lugar de realizar predicciones complejas basadas únicamente en la observación del pasado y el presente, un ejercicio desafiante en un entorno volátil, incierto, complejo y ambiguo, este proceso se centra en la investigación y la reflexión sobre un futuro en el que las fuerzas armadas estarán involucradas.

El documento *Entorno estratégico 2035*, elaborado por el Centro Superior de Estudios de la Defensa Nacional (CESEDEN), define el *entorno operativo* en los siguientes términos:

[...] el marco donde interactúan todas las variables que tienen influencia inmediata en las acciones que, para alcanzar o satisfacer sus objetivos políticos, desarrollan los diferentes actores a través del ejercicio de las operaciones militares.

Así, el entorno operativo estaría formado por los sujetos (estatales y no estatales) y sus formas de relacionarse (aisladamente, alianzas, coaliciones, etc.); las estrategias (convencionales, asimétricas o híbridas); los ámbitos de operación (terrestre, marítimo, aeroespacial, ciberespacial y cognitivo); los

medios y capacidades; los retos y oportunidades; las operaciones o comedidas a través de los cuales se ejecutan las estrategias; y un largo listado de variables que condicionan la forma en que deben operar las FAS. (p. 32)

El ambiente operacional actual está condicionado por el contexto estratégico, caracterizado por la rápida evolución tecnológica, la interconectividad global, el enfoque multidominio y las estrategias híbridas emergentes. La globalización ha intensificado la interdependencia entre las naciones, lo que hace que los conflictos sean más complejos y menos previsibles. Además, la era de la información ha destacado la importancia del dominio cibernético y de las operaciones cognitivas, donde la guerra de narrativas y la desinformación desempeñan un papel crucial.

Este entorno también es de gran relevancia para las fuerzas armadas de Brasil y otros países latinoamericanos, que deben adaptarse a desafíos como las amenazas cibernéticas, las estrategias híbridas, la IA, los sistemas autónomos y la seguridad regional y global. La interconectividad global amplifica el impacto de las crisis, es decir, lo que ocurre en una parte del mundo pueden repercutir en otras, lo que exige un enfoque cooperativo y multidimensional para la seguridad.

Además, la proliferación de tecnologías avanzadas y la creciente presencia de actores no estatales requieren que las fuerzas armadas desarrollen capacidades flexibles e innovadoras, a fin de salvaguardar la soberanía y la estabilidad nacional. En este contexto, el entorno operacional, que es enfrentado por la OTAN, sirve como una referencia clave para la preparación estratégica y operativa del poder militar de Brasil y América Latina.

Tabla 3. Caracterización del ambiente operacional a corto y medio plazo

Elementos de análisis	Características que definirán el ambiente operacional
Sujetos (tanto estatales como no estatales) y sus formas de relacionarse (individualmente, en alianzas o coaliciones)	<ul style="list-style-type: none"> • El progreso tecnológico y la intensificación de la interconectividad propiciarán un incremento cuantitativo y una diversificación cualitativa de los actores con capacidad de injerencia en los asuntos internacionales. • La naturaleza integral y multidimensional de la seguridad exigirá que las fuerzas armadas fortalezcan su cooperación con actores estatales y no estatales, tanto a nivel nacional como internacional.
Estrategias convencionales, asimétricas o híbridas	<ul style="list-style-type: none"> • Se priorizarán las estrategias de anticipación, prevención y disuasión sobre las de reacción o respuesta. • Aunque las estrategias convencionales seguirán vigentes, aumentarán las no convencionales e híbridas. • La integración tecnológica contribuirá a reducir o amenazar la asimetría militar, difuminando la línea entre la guerra y la paz al emplear un amplio espectro de conflictos.

Elementos de análisis	Características que definirán el ambiente operacional
Ámbitos de operación (terrestre, marítimo, aeroespacial, ciberespacial y cognitivo)	<ul style="list-style-type: none"> • A los dominios físicos tradicionales (terrestre, marítimo y aéreo) se sumarán, con creciente intensidad, nuevos ámbitos de operación: el ciberespacial, el cognitivo y el espacio ultraterrestre, este último integrado al dominio aeroespacial. • El espacio ultraterrestre, por albergar sistemas esenciales para el desarrollo social, económico y militar de las naciones, se convertirá en un escenario de intensas disputas. Esto generará la necesidad de desplegar sistemas de armas para proteger los activos en órbita, promoviendo así su militarización. • Mayor protagonismo de los ámbitos no físicos y del espectro electromagnético, impulsado por el fácil acceso de diversos actores a las nuevas tecnologías.
Medios y capacidades	<ul style="list-style-type: none"> • Para 2035, la tecnología será uno de los principales impulsores del cambio en el entorno operacional, aunque por sí sola no garantizará el éxito. • Los avances en miniaturización y nanotecnología permitirán que organizaciones e incluso individuos aislados puedan llevar a cabo acciones letales con consecuencias potencialmente desestabilizadoras a nivel estatal, regional o internacional.
Desafíos y oportunidades	<ul style="list-style-type: none"> • Para resolver conflictos, las fuerzas armadas deben aprovechar las oportunidades del futuro ambiente operacional, como la innovación tecnológica, la cooperación interna y externa, la mejora de la comprensión situacional, la profesionalización y la modernización como instrumentos del Estado.
Operaciones o actividades mediante las cuales se implementan las estrategias	<ul style="list-style-type: none"> • Para las operaciones, los espacios de confrontación serán áreas complejas donde el adversario pueda tener ventajas operativas (como zonas urbanas altamente pobladas, litorales, regiones montañosas, subterráneas y fronterizas); lugares de alto valor estratégico y bajo costo (como centros económicos, financieros, de comunicaciones y gubernamentales); infraestructuras críticas y servicios esenciales (como redes energéticas, telecomunicaciones y turismo); y espacios globales (como el ultraterrestre y el ciberespacio).

Fuente. Adaptado de CESEDEN (2019) y Cortés (2022).

Martínez (2022) señala que los avances tecnológicos transformarán el entorno operacional al ampliar el alcance de las operaciones y permitir una mayor sensorización y automatización en el procesamiento de la información y el uso de sistemas de armas. Para todos los actores involucrados, el desarrollo tecnológico y el acceso a las nuevas tecnologías serán cruciales.

Efectos del nuevo ambiente operacional en la aplicación del poder aeroespacial

Los aspectos del nuevo entorno operacional subrayan la urgencia de evolucionar y adaptarse a los paradigmas emergentes. No se trata únicamente de ajustar procedimientos, sino de adoptar una forma completamente distinta de operar. El

protagonismo de los ámbitos que no son físicos, la naturaleza multidimensional de la seguridad y el papel decisivo de la tecnología en la libertad de acción y en el ritmo de batalla demuestran que las estrategias tradicionales de las operaciones conjuntas son suficientes para abordar la complejidad de los escenarios y las amenazas actuales (véase la Tabla 4).

Tabla 4. Efectos del nuevo ambiente operacional en el empleo del poder aeroespacial

Aspectos del nuevo ambiente operacional	Efectos y aportes para el empleo del poder militar con énfasis en el poder aeroespacial
Interdependencia y capacidad de interacción entre dominios	<ul style="list-style-type: none"> • La interdependencia entre dominios complica la obtención de la superioridad por medios tradicionales. Así, el éxito de una operación destinada a la superioridad aérea puede estar condicionado por estrategias no convencionales y efectos producidos en otros dominios. • La capacidad de un adversario para operar rápida y sincronizadamente en múltiples dominios exige un cambio de mentalidad. Para contrarrestar esta amenaza, se requiere una interoperabilidad avanzada y sincronizada en red, respaldada por una conectividad segura y resiliente a ataques cibernéticos (<i>combat cloud</i>), que integre diversos sistemas y plataformas.
Avances tecnológicos	<ul style="list-style-type: none"> • El desarrollo de sistemas de armas más sofisticados, como los hipersónicos, sumado al empleo de otros dominios, exigirá a los futuros comandantes una mayor adaptabilidad, flexibilidad y agilidad mental, mientras que los sistemas involucrados tendrán que contar con redundancia, resiliencia y una rápida recuperación ante situaciones adversas. • La automatización y la aceleración de los procesos mejorarán sustancialmente el desempeño del personal militar, incrementando la eficacia y eficiencia de las fuerzas armadas, optimizando sus contingentes, mejorando la capacidad de anticipación y aumentando la precisión y efectividad de los sistemas de armas.
Fácil acceso de nuevos actores a tecnologías avanzadas	<ul style="list-style-type: none"> • La innovación tecnológica también conlleva desventajas. El fácil acceso a las nuevas tecnologías favorece el surgimiento de amenazas al democratizar conocimientos que antes estaban restringidos. Combinado con estrategias híbridas, esto permite la aparición de un mayor número de actores, otorgando protagonismo a individuos o grupos capaces de generar efectos con consecuencias impredecibles.
Enfoque de seguridad multidimensional	<ul style="list-style-type: none"> • El enfoque de seguridad multidimensional ha ampliado las responsabilidades de las fuerzas armadas, que ahora incluyen tareas como la seguridad pública, la lucha contra el narcotráfico, la protección cibernética y la respuesta a desastres naturales. Esto ha repercutido en las funciones del Estado y su estructura administrativa.

