



Identificación de los factores de riesgo técnico del aeródromo Marambio en la Antártida, a partir del levantamiento geodésico y vuelo con dron*

Jenny Alejandra Caro Martínez^a ■ Mario Alonso Aranguren Ramírez^b

Resumen: Este artículo de investigación expone el análisis realizado al aeródromo Marambio para la operación de la Fuerza Aérea Colombiana en territorio antártico mediante una investigación aplicada. El objetivo es determinar los riesgos operacionales antárticos, específicamente factores de riesgo técnico, a partir del levantamiento geodésico y vuelo aerofotogramétrico con dron, incluyendo la infraestructura del aeródromo y obstáculos, información que cumple los criterios de calidad establecidos en el *Manual del Sistema Geodésico Mundial 1984 - WGS-84* (OACI, 2002, Documento 9674). Con la información obtenida, se generaron los siguientes productos: modelo 3D, ortofoto, plano de aeródromo y procedimientos de vuelo por instrumentos, conformados por Carta de aproximación por instrumentos (IAC), Llegada normalizada (STAR) y Salida normalizada (SID). Posterior a la generación de los productos aeronáuticos, se realizó el análisis del aeródromo, teniendo en cuenta los criterios publicados por la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) y Aviación Civil Argentina (ANAC) para pistas en entorno antártico, reglamentación que aún no ha sido adoptada en Colombia. Los resultados permiten abordar la gestión de los factores de riesgo técnico a partir de la captura de datos, análisis del aeródromo y generación de cartografía aeronáutica como parte de los servicios de diseño de procedimientos de vuelo por instrumentos, resaltando la importancia de garantizar la integridad de la información en todo momento, al ser transversal a todos los procesos evaluados.

Palabras clave: seguridad operacional; Antártida; cartas aeronáuticas; topografía; aeródromo

Recibido: 29/12/2022 **Aceptado:** 08/09/2023 **Disponible en línea:** 29/12/2023

-
- * Artículo de investigación aplicada, producto del proyecto de investigación: Identificación de los peligros operacionales en la Antártida para la operación de la Fuerza Aérea Colombiana.
 - a Especialista en sistemas de información geográfica. Capitán Fuerza Aérea Colombiana, Bogotá D.C., Colombia. Correo electrónico: jacm2391@gmail.com ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5364-3734>
 - b Especialización Tecnológica en Gestión Aeronáutica (ETGA). Técnico primero, Fuerza Aérea Colombiana, Bogotá D.C., Colombia. Correo electrónico: marioarangurenatc@gmail.com ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9693-9017>

Cómo citar: Caro Martínez, J. A., & Aranguren Ramírez, M. A. (2023). Identificación de los factores de riesgo técnico del aeródromo Marambio en la Antártida, a partir del levantamiento geodésico y vuelo con dron. *Revista De Relaciones Internacionales, Estrategia Y Seguridad*, 18(2), 117-147. <https://doi.org/10.18359/ries.6607>

Identification of Technical Risk Factors at Marambio Aerodrome in Antarctica, Based on Geodetic Survey and Drone Flight

Abstract: This research article presents the analysis carried out on Marambio Aerodrome for the operation of the Colombian Air Force in Antarctic territory through applied research. The objective is to determine Antarctic operational risks, specifically technical risk factors, based on geodetic survey and aerial photogrammetric drone flights, including aerodrome infrastructure and obstacles. The information adheres to the quality criteria established in the World Geodetic System Manual 1984 (WGS-84) (ICAO, 2002, Document 9674). The obtained information led to the generation of the following products: a 3D model, orthophoto, aerodrome plan, and flight instrument procedures, including the Instrument Approach Chart (IAC), Standard Terminal Arrival Route (STAR), and Standard Instrument Departure (SID). After generating these aeronautical products, the aerodrome analysis was conducted, considering criteria published by the International Civil Aviation Organization (ICAO) and the Argentine Civil Aviation Authority (ANAC) for runways in the Antarctic environment, regulations that have not yet been adopted in Colombia. The results allow addressing the management of technical risk factors through data capture, aerodrome analysis, and aeronautical cartography generation as part of the instrument flight procedure design services. Emphasizing the importance of ensuring information integrity at all times, as it is integral to all evaluated processes.

Keywords: Operational Safety; Antarctica; Aeronautical Charts; Topography; Aerodrome

Identificação dos fatores de risco técnico do aeródromo Marambio na Antártida, a partir do levantamento geodésico e voo com drone

Resumo: Este artigo de pesquisa expõe a análise realizada no aeródromo Marambio para a operação da Força Aérea Colombiana em território antártico por meio de uma pesquisa aplicada. O objetivo é determinar os riscos operacionais antárticos, especificamente os fatores de risco técnico, a partir do levantamento geodésico e voo aerofotogramétrico com drone, incluindo a infraestrutura do aeródromo e obstáculos, informações que atendem aos critérios de qualidade estabelecidos no *Manual do Sistema Geodésico Mundial 1984 - WGS-84* (OACI, 2002, Documento 9674). Com as informações obtidas, foram gerados os seguintes produtos: modelo 3D, ortofoto, plano do aeródromo e procedimentos de voo por instrumentos, compostos por Carta de Aproximação por Instrumentos (IAC), Chegada Normalizada (STAR) e Saída Normalizada (SID). Após a geração dos produtos aeronáuticos, foi realizada a análise do aeródromo, levando em consideração os critérios publicados pela Organização de Aviação Civil Internacional (OACI) e Aviação Civil Argentina (ANAC) para pistas em ambiente antártico, regulamentação que ainda não foi adotada na Colômbia. Os resultados permitem abordar a gestão dos fatores de risco técnico a partir da captura de dados, análise do aeródromo e geração de cartografia aeronáutica como parte dos serviços de design de procedimentos de voo por instrumentos, ressaltando a importância de garantir a integridade das informações em todos os momentos, sendo transversal a todos os processos avaliados.

Palavras-chave: segurança operacional; Antártida; cartas aeronáuticas; topografia; aeródromo

Introducción

La agenda científica de la Comisión Colombiana del Océano (CCO) presenta la necesidad de que Colombia, como país latinoamericano, haga presencia en el continente blanco, debido a las características de conexión oceánica, climática y biológica entre la Antártida y Suramérica. Por ello, el país ha comenzado un proceso interno institucional y programático para posicionarse dentro del Sistema del Tratado Antártico mediante el cambio de su estatus de miembro adherente a consultivo, propiciando la cooperación internacional para superar dificultades de carácter técnico, logístico y financiero, y generando conocimiento científico para aumentar el reconocimiento global del país (Comité Técnico Nacional de Asuntos Antárticos, 2014).

La CCO resalta la importancia de articular la cooperación en primera instancia con países latinoamericanos, así como con el resto de naciones, realizando proyectos de investigación no solo de índole científico, sino también tecnológico, operativo y logístico, junto a referentes de Australia, Nueva Zelanda, Estados Unidos, Chile, Argentina y Ecuador (Comité Técnico Nacional de Asuntos Antárticos, 2014).

Por lo anterior, la Fuerza Aérea Colombiana (FAC) se vinculó desde el 2015 en actividades científicas en el tema y ha venido desarrollando operaciones aéreas en territorio antártico, proyectando su incremento en un futuro cercano (Tabares, 2021). Ejemplo de ello es el entrenamiento recibido por las tripulaciones colombianas del equipo Hércules C-130H, por parte de la Fuerza Aérea Chilena (FACH), para las maniobras de aproximación en aeródromos antárticos como el Teniente R. Marsh en la isla Rey Jorge, y por parte de la Fuerza Aérea Argentina (FAA), en el aeródromo Marambio. Estos acercamientos y entrenamientos han posibilitado el transporte de personal y equipos de diferentes proyectos científicos colombianos y extranjeros, en el cumplimiento del objetivo principal de la agenda científica de la CCO, consistente en hacer presencia e investigaciones en el continente blanco y alcanzar para el país el estatus de miembro consultivo.

El desarrollo de operaciones aéreas por parte de Colombia en territorio antártico requiere la investigación de los factores que influyen en la seguridad aérea; por ello, la FAC formuló el proyecto de investigación “Identificación de los peligros operacionales en la Antártida para la operación de la Fuerza Aérea Colombiana”, desarrollado en el verano austral 2020-2021 en el aeródromo Teniente R. Marsh. La matriz de evaluación de riesgos basados en la probabilidad y severidad arrojó como principales resultados: funcionamiento incorrecto de los instrumentos de medición, congelamiento y contaminación del combustible; y en relación con factores humanos: desconocimiento en operaciones polares, desconocimiento de las características geográficas, existencia de problemas físicos o mentales y salidas de pista (Tabares, 2021).

Debido a la necesidad de establecer relaciones con el gobierno argentino para el desarrollo de operaciones aéreas en la Antártida se formuló la segunda fase del proyecto, durante el verano austral 2021-2022, en el aeródromo Vicecomodoro Marambio, con el objetivo principal de determinar los factores de riesgo técnico en el aeródromo a partir del levantamiento geodésico y vuelo aerofotogramétrico con dron.

En primera instancia, el *Manual de gestión de seguridad operacional* (OACI, 2018, Documento 9859) indica que la seguridad operacional procura mitigar en forma proactiva los riesgos de seguridad operacional antes de que resulten en accidentes e incidentes de aviación, teniendo un enfoque de sistema total. De este modo, todos los proveedores de servicios y sus sistemas para la gestión de la seguridad operacional se consideran como subsistemas, lo cual permite que el Estado considere las interacciones y las relaciones causa-efecto. Cuando los Estados y los proveedores de servicios consideran la implementación de la gestión de la seguridad operacional, es importante tener en cuenta los riesgos inducidos por las entidades interrelacionadas. En el contexto operacional, todos los sistemas funcionales producen algún tipo de riesgo que debe gestionarse en forma apropiada para disminuir posibles consecuencias adversas, llevando a reducirlos y controlarlos a un nivel aceptable.

En la identificación de peligros, el *Manual de gestión de seguridad operacional* indica que se deben tener en cuenta los procedimientos y las prácticas operacionales, incluyendo documentación y listas de verificación, así como su validación en condiciones de operación real. Es así que, en cada proceso de recolección de información geoespacial y diseño de procedimientos de vuelo por instrumentos, se adoptan medidas que permitan gestionar peligros de seguridad operacional.

Teniendo en cuenta la importancia de los procesos de recolección de datos como insumo para la generación de cartografía aeronáutica, se resalta el cumplimiento técnico de los requisitos de calidad sobre datos aeronáuticos establecidos en el *Manual del Sistema Geodésico Mundial 1984* (OACI, 2002, Documento 9674) para el levantamiento geodésico y vuelo con dron del aeródromo Marambio. Esta información es la base para el desarrollo de las siguientes fases:

- Actividades de campo, recolección de la información aeronáutica y de obstáculos del aeródromo Marambio, utilizando equipos de topografía convencional (sistema global de navegación por satélite, GNSS por sus siglas en inglés) y no convencional (drone) de la Dirección de Navegación Aérea de la FAC, así como el postproceso de la información geodésica y las imágenes de dron para la obtención de los reportes de aeródromo y obstáculos, modelo 3D, ortofoto y plano de aeródromo.
- A partir de la fase anterior, se realizó el análisis del aeródromo con el fin de verificar las

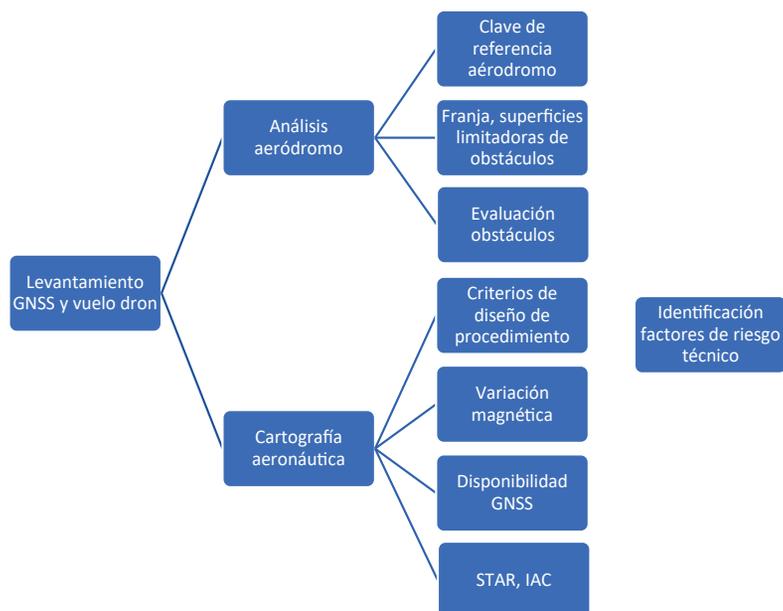
características físicas de pistas en el entorno antártico (ANAC, 2021): cálculo de la clave de referencia de aeródromo, franja de pista, temperatura media, superficies limitadoras de obstáculos, entre otras.