Fuente. Adaptado de CESEDEN (2019); Cortés (2022); Reilly (2016).

En síntesis, y en relación con los efectos y las alteraciones en el empleo del poder aeroespacial, detallados en la tabla anterior, se destaca el desarrollo de capacidades para operar en red mediante la conectividad segura de diversos sistemas de armas y plataformas tripuladas y no tripuladas (*combat cloud*).

Esto incluye la incorporación de nuevas tecnologías, como la computación cuántica, la IA y la gestión de *big data*, con el objetivo de respaldar el proceso de toma de decisiones en el empleo de medios, tanto en misiones de combate como en operaciones contra el crimen transnacional.

En este escenario futuro, el acceso a nuevas tecnologías y el uso de la IA en sistemas avanzados de análisis se erigen como una capacidad fundamental debido a su potencial para procesar datos de forma rápida y precisa. Su utilidad es innegable en el ciclo de toma de decisiones, sobre todo en campañas aéreas.

Este análisis del contexto estratégico, con sus riesgos y amenazas, justifica la implementación de proyectos destinados al desarrollo del poder aeroespacial brasileño. Esta iniciativa permite al país estructurar medios de defensa con capacidades que contribuyen al logro y mantenimiento de los objetivos estratégicos nacionales definidos por la Estrategia Nacional de Defensa (END).

Empleo de la IA en el contexto del poder aeroespacial de la Fuerza Aérea Brasileña (FAB)

El informe de Microsoft sobre la IA en Brasil destaca la investigación *Trust in Artificial Intelligence*², llevada a cabo por la consultora KPMG Business Insights, que revela que la confianza de los brasileños en la IA alcanza el 84 %, superando ampliamente el promedio global (61 %).

El documento subraya la importancia de la gobernanza y la ética en la implementación de estas tecnologías, destacando la necesidad de estructuras de supervisión y cumplimiento, así como de normas legales y regulatorias que orienten el desarrollo y el uso ético de la IA, lo que garantiza su confiabilidad y seguridad.

Los datos destacan el progreso de Brasil en la construcción de una infraestructura digital moderna, impulsando la creación de bancos de datos nacionales y centros de computación mediante alianzas con empresas, universidades e instituciones gubernamentales. Esta estructura tiene como objetivo fortalecer la soberanía de los datos y mejorar la seguridad digital.

Con el fin de orientar las inversiones gubernamentales y proporcionar directrices a la sociedad para el desarrollo escalable de la IA, se creó la Estrategia Brasileña de Inteligencia Artificial (EBIA).

² Para obtener más información, consulte el informe *Inteligencia artificial en Brasil: explorando oportunidades*, disponible en: <https://n9.cl/h12sk>

Estrategia Brasileña de Inteligencia Artificial

La EBIA tiene como objetivo orientar las acciones del Estado brasileño en investigación, innovación y creación de soluciones mediante la IA. Sus principales metas incluyen la elaboración de principios éticos para su desarrollo y uso responsable; la promoción de inversiones en I+D en IA; y la promoción de un entorno basado en el concepto de *triple hélice* (cooperación público-privada, industria y centros de investigación), con miras al desarrollo de tecnologías y servicios basados en la IA.

Para alcanzar estos objetivos, la estrategia define nueve ejes temáticos³, analiza la situación actual de la IA a nivel global y nacional, identifica obstáculos, propone una perspectiva futura y delinea medidas estratégicas.

IA confiable

Los ejes transversales de la EBIA son la base para el desarrollo de sistemas de IA confiables. Entre estos, destacan el rol de las normativas en la consolidación de la IA como tecnología y área aplicada; la relevancia de la gobernanza para garantizar la confiabilidad de la tecnología y de las instituciones que la desarrollan; y la importancia de un ecosistema de IA interconectado con otros sectores de la sociedad, tanto a nivel nacional como internacional.

- Eje 1: Legislación, regulación y uso ético

Establecimiento de directrices legales, regulatorias y éticas para guiar el progreso y la aplicación de la tecnología. En el centro de estas discusiones se encuentra la preocupación por lograr un equilibrio entre los siguientes aspectos:

- o Protección y defensa de los derechos, incluyendo aquellos relacionados con la protección de datos personales, así como la prevención de la discriminación y el sesgo algorítmico.
- o Mantenimiento de estructuras adecuadas que incentiven el desarrollo de una tecnología cuyas capacidades todavía son inciertas.
- o Definición de parámetros legales que garanticen la seguridad jurídica con respecto a la responsabilidad de los distintos actores involucrados en la cadena de valor de los sistemas autónomos.

³ Las acciones estratégicas, o ejes verticales, comprenden calificaciones para un futuro digital; fuerza de trabajo y capacitación; investigación, desarrollo, innovación y emprendimiento; aplicaciones en los sectores productivos y en el sector público; y seguridad pública. Los ejes transversales, que sientan las bases para una IA confiable, incluyen legislación, regulación y uso ético; gobernanza de la IA; y aspectos internacionales.

- Eje 2: Gobernanza de la IA

La gobernanza de la IA es esencial para prevenir sesgos en algoritmos y bases de datos. Durante todo el ciclo de vida de los sistemas de IA, es crucial implementar rutinas de gestión de riesgos, monitoreo y supervisión, incorporando principios como la privacidad, la seguridad, los derechos humanos y la ética.

Para una IA confiable, la *accountability* demanda estructuras de gobernanza que garanticen el cumplimiento y la implementación de mecanismos, como la asignación de responsabilidades, la concienciación interna y la creación de procesos para la resolución de conflictos, que pueden incluir certificaciones y códigos de conducta.

- Eje 3: Aspectos internacionales

A nivel internacional, diversos organismos buscan establecer principios éticos globales y estándares técnicos, así como fomentar el intercambio de conocimientos y la implementación de prácticas y métricas que permitan evaluar el avance de la IA. La comunidad científica y académica desempeña un papel crucial al promover discusiones multisectoriales y transdisciplinarias, el intercambio de investigadores y la colaboración en estudios conjuntos.

A fin de fortalecer la presencia de Brasil en el escenario global, es esencial intensificar los flujos de conocimiento, comercio, finanzas, personas, datos y comunicaciones con países y bloques de intereses convergentes. La tendencia apunta a la creación de plataformas de cooperación que permitan el intercambio de información, especialmente relevantes en la construcción de ecosistemas para el sector Defensa.

Ecosistemas

En la FAB, las actividades sectoriales se desarrollan bajo una arquitectura de sistemas interconectados, en la que diferentes organizaciones militares y grandes comandos operan de manera transversal. En el campo de las aplicaciones operacionales de la IA, el desarrollo técnico-científico tiene lugar en un ecosistema que involucra al Departamento de Ciencia y Tecnología Aeroespacial (DCTA), al Departamento de Control del Espacio Aéreo (DECEA), al Comando de Operaciones Aeroespaciales (COMAE) y al Comando de Preparación (COMPREP).