- Fase de diseño de la llegada normalizada por instrumentos (STAR), salida normalizada (SID) y aproximación por instrumentos (IAC), teniendo en cuenta: 1) Operaciones de aeronaves (OACI, 2014) y Manual de navegación basada en performance PBN (OACI, 2013); 2) disponibilidad de la variación magnética en los equipos FMS del Hércules C130H; y 3) geometría de la constelación de satélites del sistema de posicionamiento global (GPS).
- Finalmente, se consolidan los factores de riesgo técnico derivados de las fases anteriores, destacándose: corrupción de datos críticos y esenciales por ser transversales a todas las fases, alistamiento de la pista, y errores en los sistemas de navegación por alteraciones en la cadena de tratamiento de la base de datos de navegación.

Metodología

Se realizó una investigación aplicada (Consejo Nacional de Beneficios Tributarios en Ciencia, Tecnología e Innovación, 2022), cuyo fin es identificar los factores de riesgo técnico derivados del análisis del aeródromo y el diseño de vuelo por instrumentos, ambos desarrollados bajo aspectos cualitativos y cuantitativos. La figura 1 expone las fases de la investigación.

Figura 1. Esquema metodología



Fuente: elaboración propia.

Levantamiento GNSS y vuelo con dron

En el verano austral 2021-2022 se realizó el levantamiento topográfico del aeródromo Vicecomodoro Marambio, gracias a las coordinaciones entre el Comando Conjunto Antártico Argentino (Cocoantar), la CCO y la FAC. Inicialmente se realizó el reconocimiento en terreno, identificando la infraestructura aeronáutica del aeródromo, localizada en el área 2 de las superficies de recopilación de datos sobre el terreno – Apéndice 8 – Documento 10066 *Gestión de la información aeronáutica* (OACI, 2018a).

Asimismo, se adoptó como sistema de referencia geodésica el WGS-84 y se clasificaron los datos como puntos de aeródromo objeto de levantamiento topográfico, demandando requisitos de integridad para datos críticos, que de ser corrompidos tendrían una elevada probabilidad sobre las condiciones seguras del vuelo y aterrizaje de una aeronave, posibilitando la ocurrencia de una catástrofe, y para datos esenciales (OACI, 2002).

La visita técnica se llevó a cabo combinando GNSS y vuelo aerofotogramétrico, empleando

antenas Leica GS16 y dron Phantom 4 RTK. Los equipos se configuraron con el sistema de referencia local de la región Tierra del Fuego, Antártida e Islas del Atlántico Sur, adoptando las Posiciones Geodésicas Argentinas 2007 (POSGAR 07) como marco de referencia geodésico nacional, según lo indicado por el Instituto Geográfico Nacional en su página oficial (Instituto Geográfico Militar, 2022), y se vinculó la estación de rastreo permanente MBIO como parte de la red argentina de monitoreo satelital continuo (Ramsac).

El rastreo GNSS de la infraestructura aeronáutica y obstáculos se realizó posicionando una antena base en un punto de control conocido, mientras la otra antena Rover recorrió la zona empleando el método estático rápido (Leica Geosystems, 2022b). En total fueron 58 puntos, con rastreos entre 3 y 5 minutos para los datos críticos y esenciales. El postproceso de la información se realizó con el software Leica Infinity, incluyendo las efemérides precisas de los satélites (National Aeronautics and Space Administration, 2020), datos RINEX de MBIO (Instituto Geográfico Militar, 2022) y el archivo de antenas (National Oceanic and Atmospheric Administration, 2022a).

Durante el procesamiento se evidenciaron inconsistencias en los datos crudos de la estación base, debido a fallas del equipo, por lo que fue necesario descartar y hacer la corrección diferencial con la estación de rastreo permanente. En la tabla 1 se exponen parte de los datos procesados, con columnas CQ 3D – m, CQ 2D – m y CQ 1D – m (calidad de coordenadas 3D, 2D y altura estimada para la posición calculada) (Leica Geosystems, 2022a), destacándose valores de orden milimétrico, que indican una excelente calidad en el trabajo de campo.

La tabla 2 presenta los requisitos de calidad de los puntos críticos y esenciales del aeródromo (OACI, 2002). En la fila umbral de pista, columna precisión de los datos, se indica que en un radio de 1 m puede estar la coordenada del punto; ahora

bien, al revisar la fila número 7000 de la tabla 1, umbral 05 de Marambio, se puede comprobar que la calidad es milimétrica, es decir que supera los requerimientos exigidos; esto es soportado por las características del equipo GNSS empleado, que define para levantamientos estáticos rápidos precisiones en horizontal de 3 mm + 0.5 ppm y en vertical de 5 mm + 0.5 ppm (Leica Geosystems, 2022b), y por el punto de control horizontal MBIO de orden 0, que hace parte de la Ramsac con precisiones absolutas entre +/- 0.001 m y +/-0.010 m. El análisis anterior evidencia la importancia de realizar los trabajos con la precisión requerida o superior, con equipos de medición actualizados y en buen estado, así como el mantenimiento de la integridad de la información en todos los procesos cartográficos, fortaleciendo la seguridad operacional.