Los grandes comandos definen las demandas operacionales que guían el desarrollo de soluciones. El suministro de datos sobre las aplicaciones operacionales es fundamental para obtener resultados accionables y aplicables. Además, proveen al personal militar, la fuerza laboral encargada de la investigación.

Otro factor clave es la existencia de programas de posgrado, tanto *lato sensu* como *stricto sensu*. La FAB cuenta con el Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), donde se concentran las investigaciones sobre IA. Un aspecto diferencial es el programa de posgrado en Aplicaciones Operacionales (PPGAO), gestionado por el Estado Mayor de la Aeronáutica (EMAER).

El EMAER y el DCTA buscan recursos externos para desarrollar tecnologías en colaboración con la industrial nacional, promoviendo la triple hélice de la innovación (gobierno, academia e industria). Este ecosistema impulsa el desarrollo tecnológico de la IA en diversos segmentos del poder aeroespacial, incluyendo la industria aeronáutica, la logística, el análisis de procesos decisorios, la seguridad de vuelo, la simulación de combate (p. ej., el *Beyond Visual Range* [BVR]), el control del espacio aéreo y las aplicaciones operacionales, como la cibernética, la inteligencia, la vigilancia y el reconocimiento.

Ejemplos de aplicaciones de IA en segmentos del poder aeroespacial

La IA impacta significativamente diversos ámbitos de la vida humana, incluyendo la producción industrial, la seguridad, las relaciones interpersonales y los cuidados de la salud. La IA comprende múltiples áreas que pueden aplicarse de forma complementaria o independiente, como el aprendizaje automático (*machine learning*), la robótica, el procesamiento de lenguaje natural, el reconocimiento de voz y el reconocimiento de imágenes.

En el ecosistema de la FAB, específicamente en el ámbito académico, se han realizado investigaciones sobre la IA en áreas clave del poder aéreo, como la industria aeronáutica, el control del espacio aéreo, la seguridad de vuelo y la toma de decisiones, con un énfasis creciente en las dos últimas décadas (Nascimento, 2019; Scarpari, 2023; Santos, 2021; Machado, 2023; Dantas, 2018; Costa, 2023).

En este capítulo, se abordarán las aplicaciones operacionales relacionadas con las actividades que implican el uso de imágenes de percepción remota, las cuales contribuyen doctrinalmente a las tareas de inteligencia, vigilancia y reconocimiento (IVR).

Toma de decisiones

La IA puede aplicarse al análisis de procesos decisorios. Costa (2023) propone una estrategia de aprendizaje por refuerzo para adaptar modelos de toma de decisiones con conciencia situacional, un factor clave que garantiza decisiones exitosas en entornos de seguridad y misiones críticas, como el control del tráfico aéreo y la distribución de energía.

Los sistemas convencionales de apoyo a la decisión requieren la intervención de expertos para su configuración inicial, lo que los hace lentos, como ocurre en el caso del monitoreo del tráfico aéreo. En contraste, el aprendizaje por refuerzo, una estrategia de IA, busca maximizar las recompensas acumulativas y mejorar el rendimiento a través de la experiencia, superando a algoritmos tradicionales, como *Naïve Bayes* y *Árbol de Decisión*.

El combate aéreo más allá del alcance visual (BVR) es otro proceso de apoyo a la decisión de gran relevancia operacional. Para mejorar la conciencia situacional de los pilotos de combate, Dantas (2018) propuso un enfoque basado en redes neuronales artificiales, utilizando los datos del radar, a fin de determinar o estimar la posición de los enemigos.

Una simulación de combate aéreo entre dos aeronaves equipada con un misil generó escenarios que permitieron analizar los comportamientos diferenciados. Un modelo de aprendizaje automático supervisado identificó los patrones ofensivos y defensivos de la aeronave enemiga, lo que mejoró la toma de decisiones durante el combate.

Control del espacio aéreo

Las técnicas de IA también pueden aplicarse al control del espacio aéreo, especialmente en la previsión de la capacidad aeroportuaria y la gestión del flujo de tráfico aéreo (ATFM) (Santos, 2021). Los desequilibrios entre la demanda y la capacidad son una de las principales causas de la ineficiencia del transporte aéreo, contribuyendo significativamente a los retrasos y a las perturbaciones de los vuelos. Para resolver estos desequilibrios en la ATFM y optimizar el rendimiento del sistema, es necesario implementar la IA.

Un estudio sobre el Aeropuerto Internacional de Guarulhos (GRU) desarrolló un modelo de previsión de la capacidad aeroportuaria utilizando datos históricos meteorológicos y de flujo de tráfico, y aplicando el aprendizaje automático. Se empleó la técnica *Random Forest*, lo que permitió una reducción de hasta el 10 % en los costos totales por retrasos. Este resultado demuestra una mejora con respecto a la práctica actual, que se basa únicamente en la gestión táctica de los retrasos aéreos.

Inteligencia, vigilancia y reconocimiento

La extracción automática de información mediante IA está experimentando un notable auge en el campo de la IVR, impulsada por el uso frecuente de imágenes provenientes de sensores aerotransportados y satelitales. Por lo general, la FAB emplea dos tipos de imágenes a gran escala: ópticas RGB y de radar de apertura sintética (SAR).

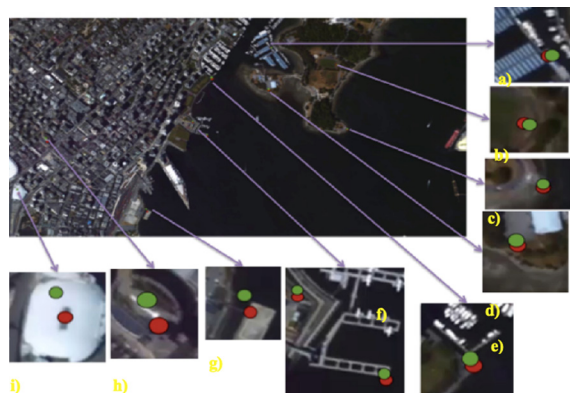
La implementación de estas tecnologías abarca la clasificación automática de características a partir de imágenes RGB de altísima resolución y el uso del *deep learning* en imágenes SAR. Esta última permite detectar pistas clandestinas en la Amazonía Legal brasileña y clasificar embarcaciones en la Amazonía Azul (Felice, 2022; Lacerda, 2020; Gomes, 2022).

Navegación por imágenes.

En el campo del sensoriamiento remoto sobresale el procesamiento de imágenes en tiempo real (PITER), desarrollado por el Instituto de Estudios Avanzados (IEAv). Su objetivo es independizar la navegación de los drones con sensores externos, como el GNSS, permitiendo la navegación autónoma mediante el análisis de imágenes. Entre las técnicas de IA, destacan las áreas de visión computacional, el reconocimiento de patrones y la fusión de datos (Kuroswiski, 2017; Silva, 2018; Paulino, 2019; Carnevalli, 2020).

Para la navegación por imágenes, es fundamental que el algoritmo pueda identificar los puntos de control en una ruta específica. Con este fin, y teniendo en cuenta las imágenes RGB capturadas por drones, se diseñó una metodología que permite el reconocimiento automático de los puntos de referencia en la superficie (p. ej., cruces, señales de tráfico pintadas en el pavimento, construcciones, etc.) y su comparación con imágenes de referencia (obtenidas mediante satélites u otras aeronaves) almacenadas en la memoria del sistema.

Figura 2. Imagen de satélite como referencia



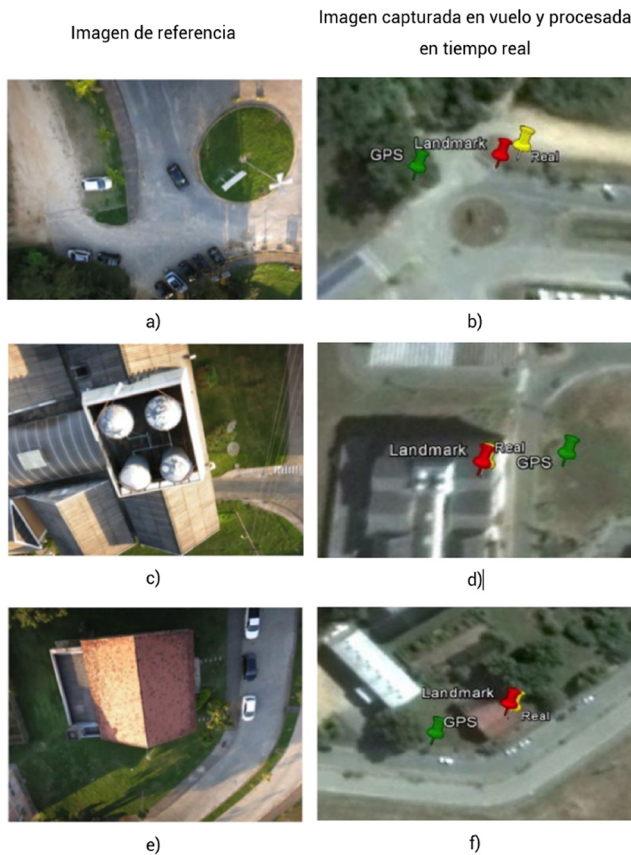
Nota. Los puntos en verde representan la posición real, y los puntos en rojo, la posición estimada por visión computacional. En sentido horario, comenzando desde la parte superior derecha, los errores (distancia entre la posición real y la estimada) son: a) 7,1 m; b) 6,6 m; c) 16,5 m; d) 25,8 m; e) 3,9 m; f) 6,7 m; g) 9,2 m; h) 33,7 m; i) 38,9 m.

Fuente. Adaptado de Silva (2016).

Alternativamente, la imagen de referencia puede obtenerse mediante un dron comercial que vuela a baja altitud. El algoritmo desarrollado se aplicó al procesamiento de un video capturado por un sensor electroóptico de una aeronave remotamente pilotada (ARP).

La Figura 3 muestra los puntos de referencia capturados por el dron comercial y aquellos identificados automáticamente por la ARP. Se puede observar la diferencia entre la posición real, (medida *in situ*) y la estimación obtenida mediante visión computacional. Los resultados obtenidos muestran una precisión superior a la ofrecida por el GPS, cuyo un error promedio conocido oscila entre 20 y 30 m (Silva, 2016).

Figura 3. Resultado del procesamiento.



Nota. La columna de la derecha muestra una comparación visual entre la medición real del posicionamiento en el suelo, la posición estimada por el algoritmo de IA y la posición reportada por el GPS. Esta comparación se realiza a partir de la imagen de referencia capturada por un dron comercial y de la imagen procesada en tiempo real mediante el sensor electroóptico de una ARP de la FAB.

Fuente. Adaptado de Filho (2016).

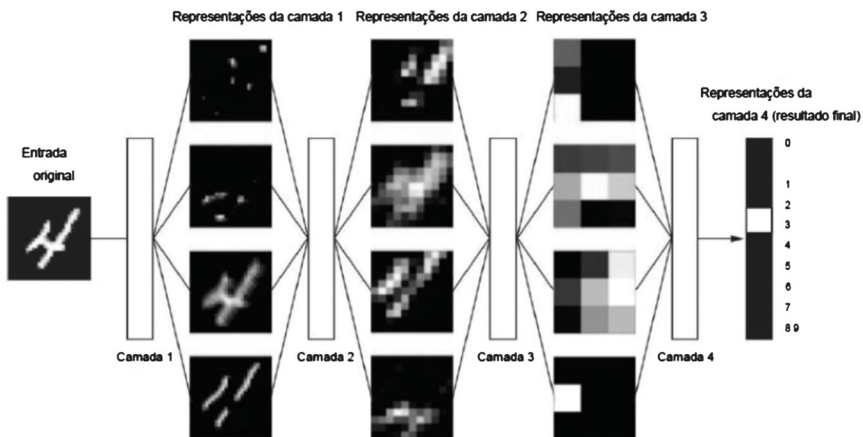
Las Figuras b, d y f presentan errores de 5,7 m, 0,7 m y 1,6 m entre la posición real y el punto de referencia. En comparación, el error promedio del GPS varía entre 20 y 30 m.

Objetivos de interés, pistas clandestinas y dragas.

La detección de objetivos es una actividad inherente a la IVR. A continuación, se presentan algunas aplicaciones operacionales en las que la IA, específicamente el *deep learning* y la gestión de datos, desempeña un papel crucial. El estudio de Ferreira (2023) se centró en la detección y el reconocimiento de actividades terrestres. Para identificar objetivos, se utilizaron las técnicas más avanzadas del *deep learning*, en especial la red neuronal convolucional YOLO (V. O. 8).

Esta red fue entrenada y evaluada utilizando imágenes de aeronaves captadas por los satélites brasileños de la constelación Lessonia⁴. El procedimiento se realizó en ocho aeropuertos internacionales de Brasil, incluidos Guarulhos (SP), Brasilia (DF) y Galeão (RJ). Los satélites Lessonia emplean sensores de radar de apertura sintética (SAR) con tecnología *Iceye*, operando en la banda X y con polarización VV. Además, genera imágenes en los modos *stripmap* y *spot*.

Figura 4. Ejemplo de la extracción de características de la imagen de entrada en cada capa de la red neuronal convolucional (como YOLO, VGG-19, Inception, entre otras)



Nota. La salida resulta en un vector de atributos que será procesado mediante otras técnicas de clasificación basadas en IA, como el clasificador support vector machine (SVM) y la regresión logística.

Fuente. Adaptado de Ferreira (2023).

⁴ Lanzados en 2022, los satélites Lessonia brindan a Brasil la capacidad de obtener, de manera soberana, imágenes satelitales mediante SAR. Estos satélites desempeñan un papel clave en diversas áreas, como la defensa, la protección del medio ambiente, la agricultura, la minería, los proyectos de infraestructura, la gestión de recursos hídricos y la prevención de desastres naturales.

Figura 5. Detección de aeronaves en aeropuertos internacionales mediante imágenes SAR Lessonia, en banda X y con polarización VV



Nota. El algoritmo YOLO (V. O. 8) alcanzó una precisión superior al 80 % en la detección de aeronaves comerciales ubicadas en distintas posiciones dentro de los patios de estacionamiento.

Fuente. Adaptado de Ferreira (2023).

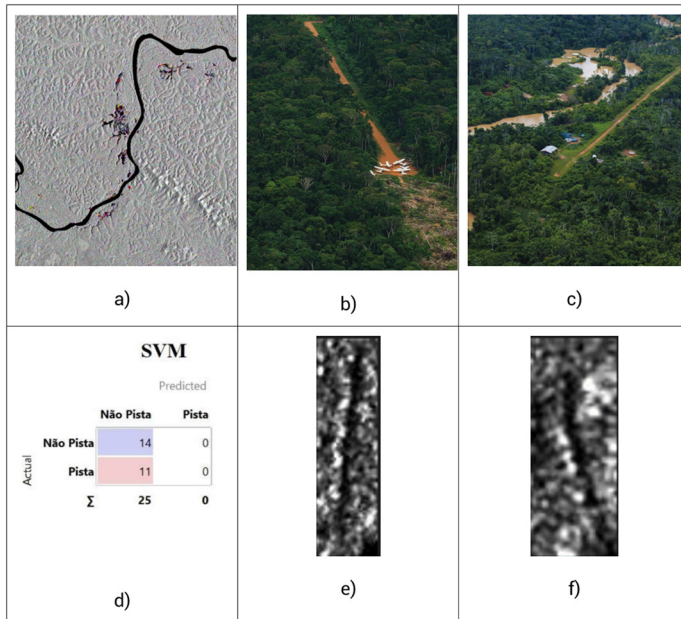
En cuanto a la detección de pistas clandestinas en la región amazónica brasileña, Gomes (2022) evaluó el desempeño de técnicas basadas en redes neuronales convolucionales (como *Inception* [V. O. 3], VGG-19 y *Painters*) para identificar dichas pistas en imágenes SAR.

Para este estudio, se utilizaron imágenes SAR de la constelación ESA, específicamente de los satélites Sentinel-1, que operan en la banda C con polarización VV y VH, y ofrecen una resolución espacial de 10 m. Además, se emplearon imágenes ópticas de la constelación Planet, que operan en el espectro visible (en formato RGB) y tienen una resolución espacial de 3 m.