Tabla 1. Calidad puntos GNSS

Punto Id	Clase de Punto	CQ 3D [m]	CQ 2D [m]	CQ 1D [m]	Desv. estd. coordenada X [m]	Desv. estd. coordenada Y [m]	Desv. estd. altura ortom. [m]	Fecha/hora
7000	Solucionado PP	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	28/01/2022 16:02
7001	Solucionado PP	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,001	28/01/2022 16:07

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Requisitos en cuanto a la calidad de los datos aeronáuticos (latitud y longitud)

Latitud y longitud	Precisión de datos	Resolución publicación	Resolución de los mapas	Clasificación de la integridad
NAVAIDS situadas en el aeródromo	$\frac{3 \text{ m}}{\text{objeto de lev}}$	1/10 s	según el trazado	1 x 10-5 esencial
Obstáculos en el área de circuito y en el aeródromo	$\frac{3 \text{ m}}{\text{objeto de lev}}$	1/10 s	1/10 s	1 x 10-5 esencial
Umbral de pista	$\frac{1 \text{ m}}{\text{objeto de lev}}$	1/100 s	1 s	1 x 10-8 crítico

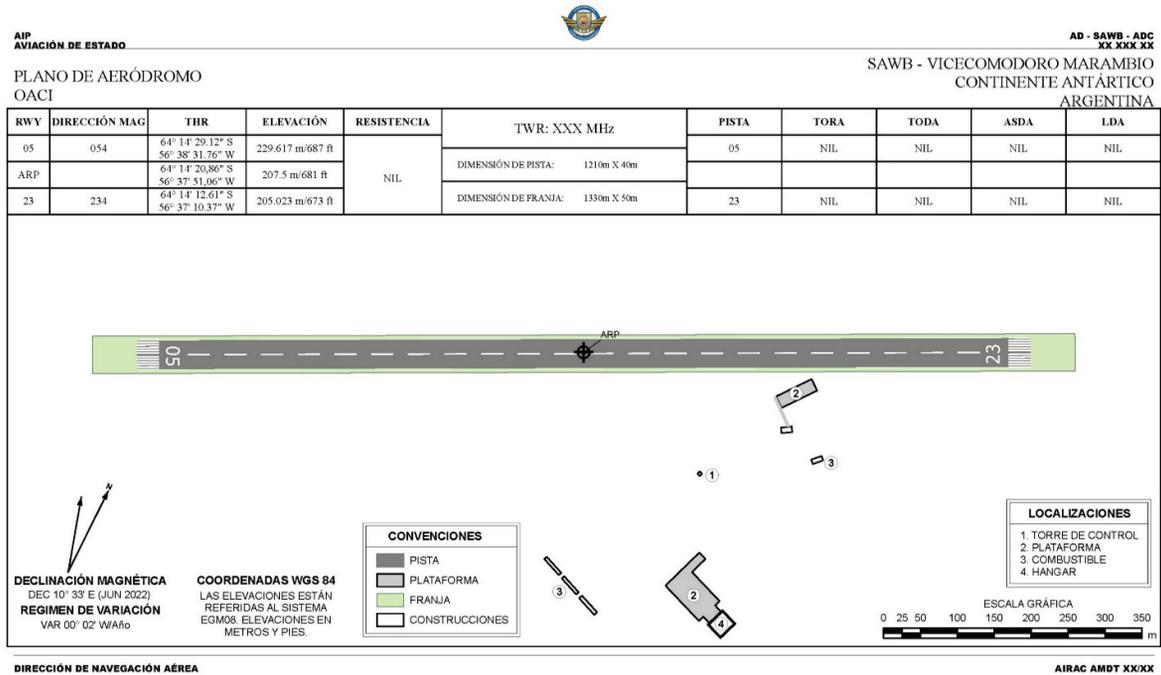
Fuente: OACI (2002).

A partir de la información recolectada, se diseñó y estandarizó el plano de aeródromo (ver mapa 1) y las cartas aeronáuticas (OACI, 2009).

Seguidamente se realizó el vuelo aerofotogramétrico, dividiendo la zona en siete áreas de

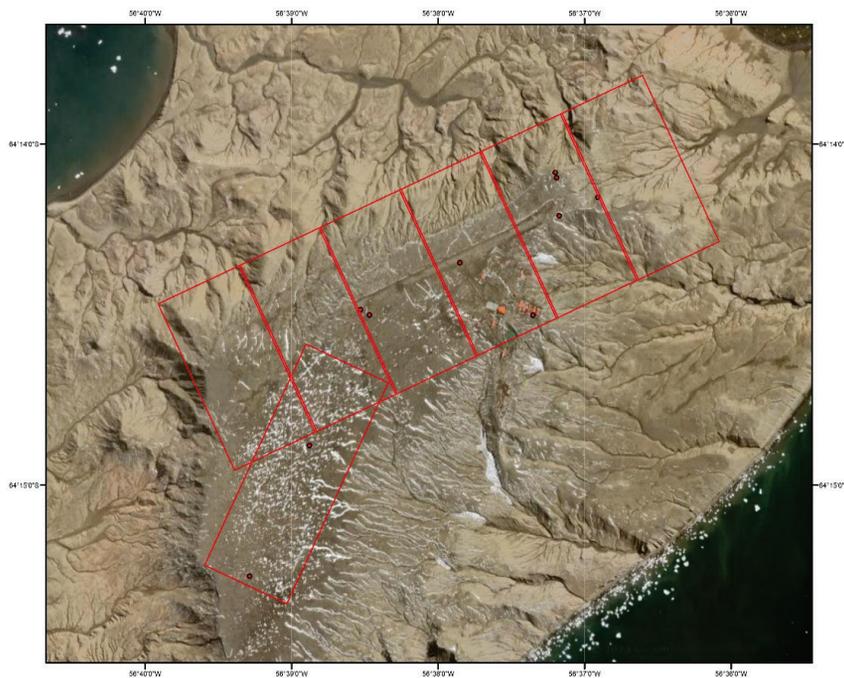
vuelo distribuidas a lo largo de la pista, cada una de 1000 por 500 metros, tal como se observa en el mapa 2. Se necesitaron aproximadamente entre 6 y 7 baterías por sector, con 19 líneas de vuelo perpendiculares a la pista.

Mapa 1. Plano de aeródromo



Fuente: elaboración propia.

Mapa 2. Distribución fajas de vuelo



Fuente: elaboración propia.

Para la mejora de la precisión en las tomas aéreas se instalaron puntos de fotocontrol sobre el terreno, referenciados con respecto a MBO, con el fin de vincularlos en la rectificación de las imágenes y productos derivados. En total se diseñaron e imprimieron 10 puntos de fotocontrol, enumerados del 0 al 9, totalmente identificables en las imágenes aéreas tomadas a 80 m sobre el terreno, con traslape entre fotos de 75 % (imagen 1).

En total se instalaron 25 puntos de fotocontrol, con rastreos de 2 minutos cada uno. En cada faja de vuelo se posicionaron 5 puntos y se tomaron

8446 imágenes aéreas, con dimensiones de 5472 x 3648 pixeles, para un tamaño del pixel en el terreno (GSD) de 0,03 m.