La Figura 6 muestra los resultados obtenidos al utilizar la técnica VGG-19 como extractor de características, combinada con el clasificador SVM, cuyo objetivo es diferenciar y etiquetar los píxeles de las imágenes como pistas.

En una de las pruebas realizadas, se incluyeron muestras representativas tanto de pistas clandestinas como de elementos que no lo son. La correcta presentación de estos datos a las redes neuronales es fundamental para evitar la confusión entre los elementos presentes en la escena y los objetivos que se desean identificar. En el siguiente ejemplo, se presentaron 14 muestras de *no pistas* y 11 muestras de *pistas*, todas debidamente validadas mediante la verdad de campo.

Figura 6. Ejemplo de pistas clandestinas que dan soporte logístico a las minas ilegales, detectadas mediante IA en imágenes SAR del satélite Sentinel-1



Nota. La Figura 6a ilustra el área con intensa actividad en las inmediaciones del río Urucóera. Las figuras 6b y 6c muestran dos ejemplos de pistas clandestinas capturadas en fotografías aéreas⁵. La Figura 6d demuestra que la prueba de validación del algoritmo de clasificación obtuvo el mejor rendimiento. Finalmente, las figuras 6e y 6f presentan dos ejemplos de pistas clandestinas detectadas mediante IA en imágenes SAR.

Fuente. Adaptado de Gomes (2022).

En la región amazónica, y con una estrecha vinculación logística a las pistas clandestinas, se identifican las dragas y las balsas utilizadas en la minería ilegal. Estas embarcaciones navegan extensas distancias a través de los ríos de la región, erigiéndose como los principales vectores para la extracción ilícita de minerales, así como para el tráfico de drogas y otras actividades delictivas.

Uno de los principales beneficiarios del ecosistema de IA es el COMAE, que utiliza los recursos de la Fuerza Aeroespacial para apoyar la vigilancia de estas áreas. Los resultados que se presentan a continuación son el fruto de la aplicación directa de los hallazgos derivados de las investigaciones académicas realizadas por este comando operacional.

⁵ Para obtener más información consulte, *Cicatrices en la selva. Evolución de la minería ilegal en la TI Yanomami en 2020*.

Las imágenes SAR del satélite Lessonia fueron procesadas utilizando diversas técnicas del *deep learning*. Inicialmente, los satélites se utilizan para escanear la extensa región. Las técnicas de IA señalan las ubicaciones con actividad de minería ilegal y la presencia de balsas o dragas en los ríos. A raíz de estas detecciones, fuerzas de superficie y aeronaves de la FAB son desplegadas para actuar contra estos vectores del crimen organizado.

La Figura 7 muestra los resultados del uso conjunto de satélites y aeronaves, destacando la economía de recursos generada y el consiguiente aumento de la eficiencia operativa. Las actividades de minería ilegal afectan a las poblaciones indígenas y ribereñas, además de causar graves daños al medio ambiente.

Las figuras 8 y 9 ponen de manifiesto la complejidad del entorno amazónico, caracterizado por sus vastos y tortuosos ríos. La estacionalidad influye en el ambiente, manifestándose de forma diferenciada en las imágenes, lo que demanda un ajuste constante de los entrenamientos y un refinamiento de las muestras de objetivos y no objetivos, proporcionadas a la IA para su detección. Estas figuras muestran los excelentes resultados obtenidos, los cuales han sido implementados en las operaciones de vigilancia.

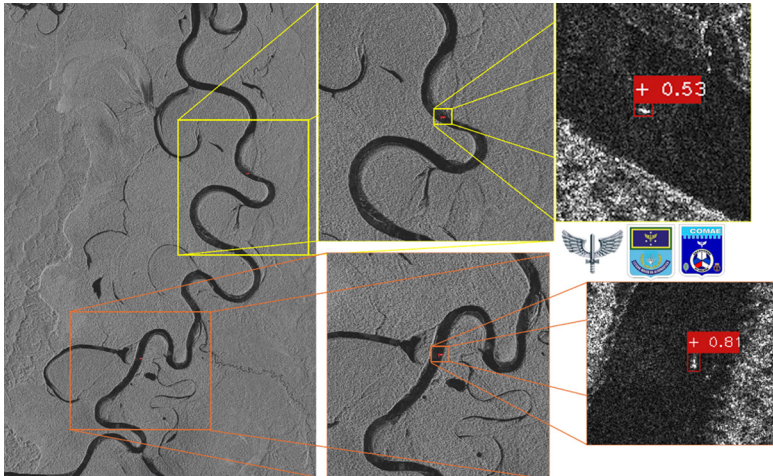
Figura 7. Imagen SAR del satélite Lessonia capturada sobre la región amazónica brasileña



Nota. Mediante la IA, se llevó a cabo una detección inicial de las dragas vinculadas a la minería ilegal y al tráfico de drogas. A raíz de esta detección, aeronaves de la FAB fueron desplegadas para realizar una intervención puntual. Las imágenes ópticas, capturadas por estos vectores, confirmaron la detección efectuada por la IA en la imagen satelital, evidenciando el impacto ambiental y las interferencias en la vida de las poblaciones autóctonas.

Fuente. Elaboración propia.

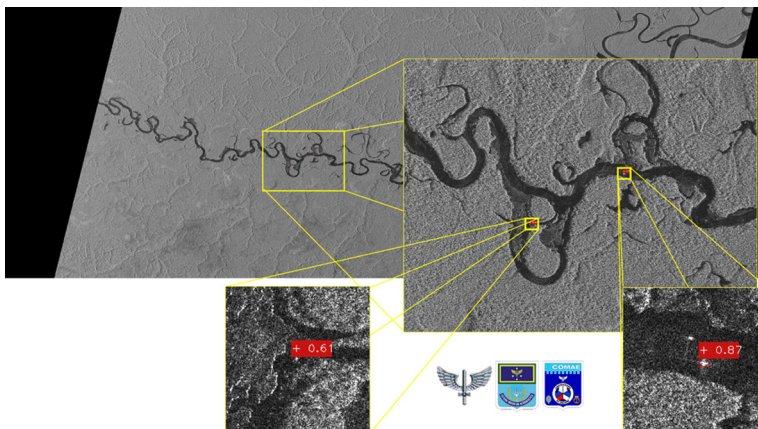
Figura 8. Imagen SAR del satélite Lessonia capturada sobre la región amazónica brasileña



Nota. A pesar de la extensa cobertura de nubes, la obtención de imágenes SAR no se ve afectada, ya que los radares que operan en la banda de microondas. Además, el sistema satélites-aeronaves incrementa la operatividad para la vigilancia de esta región, caracterizada por un relieve variado, selvas densas y ríos extensos.

Fuente. Elaboración propia.

Figura 9. Imagen SAR del satélite Lessonia capturada sobre la región amazónica brasileña



Nota. Una de las principales ventajas del SAR es su independencia de la iluminación solar, lo que permite una vigilancia ininterrumpida de la región amazónica. Además, la alta precisión media de las técnicas de IA, superior al 90 %, se traduce en una elevada confiabilidad de los resultados.

Fuente. Elaboración propia.

Monitoreo de plataformas petroleras, pesca ilegal y control del tráfico marítimo.

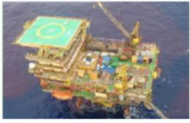






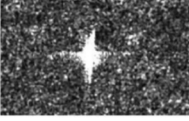
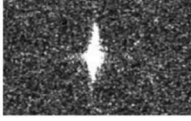
El monitoreo de la costa brasileña, mediante IA aplicada a imágenes de sensoramiento remoto, es otra aplicación operativa relevante. Brasil, poseedor de una extensa región costera y con una explotación económica diversificada, especialmente en la extracción de petróleo, emplea actividades de IVR sobre las plataformas petrolíferas con el objetivo de garantizar su seguridad y detectar derrames en el mar, facilitando la emisión eficaz de alertas de contención.

Con el objetivo de reconocer automáticamente los diferentes tipos de plataformas petroleras, Falqueto et al. (2019) realizaron un estudio utilizando imágenes SAR del satélite Sentinel-1, en banda C, con polarizaciones VV y VH, una resolución espacial de 20 m y obtenidas mediante el modo de imagen IW.

La extracción de atributos de los objetivos se realizó utilizando las redes neuronales convolucionales VGG-16 y VGG-19. Tras finalizar la etapa de entrenamiento, la regresión logística demostró ser el clasificador con mayor rendimiento, alcanzando una precisión superior al 80 %, con la VGG-19 destacándose como el extractor de atributos más efectivo.

En la Figura 10 se compara el reconocimiento de las plataformas con el de los barcos mercantes. Si bien una simple observación visual no facilita la distinción entre los objetivos, la IA, mediante el procesamiento de los atributos numéricos extraídos, es capaz de diferenciarlos con precisión.

Figura 10. Identificación automática de plataformas petroleras en comparación con otros objetivos marítimos (barcos mercantes)

Tipo de plataforma Nombre (imagen)	Foto de plataforma	Amostra Pol. VV	Amostra Pol. VH
Fija Rojo-2 (C8E1)			
FPSO P-61 (4B43)			
No sumergible P-08 (1FC8)			

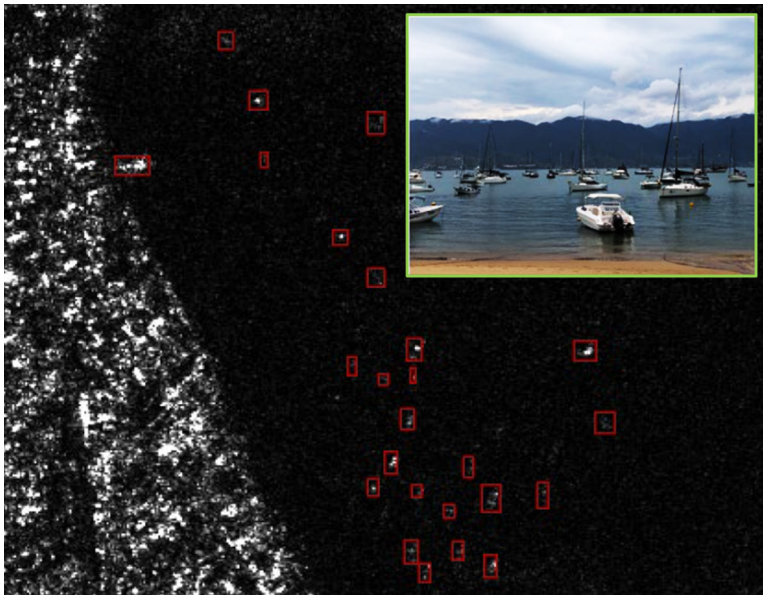
Nota. Para un intérprete humano, la diferenciación visual es muy poco intuitiva. Sin embargo, la IA es capaz de reconocer correctamente las plataformas (columnas izquierda y central) y diferenciar los barcos mercantes, a pesar de sus diversas formas y orientaciones con respecto al sensor SAR (columna derecha).

Fuente. Adaptado de Falqueto (2019).

En relación con la investigación previa, Oliveira (2021) realizó un estudio sobre la aplicación de la técnica YOLO (V. O. 4) en la detección de embarcaciones marítimas. El estudio se centró en la validación de los resultados mediante un extenso conjunto de datos de verdad de campo, y se incrementó la dificultad al seleccionar únicamente embarcaciones pesqueras y de recreo, ambas de pequeño porte (máximo 10 m de longitud).

A pesar de su uso lícito, estas embarcaciones presentan similitudes con las de menor tamaño, que se emplean en actividades ilícitas, como la pesca ilegal. Las imágenes utilizadas provienen del satélite Lessonia, obtenidas en modo *stripmap*, con una resolución espacial de 3 m y una polarización VV.

Figura 11. Imagen SAR del satélite Lessonia sobre la costa de São Paulo, Brasil



Nota. La red YOLO alcanzó una precisión superior al 80 % en la detección de las pequeñas embarcaciones (ver recuadro).

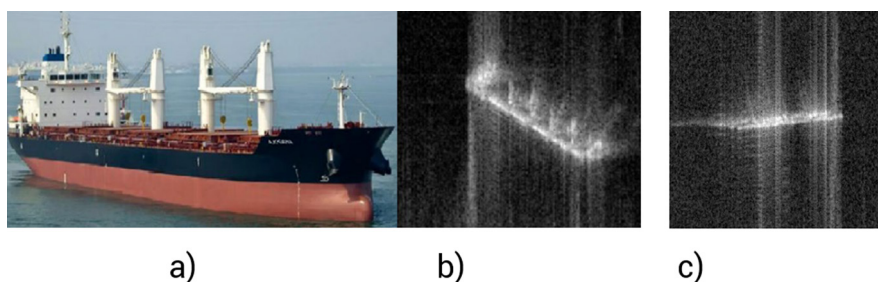
Fuente. Adaptado de Oliveira (2021).

Finalmente, el control del tráfico marítimo es otra aplicación de gran relevancia. En el estudio de Felice (2022), un sensor SAR instalado en una aeronave IVR de la FAB utilizó ISAR (SAR invertido) para identificar distintos tipos de embarcaciones. El autor comparó la capacidad de clasificación de la IA (VGG-16, VGG-19, *Inception* y *ResNet*) con la experiencia de varios operadores militares.

La Figura 13 compara los resultados de la IA y con los obtenidos por los especialistas, destacando la capacidad computacional de la IA para discernir detalles numéricos imperceptibles para el ojo humano.

Las redes neuronales convolucionales utilizadas fueron VGG16, VGG19, *Inception* y *ResNet*, siendo esta última la única arrojó identificaciones incorrectas. De los 21 especialistas consultados, solo 7 lograron identificar que el barco (véase la Figura 12c) correspondía al tipo de *carga general*.

Figura 12. Barco mercante de carga general



Nota. La imagen RGB (a) del barco mercante de carga general se compara con las imágenes ISAR del mismo buque, capturadas desde diferentes ángulos de aspecto (b y c).

Fuente. Adaptado de Felice (2022).

Figura 13. Comparación entre la capacidad de la IA para distinguir el objetivo en la imagen ISAR y la habilidad del especialista para reconocer el mismo objetivo

Respuesta correcta	Respuestas de la IA				Respuestas de los operadores	
	VGG16	VGG19	Inception	ResNet	Carga general (CG) (b)	Otros
Carga general (CG) del navío					7	14
Leyenda:	Acierto	Error				

Nota. ResNet fue la única red neuronal que no realizó una identificación correcta. De los especialistas, solo 7 lograron identificar que el barco correspondía al tipo de *carga general*.

Fuente. Adaptado de Felice (2022).

Big data, IA y el papel del poder computacional en el ciclo de comando y control

Uno de los principales desafíos actuales en la aplicación de técnicas de IA radica en la gestión de grandes volúmenes de datos, los cuales deben ser validados y organizados para su automatización. Además, la velocidad con la que estos datos

se expanden requiere de un poder computacional capaz de registrarlos, procesarlos y analizarlos con rapidez, garantizando así la superioridad de la información.

El poder computacional y la IA potencian las capacidades de comando y control, acelerando el análisis, la planificación y la toma de decisiones. Sus principales aplicaciones incluyen la navegación autónoma por imágenes, las simulaciones inteligentes, la defensa cibernética, las operaciones de búsqueda y rescate, la vigilancia de la Amazonía Legal contra la minería ilegal y la pesca predatoria, así como el patrullaje costero contra los *dark ships*.

Para lograr una navegación independiente de sistemas externos de posicionamiento y mejorar el rendimiento de los sistemas de armas, tecnologías como la visión computacional, el aprendizaje automático y la automatización impulsan el desarrollo de vehículos aéreos no tripulados.

En el ámbito de la defensa cibernética, el *deep learning* con *transformers* permite reconocer patrones de explotación y exfiltración de datos, facilitando la ejecución de acciones defensivas autónomas.

Para la extracción automática de la información proveniente de imágenes aéreas o satelitales, la IA potencia las capacidades de la IVR, facilitando la detección de cambios en áreas de interés y mejorando la conciencia situacional de los tomadores de decisiones.