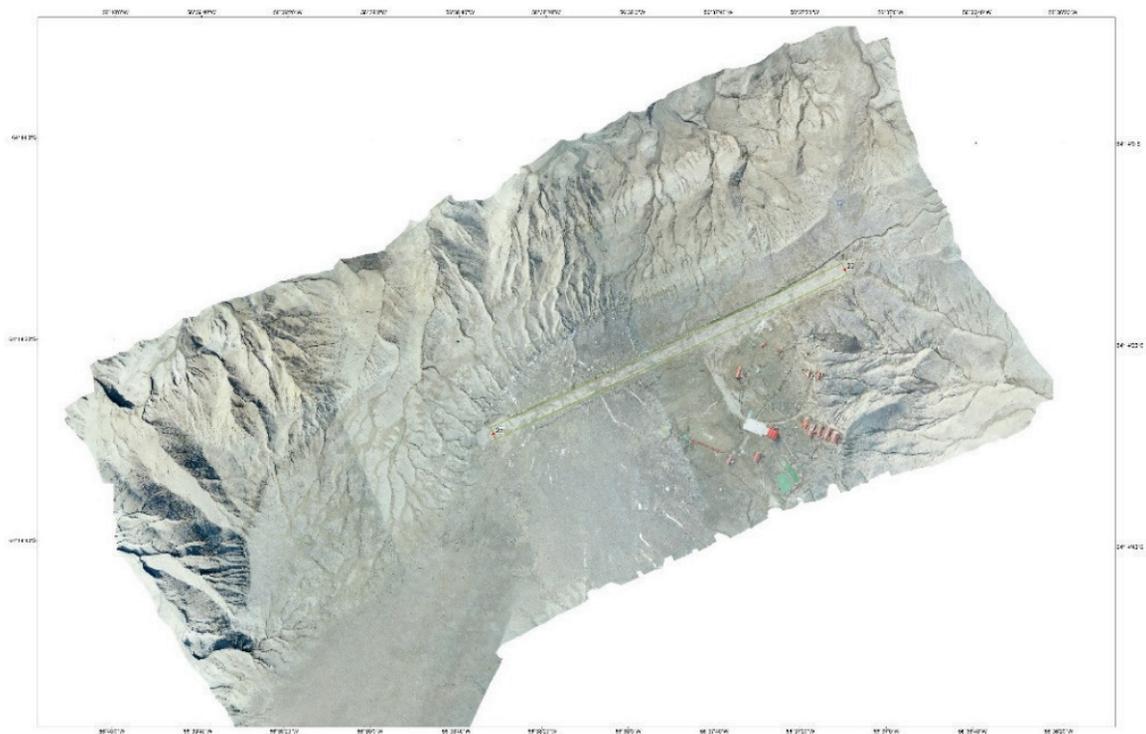
El procesamiento se realizó con el software Context Capture, vinculando los puntos de fotocontrol en la aerotriangulación (Bentley Systems, 2022) para la producción de la ortofoto (mapa 3) y el modelo digital de superficie (DSM) en metros sobre el nivel medio del mar (mapa 4). La comprobación de la calidad del modelo generado arrojó precisiones milimétricas hacia el centro del modelo, es decir en cercanías a la pista, y centimétricas hacia los bordes.

Imagen 1. Rastreo puntos fotocontrol Marambio



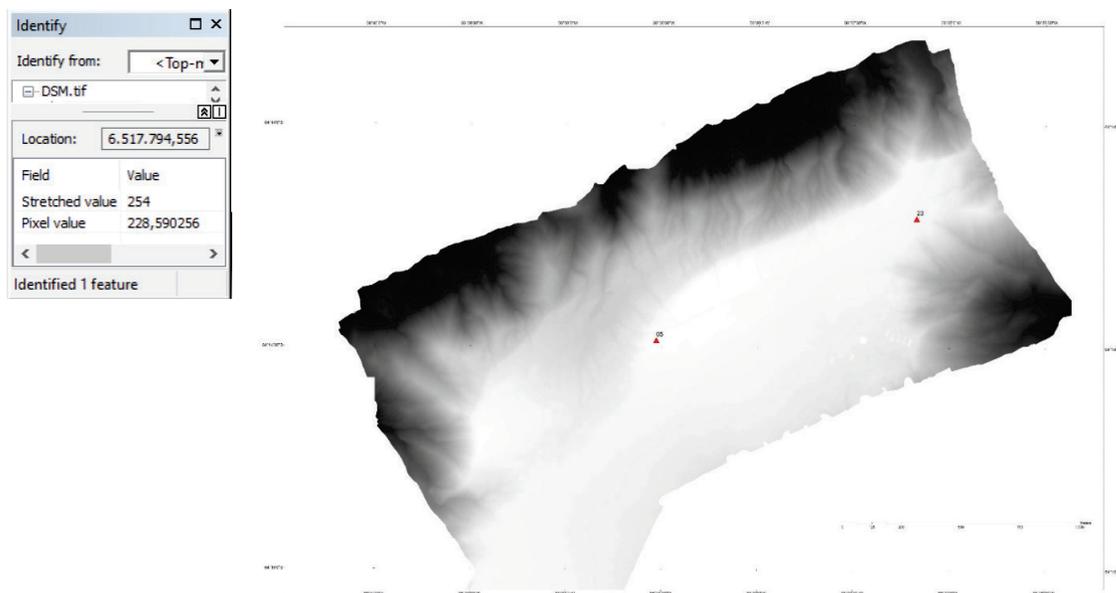
Fuente: elaboración propia.

Mapa 3. Ortofoto Marambio



Fuente: elaboración propia.

Mapa 4. Modelo digital de superficie Marambio



Fuente: elaboración propia.

Análisis del aeródromo

Para el análisis del aeródromo se consultaron diferentes documentos de referencia publicados por la OACI y la ANAC. Inicialmente, se creía que el aeródromo Marambio era del tipo de despegue y aterrizaje corto (STOL), cuyas características físicas, ayudas visuales y no visuales y la totalidad de su infraestructura han sido creadas para el servicio del transporte aéreo seguro y efectivo del público, desde y hacia zonas rurales en terreno difícil (OACI, 1991).