Con base en datos históricos, la IA aplicada al poder aeroespacial permite tanto el diagnóstico de situaciones como la predicción de eventos futuros. La eficacia del método RLSD en la automatización de ajustes de parámetros cognitivos aumenta la confiabilidad de los sistemas y reduce la necesidad de mano de obra especializada.

En este capítulo se presentaron los principales estudios y proyectos relacionados con la aplicación de la IA en el ecosistema de la FAB, específicamente en el ámbito del poder aeroespacial. La próxima sección abordará la relación entre estos proyectos y los efectos del nuevo entorno operacional en el empleo del poder aeroespacial (véase la Tabla 4).

Relación entre los proyectos de aplicación de la IA en segmentos del poder aeroespacial brasileño y los aspectos del nuevo ambiente operacional

El análisis de los riesgos y las amenazas en el contexto estratégico actual revela que los aspectos del nuevo ambiente operacional exigen una transformación urgente del modelo de empleo del poder militar. La incorporación de tecnologías, como la IA y la computación cuántica, asociadas al concepto de *combat cloud*,

permitirá generar efectos entre dominios, lo que, a su vez, aumentará tanto la agilidad en el combate como la toma de decisiones, impactando directamente la conducción de las operaciones y el diseño futuro de las capacidades aeroespaciales.

La siguiente tabla relaciona y analiza la adherencia de los proyectos de aplicación de la IA con los aspectos del nuevo ambiente operacional, así como sus efectos en la preparación y el empleo del poder aeroespacial, considerando las capacidades y las repercusiones de cada proyecto.

Tabla 5. Adherencia entre aplicaciones de IA y el empleo del poder aeroespacial en el nuevo ambiente operacional

Aspectos del nuevo ambiente operacional	Aportes para el empleo del poder militar, con énfasis en el poder aeroespacial	Aplicaciones de IA orientadas a satisfacer las nuevas exigencias del poder aeroespacial
Interdependencia y capacidad de interacción entre dominios	Los futuros miembros de la Fuerza Aérea deben comprender que, en entornos multidominio, la superioridad depende del conocimiento situacional, basado en datos y sistemas avanzados de análisis que permitan tomar decisiones rápidas y precisas. Esto exigirá un mayor nivel de procesamiento, automatización e integración en todas las fases de la operación.	<ul style="list-style-type: none"> • Decision making • Inteligencia • Vigilancia • Reconocimiento • Big data • IA • Papel del poder computacional en el ciclo de comando y Control.
Avances tecnológicos	Los avances tecnológicos han impulsado la proliferación de nuevos sistemas de armas y han incrementado la eficiencia y eficacia de las operaciones militares mediante la automatización, la optimización del tiempo y los recursos, y el fortalecimiento de los procesos de toma de decisiones.	<ul style="list-style-type: none"> • Decision making • Inteligencia • Vigilancia • Reconocimiento • Big data • IA • Papel del poder computacional en el ciclo de comando y control.
Fácil acceso de los nuevos actores a tecnologías avanzadas	El ambiente operacional, cada vez más complejo y saturado, propicia la proliferación de actores y estrategias híbridas, que incluyen ciberataques, sabotajes y actos de terrorismo dirigidos contra infraestructuras aeroportuarias.	<ul style="list-style-type: none"> • Control del espacio aéreo.
Enfoque de seguridad multidimensional	Las Fuerzas Armadas se han visto obligadas a reestructurarse para responder a las nuevas demandas, que abarcan las amenazas tradicionales, como los conflictos entre Estados, y las amenazas no tradicionales, como el narcotráfico, las crisis migratorias, el crimen organizado, los ataques cibernéticos, los desastres naturales y las pandemias.	<ul style="list-style-type: none"> • Control del espacio aéreo • Inteligencia • Vigilancia • Reconocimiento.

Fuente. Elaboración propia.

Esta tabla demuestra que los proyectos de aplicación de la IA en la FAB están alineados con los aspectos del nuevo ambiente operacional y sus efectos en el empleo del poder aeroespacial, contribuyendo al fortalecimiento de las capacidades y estrategias del poder aeroespacial brasileño.

Conclusiones

En consonancia con la discusión presentada en este artículo, se puede concluir que el ambiente operacional en el cual las fuerzas armadas de una nación se verán compelidas a operar combatir ha experimentado una transformación sustancial como consecuencia de los factores previamente mencionados.

El entorno emergente se caracterizará por la interdependencia y la capacidad de interacción entre dominios, la proliferación de avances tecnológicos y su relativa accesibilidad a nuevos actores, así como por el enfoque de seguridad multidimensional impulsado por la OEA.

El primer aspecto destacado subraya la imperiosa necesidad de adoptar una mentalidad ágil, flexible e interoperable en todos los niveles, con el fin de contrarrestar la capacidad de un adversario para generar efectos expeditos y sincronizados en múltiples dominios.

Los proyectos de investigación relacionados con la toma de decisiones, la IVR, el *big data*, la IA y el rol del poder computacional en el ciclo de comando y control confieren capacidades significativas al poder aeroespacial al ampliar la conciencia situacional de los tomadores de decisiones y fortalecer la seguridad y resiliencia de la red mediante respuestas defensivas autónomas contra la explotación cibernética.

Caracterizado por los avances tecnológicos, este aspecto exige que los nuevos comandantes desarrollen habilidades de adaptación, flexibilidad y agilidad mental. Estas competencias fortalecen la redundancia y la resiliencia de los sistemas operacionales, con el objetivo de anticiparse al surgimiento de sistemas de armas cada vez más sofisticados y capaces de operar de forma sincronizada en múltiples dominios.

En este escenario, adquieren especial relevancia los proyectos de toma de decisiones, la IVR, el *big data*, la IA y el poder computacional en el ciclo de comando y control, debido su contribución al fortalecimiento de dichas capacidades. Respecto a los dos últimos aspectos —el fácil acceso de nuevos actores a tecnologías avanzadas y el enfoque de seguridad multidimensional— los resultados

evidencian el surgimiento de nuevas amenazas, el impulso de estrategias híbridas, la proliferación de actores emergentes y la necesidad de una mayor preparación para enfrentar misiones subsidiarias, especialmente aquellas dirigidas a combatir delitos transfronterizos y ambientales. Esto subraya la urgencia de fortalecer la cooperación entre las fuerzas armadas, las agencias de seguridad y otros actores clave, a fin de abordar la naturaleza integral y multidimensional de la seguridad.

En este contexto, los proyectos de investigación, el control del espacio aéreo y la IVR son fundamentales, especialmente en la detección de pistas clandestinas, dragas, pesca ilegal y el monitoreo de plataformas petroleras. Estas acciones son cruciales para aumentar la seguridad ante acciones de sabotaje y terrorismo, así como para mejorar la capacidad de respuesta operativa de los medios aéreos.

En conclusión, se puede afirmar que los objetivos establecidos por la EBIA y las acciones delineadas por los actores que componen el ecosistema de la FAB, destacando la sinergia entre los comandos operacionales (que abordan las demandas operativas) y el ITA (que concentra las investigaciones académicas), están alineados con las exigencias del uso del poder aeroespacial para enfrentar los desafíos futuros dentro de un nuevo modelo de gobernanza global, multipolar y asimétrico.