Sin embargo, las comparaciones realizadas entre los criterios STOL de OACI y STOL de ANAC indicaron que, respecto a evaluación de obstáculos y dimensiones de la franja, Marambio presenta

desviaciones de los requisitos normativos. De acuerdo a lo anterior, y gracias a la experiencia de la ANAC en operaciones antárticas, se adoptó la parte 154 de las Regulaciones Argentinas de Aviación Civil (2022, apéndice 8) sobre especificaciones complementarias para pistas en entorno antártico.

Caracterización física

El aeródromo Marambio está localizado en la isla Marambio, jurisdicción Tierra del fuego, Antártida e Islas del Atlántico Sur, y es adecuado para operar aeronaves grandes con tren de aterrizaje convencional (Council of Managers of National Antarctic Programs, 2022) (tabla 3).

Tabla 3. Caracterización física aeródromo Marambio

Ítem	Descripción
Nombre	Aeródromo Marambio
Operador	Dirección Nacional Antártica
Identificador ICAO	SAWB
Tipo de superficie	Tierra gravilla compactada
Umbral 05	64° 14' 29,11535" S, 56° 38' 31,76159" O
Elevación umbral 05	209.369 msnm
Umbral 23	64° 14' 12,60771" S, 56° 37' 10,36723" O
Elevación umbral 23	205.023 msnm
ARP	64° 14' 20,86" S, 56° 37' 51,06" O
Elevación ARP	207,5 msnm
Declinación magnética	10°33' E del 14-06-2022
VOR-DME	64° 14' 6,03577" S, 56° 37' 11,55143" W
Longitud	1209,696 m
Ancho	40 m
Pendiente	0,35 %

Fuente: elaboración propia.

Clave de referencia de aeródromo

La clave de referencia de aeródromo se consultó en el *Antarctic Flight Information Manual* (Council of Managers of National Antarctic Programs, 2022) y en la publicación de información aeronáutica

argentina (Administración Nacional de Aviación Civil, 2022), pero no se encontró publicada, por lo que se procedió al cálculo, sin perjuicio de la clasificación oficial.

El propósito de la clave de referencia es proporcionar un método simple para relacionar entre sí

las numerosas especificaciones concernientes a las características de los aeródromos, a fin de suministrar una serie de instalaciones aeroportuarias que convengan a los aviones destinados a operar en el propio aeródromo. Está compuesta de dos elementos: el primero es un número basado en la longitud de campo de referencia del avión y el segundo es una letra basada en la envergadura del avión y la anchura exterior entre las ruedas del tren de aterrizaje principal (OACI, 2006).

La longitud verdadera de la pista de un aeródromo deberá ser la adecuada para satisfacer los requisitos operacionales de los aviones para los que se proyecte y no deberá ser menor que la longitud más larga determinada por la aplicación a las operaciones de las correcciones correspondientes a las condiciones locales y a las características de performance de los aviones que tengan que utilizarla (Regulaciones Argentinas de Aviación Civil, 2022). Para la determinación de la longitud efectiva de la pista, se calculan y aplican las correcciones por pendiente y elevación (OACI, 2006).

- *Aeronave crítica o de referencia:* La aeronave de diseño es el Hércules C-130H, por ser el único

avión colombiano hasta el momento en desarrollar operaciones en territorio antártico. La longitud de campo de referencia no debe utilizarse para el diseño de la longitud de pista del aeródromo, ya que la longitud requerida varía según diversos factores, como la elevación del aeródromo, la temperatura de referencia y la pendiente de la pista (OACI, 2020). En la tabla 4 se relacionan las dimensiones del Hércules C-130H.

- *Temperatura de referencia de aeródromo:* Es el promedio mensual de la temperatura diaria media correspondiente al mes más caluroso del año, al que se añade un tercio de la diferencia entre dicha temperatura y el promedio mensual de la temperatura diaria máxima del mismo mes del año (OACI, 2006). Para el cálculo de esta temperatura se usaron los promedios de temperaturas diarias en un periodo de 5 años (Servicio Meteorológico Argentino, 2022).

En la tabla 5 se exponen los resultados promedio de temperaturas diarias de los meses más calurosos del 2018 al 2022.

Tabla 4. Dimensiones Hércules C-130H

Casa fabricante	Aeronave	Clave	Longitud del campo de referencia	Envergadura (m)	Altura empenaje (m)	Longitud (m)	Anchura tren de aterrizaje (m)	Base de ruedas (m)
Lockheed Martin	C-130H	4C	Calculada	40,4	11,8	34,3	4,34	12,3

Fuente: Lockheed Martin (2022).

Tabla 5. Temperatura promedio anual

Año	Mes	Temperatura de referencia
2022	Febrero	1,90 °C
2021	Diciembre	3,62 °C
2020	Noviembre	1,80 °C
2019	Enero	-0,52 °C
2018	Diciembre	0,49 °C
Temperatura referencia aeródromo		1,46 °C

Fuente: elaboración propia.

- *Temperatura ISA:* Atmósfera tipo internacional (OACI, 2014), para cuyo cálculo se tuvo en cuenta la tabla 6, interpolando la temperatura de acuerdo a la elevación del aeródromo (resultado: 13,66 °C).

Tabla 6. Temperatura ISA

Altitud (m)	Temperatura (°C)	Presión (kg/m³)
0	15,00	1,23
500	11,75	1,17

Fuente: OACI (2006).

- *Coefficiente de corrección por elevación:* La longitud básica seleccionada para la pista debería aumentarse a razón del 7 % por cada 300 m de elevación (OACI, 2006). El coeficiente para la longitud determinada en el levantamiento geodésico (1209,696 m) es de 0,95342267.
- *Coefficiente de corrección por temperatura:* La longitud de la pista determinada debería aumentarse a su vez a razón del 1 % por cada grado

centígrado en que la temperatura de referencia del aeródromo exceda a la temperatura de la atmósfera tipo, correspondiente a la elevación del aeródromo (OACI, 2006). La temperatura de referencia de aeródromo (1,46 °C) no supera la temperatura de atmósfera tipo (13,66 °C), siendo innecesaria la aplicación del coeficiente por temperatura en la determinación de la longitud básica.

- *Coefficiente de corrección por pendiente:* Cuando la longitud básica determinada por los requisitos del despegue sea de 900 m o más, dicha longitud debería a su vez aumentarse a razón de un 10 % por cada 1 % de pendiente de pista (OACI, 2006). El coeficiente para la pendiente calculada en el trabajo geodésico (0,36%) es de 0,999640865.

Corrección total por elevación y pendiente: De acuerdo a lo anterior, se identifica en la tabla 7: la longitud efectiva de pista (1152,937 m) y la envergadura del equipo C-130H (40,4 m), concluyendo que la clasificación de Marambio es 2D.

Tabla 7. Clave de referencia de aeródromo

Elemento 1 de la clave		Letra de clave	Elemento 2 de la clave	
Número de clave	Longitud de campo de referencia del avión		Envergadura	Anchura exterior entre ruedas del tren de aterrizaje principal*
2	Desde 800 m hasta 1200 m (exclusive)	D	Desde 36 m hasta 52 m (exclusive)	Desde 9 m hasta 14 m (exclusive)

Fuente: OACI (2006).

Tipo superficie aeródromo Marambio

La base Marambio ubicada en la Antártida cuenta con una pista de aterrizaje en tierra compactada que ha permitido la operación de aeronaves convencionales. La isla se encuentra en una zona de permafrost continuo, con temperaturas del suelo cercanas a -5 °C (Dirección Nacional del Antártico, 2020).

Según un artículo del Dr. Adrián Silva Busso, se ha observado la presencia de una zona saturada (acuífero) sobre el permafrost durante la temporada de verano en la isla. La relación entre estas dos condiciones, así como la presencia de cuerpos

de agua superficiales, varía según las condiciones climáticas. Aunque la isla carece de glaciares y acumulaciones permanentes de nieve durante el verano, los estudios geofísicos indican que el permafrost se encuentra aproximadamente a 80 m de profundidad en la meseta de la isla, con espesores variables que no superan los 127 m de profundidad. Además, se menciona que el aumento de la temperatura activa el acuífero, generando áreas pantanosas que se inundan fácilmente, mientras que en temperaturas inferiores a -3,5 °C, el acuífero puede congelarse y formar parte del permafrost (Busso *et al.*, 2000).

Teniendo en cuenta la dinámica del suelo y gracias a la información recopilada durante la visita de campo, se logró conocer el proceso de alistamiento de la pista previo al aterrizaje del Hércules C-130 del Cocoantar – FAA:

- Verificación visual de la pista, para evaluar la resistencia y descartar presencia de agua o partículas pequeñas.
- Seguimiento de la meteorología, para encontrar la ventana de ingreso al aeródromo bajo condiciones visuales.
- La base Marambio cuenta con maquinaria amarilla: una retroexcavadora y un rodillo compactador, usados regularmente para nivelar, transportar material, rellenar y compactar la pista.

- Adecuación de canales para la evacuación de excesos de agua producidos por el deshielo, mediante mantenimiento diario con la retroexcavadora.
- Instalación de luces de pista portátiles.

Salvamento y extinción de incendios

De acuerdo a lo reportado en la AIP Argentina, la categoría del aeródromo es 5 para extinción de incendios, con disponibilidad de una motobomba (Administración Nacional de Aviación Civil, 2022).

Ancho de pista

El ancho de toda pista no debería ser inferior a 23 m, especificados en la tabla 8 (ANAC, 2021). Marambio cumple el ancho de pista mínimo al medir 40 m.

Tabla 8. Ancho exterior entre ruedas del tren de aterrizaje principal

Núm. de clave	Hasta 4.5 m (exclusive)	Desde 4.5 m hasta 6 m (exclusive)	Desde 6 m hasta 9 m (exclusive)	Desde 9 m hasta 15 m (exclusive)
2	23 m	23 m	30 m	-

Fuente: ANAC (2021).

Pendiente de la pista

La pendiente longitudinal, obtenida al dividir la diferencia entre la elevación máxima y la mínima a lo largo del eje de la pista sobre la longitud de esta, no deberá exceder el 2 % cuando el número de clave sea 1 o 2 (ANAC, 2021). Marambio cumple con esta condición, al tener una pendiente de 0,35 %; sin embargo, de acuerdo a lo evidenciado, la pista no tiene una pendiente uniforme, presentándose variaciones que no superan el 2 %.

Pendientes transversales

Para facilitar la rápida evacuación del agua de la superficie de la pista, en la medida de lo posible, esta debería ser convexa, excepto en los casos en que exista una pendiente transversal única descendiente en la dirección del viento que acompaña a la lluvia con mayor frecuencia, de modo que asegure el rápido drenaje de aquella. La pendiente transversal ideal debería ser de 1.5 %, cuando la letra de clave sea C, D, E o F (ANAC, 2021).

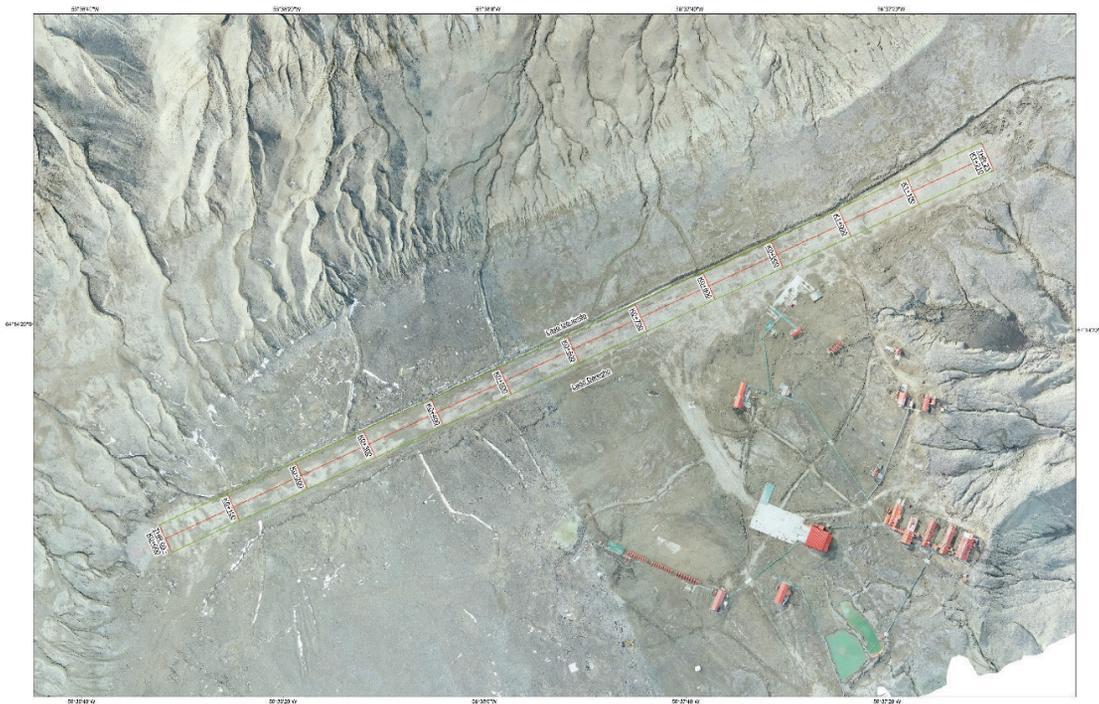
Se crearon 13 secciones transversales al eje de la pista, iniciando en el umbral 05, y se extrajeron las alturas elipsoidales del extremo y centro de cada sección a partir del DSM (tabla 9). Asimismo, se calcularon las pendientes: 1) transversal izquierda, la cual arroja datos positivos, indicando que el desagüe de la pista está conducido hacia el lado izquierdo del eje, desde las secciones THR 05 - K0+000 hasta la K0+400 y de la K0+700 hasta K0+900, y valores negativos que sugieren la presencia de baches o diferencias de nivel en la pista, ocasionando acumulación de agua hacia el eje en las secciones restantes; y (2) transversal derecha, con valores positivos que muestran la caída de agua hacia el lado derecho, aunque el sistema de canales de desagüe de Marambio se encuentra al lado izquierdo, situación que explica la acumulación de agua en ese sector, requiriendo labores de limpieza del agua y trabajos de compactación previos al aterrizaje de una aeronave (mapa 5).