Referencias

- Carnevalli, R. C. (2020). *Metodologia para aceleração do desempenho em sistemas embarcados em Vants com processamento de imagens em tempo real* [Tese de maestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica]. ITA. https://marte2.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/marte2/2023/05.08.17.47/doc/155841.pdf?utm_source=chatgpt.com
- Centro Superior de Estudios de la Defensa Nacional [CESEDEN]. (2019). *Entorno Operativo 2035*. Ministerio de Defensa Madrid. https://www.ieee.es/Galerias/fichero/Otras-Publicaciones/Nacional/2019/entorno_operativo_2035.pdf
- Chillier, G., y Freeman, L. (2005). *El nuevo concepto de seguridad hemisférica de la OEA: Una amenaza en potencia*. WOLA. <https://n9.cl/c6op>
- Costa, R. D. (2023). *A Reinforcement Learning Strategy for Adapting Situation-Awareness Decision-Making Models* [Tese de doutorado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica]. ITA. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S002002552500060X?via%3Dihub>
- Dacoba, F. J. (2021). *Conflictividad s. XXI: Los grandes suben la apuesta*. Instituto Español de Estudios Estratégicos. https://www.ieee.es/Galerias/fichero/docs_analisis/2021/DIEEEA30_2021_FRADAC_Conflictividad.pdf
- Dantas, J. P. (2018). *Apoio à decisão para o combate aéreo além do alcance visual: Uma abordagem por redes neurais artificiais* [Tesis de maestrado em Análise Operacional e Engenharia Logística, Instituto Tecnológico de Aeronáutica]. ITA.
- Department Army. (2022). *Field Manual 3.0*. Army Publishing Directorate. <https://www.oreateai.com/blog/us-army-field-manual-30-2022-edition-analysis-of-multidomain-operations-theory/031c557169803463e0143f516e13ba66>
- Department of Defense. (2005). *Capstone Concept for Joint Operations (Version 2.0)*. Defense Technical Information Center.
- Donnelly, J., y Farley, J. (17 septiembre de 2018). Definición de "Dominio" en Multidominio. *Diario más allá del horizonte*. <https://n9.cl/fivye>
- Falqueto, L. E., Sá, J. A. S., Paes, R. L., & Passaro, A. (2019). Oil Rig Recognition Using Convolutional Neural Network on Sentinel-1 SAR Images. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 16(8), 1329-1333.
- Felice, C. H. (2022). *Classificação de embarcações em imagens ISAR utilizando transferência de aprendizado e redes neurais convolucionais* [Tese de maestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica]. ITA.
- Ferreira, W. R. (2023). *Detecção automática de aeronaves em solo utilizando aprendizado profundo em imagens SAR* [Tese de maestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica]. ITA.
- Fraga, G. S. (2021). *Utilização de transfer learning para classificação de pontes e pistas de pouso de imagens SAR do radar seaspray 5000 E* [Tese de especialização, Instituto Tecnológico de Aeronáutica]. ITA.
- Gomes, L. (2022). *Detecção automática de pistas de pouso na Amazônia Legal com uso de imagens SAR e aprendizado de máquina* [Tese de maestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica]. ITA.

- Hoffman, F. G. (2017). *Conflict in the 21st Century. The Rise of Hybrid Wars*. Potomac Institute for Policy Studies.
- Imbassahy, D. W. (2020). *A Hybrid Method to Diagnose Abnormal Situations Applied to a Landing Gear Model* [Tesis, Instituto Tecnológico de Aeronáutica]. ITA. http://www.bdita.bibl.ita.br/tesesdigitais/lista_resumo.php?num_tese=77457
- Kraemer, A. D. (2021). *A Framework for Offline Data-Driven Aircraft Failure Diagnosis* [Tesis de doctorado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica]. ITA.
- Kuroswiski, A. R. (2017). *Navegação aérea autônoma baseada em visão computacional* [Tese de graduação, Instituto Tecnológico de Aeronáutica]. ITA.
- Lacerda, M. G. (2020). *Abordagem GEOBIA para imagens VHR obtidas por aeronaves remotamente pilotadas e sensores satelitais com o uso de classificadores individuais e ensemble* [Tese de mestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica]. ITA.
- Lindberg, S. I., y Kolvani, A. P. (2021). El virus autocrático. *Política Exterior*, 35(201), 52-61.
- Machado, N. B. (2023). *Analysis of a Post-Stall Aircraft with Online Learning Using Neural Networks* [Tese de mestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica]. ITA.
- Martínez, J. M. (2022). El nuevo entorno operativo y las operaciones aeroespaciales. *Revista del Instituto Español de Estudios Estratégicos*, (20), 185-212.
- Ministerio de Defensa. (2018). *Diseño Estratégico-Fuerza Aérea 100* (Boletín no 180). Governo Federal de Brasil. <https://n9.cl/a03wz>
- Ministerio de Defensa. (2020a). *Política Nacional de Defensa (PND)*. Governo Federal de Brasil. <https://n9.cl/g3eb0>
- Ministerio de Defensa. (2020b). *Libro Blanco de Defensa Nacional*. Governo Federal de Brasil. <https://n9.cl/wfwvw>
- Ministerio de Defensa. (2020c). *Estrategia Nacional de Defensa*. Governo Federal de Brasil. <https://n9.cl/pgyrr>
- Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. (2021). *Estratégia Brasileira de Inteligência Artificial (EBIA)*. Governo Federal de Brasil. <https://n9.cl/97ec5o>
- Nascimento, N. M. (2019). *A Comparison of Machine Learning Approaches for Turbofan Engine Health Classification Using C-MAPSS Datasets* [Tesis, Instituto Tecnológico de Aeronáutica]. ITA. http://www.bdita.bibl.ita.br/tesesdigitais/lista_resumo.php?num_tese=75601
- Ocampo, G. A., Pinilla, T. S., Tovar, M. B., y Peña, J. D. (2022). Pasado, presente y futuro: Impacto de las nuevas amenazas en el rol de la Fuerza Aérea Colombiana en los tiempos de la seguridad multidimensional. En F. B. Valdés. (Ed.). *Poder Aéreo, espacial y ciberespacial: Frente a desafíos y amenazas multidimensionales que afectan al estado colombiano* (pp. 21-61). Sello Editorial ESDEG.
- Oliveira, H. C. T. (2021). *Detecção automática de pequenas embarcações em imagens SAR da constelação ICEYE com uso de uma rede neural convolucional*. Instituto Tecnológico de Aeronáutica.

- Organización de los Estados Americanos [OEA]. (2011). *La seguridad multidimensional y los retos actuales*. Asamblea General de la OEA. <https://n9.cl/iw25i>
- Pasa, G. D. (2019). *Application of Neural Network-Based Data-Driven Prognostics Methods for Complex Engineered Systems* [Tese de maestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica]. ITA.
- Paulino, Â. (2019). *Fusão de dados baseada em inteligência computacional híbrida adaptativa aplicada à navegação autônoma de ARPs em tempo real* [Tese de maestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica]. ITA.
- Rebolar, E., Lauriani, C., Kaiser, R., Versalovic, D., y Díaz, E. (2016). Visión crítica de la seguridad multidimensional y amenazas a la seguridad según la Secretaría de Seguridad Multidimensional de la OEA. *Revista Ensayos Militares*, 2(1), 43-59.
- Reily, J. M. (2016). Multidomain Operations. A Subtle but Significant Transition in Military Thought. *Air and Space Power Journal*, 30(1), 61-73.
- Santos, R. A. (2020). *A Study on Temporal Decorrelation Modeling in Synthetic Aperture Radars and Its Applications in Classification and Region Segmentation* [Tese de maestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica]. ITA.
- Santos, R. M. (2021). *Airport Capacity Prediction and Optimal Allocation for Strategic Air Traffic Flow Management at São Paulo/Guarulhos International Airport* [Tese de maestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica]. ITA.
- Scarpari, R. P. (2023). *Artificial Intelligence in Gear Failure Identification* [Tesis de fin de grado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica]. ITA. http://www.bdita.bibl.ita.br/tgsdigitais/lista_resumo.php?num_tg=79326
- Silva, N. G. (2018). *Avaliação de técnica de navegação aérea autônoma por imagens com uso de sensor termal de baixo custo* [Tese de graduação, Instituto Tecnológico de Aeronáutica]. ITA.
- Silva, P. F. (2016). *Automatic Landmark Recognition in Aerial Images for the Autonomous Navigation System of Unmanned Aerial Vehicles* [Tesis de fin de grado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica]. ITA. http://www.bdita.bibl.ita.br/tgsdigitais/lista_resumo.php?num_tg=75349
- Stabile, G. H. (2019). *Banco de imagens SAR para treinamento de técnicas de inteligência computacional aplicadas à missão de busca e salvamento* [Tesis de curso especializado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica]. ITA.
- Vilar, G. L. (2020). *Análise e previsão da aplicação de medidas de gerenciamento de fluxo no espaço aéreo brasileiro* [Tese de graduação, Instituto Tecnológico de Aeronáutica]. ITA.