Tabla 9. Nivelación secciones transversales pista Marambio

Ubicación	Elipsoidal izquierdo	Elipsoidal centro	Elipsoidal derecho	Distancia (m)	Pendiente transversal izq. (%)	Pendiente transversal der. (%)
THR 05 - K0+000	229,26	229,66	229,63	20	2,01	0,16
K0+100	228,59	229,39	229,33	20	4,03	0,28
K0+200	228,88	229,61	229,52	20	3,66	0,49
K0+300	229,56	229,58	229,39	20	0,12	0,95
K0+400	228,54	228,80	228,64	20	1,30	0,79
K0+500	228,52	228,38	228,31	20	-0,68	0,35
K0+600	227,86	227,79	227,57	20	-0,35	1,09
K0+700	227,20	227,25	227,04	20	0,27	1,09
K0+800	226,68	226,84	226,45	20	0,84	1,95
K0+900	226,22	226,53	226,29	20	1,54	1,20
K1+000	226,36	226,25	226,14	20	-0,56	0,51
K1+100	226,07	225,87	225,78	20	-0,99	0,41
THR 23 K1+210	225,62	225,31	225,30	20	-1,55	0,04

Fuente: elaboración propia.

Mapa 5. Secciones transversales



Fuente: elaboración propia.

Franja de pista

Las franjas responden a la necesidad de disponer de condiciones operacionales, si bien se evalúan condiciones geométricas que difieren de las ideales. Algunas de las condiciones de desvío pueden estar constituidas por la presencia de drenajes necesarios para la evacuación del agua de deshielo de la pista, por proximidad de equipamiento indispensable para la navegación aérea, o por cambios en la pendiente del terreno cuya adecuación no resulte materialmente posible (ANAC, 2021).

- Toda franja se extenderá antes del umbral y más allá del extremo de la pista por lo menos 60 m cuando el número de clave sea 2, 3 o 4

- El ancho de la franja será de 25 m cuando el número de clave sea 1 o 2.

De acuerdo a lo anterior, se graficó la franja para la clave 2 (mapa 6). En su mayoría, la franja cumple; sin embargo, es vulnerada hacia el norte debido a los desagües y más allá del umbral 05, en el borde, cambia la topografía del terreno generando desniveles pronunciados.

- *Objetos en la franja de pista:* De acuerdo lo verificado en el levantamiento geodésico, no existen objetos en la franja.

Mapa 6. Franja de pista



Fuente: elaboración propia.

Calles de rodaje y plataforma

La provisión de calles de rodaje y plataformas puede presentar dificultades de disponibilidad, debido a la falta de espacio suficiente para el trazado de las mismas, respetando las distancias, pendientes

y configuración. En la mayoría de los casos, el área de movimiento está constituida solamente por la pista, para atender la totalidad de las operaciones, o áreas conexas inmediatamente contiguas a esta para el movimiento de carga, combustible y despacho del avión (ANAC, 2021).

Respecto a las calles de rodaje, la autoridad aeronáutica publicó un mapa donde grafica una calle de rodaje que va desde el hangar hasta la pista; sin embargo, las condiciones de resistencia de la superficie no permiten su uso, por lo cual las aeronaves realizan el parqueo sobre la pista (imagen 2).

Las plataformas adecuadas en el aeródromo son dos, con dimensiones de 65 x 38 m y 17 x 53 m,

formadas por unos *pallets* resistentes de aluminio. La plataforma de menores dimensiones, ubicada frente a la terminal de pasajeros, no se usa para el parqueo de aeronaves. En el caso de la plataforma de mayores dimensiones, ubicada fuera del hangar, es para el rodaje y parqueo de los helicópteros Bell 212 y Bell 412.

Imagen 2. Plataformas Marambio



Fuente: elaboración propia.

Superficies limitadoras de obstáculos (SLO)

Se deben ajustar las dimensiones de las SLO que se especifican en la tabla 10 (ANAC, 2021).

Teniendo en cuenta que el aeródromo Marambio opera bajo condiciones visuales y su clave de referencia es 2D, se dibujaron las SLO. Como se observa en el mapa 7, la presencia de obstáculos artificiales (antenas de comunicaciones y VOR) se

encuentran principalmente en las superficies horizontal y de transición.

Marambio presenta ventajas por estar adecuado en la parte más alta de la isla, permitiéndole no tener vulneraciones de terreno a las SLO. En la tabla 11 se presenta la evaluación de los obstáculos, resaltando que los montes Cockburn y Haddington están por fuera de las superficies.

Tabla 10. Superficies de despeje de obstáculos para pistas de aeródromos en entorno antártico

Superficies y dimensiones		Clasificación	
		Aproximación visual y por instrumentos de no precisión	
		Clave 1 y 2	
De aproximación			
Longitud del borde interior		50	
Distancia desde el umbral		30	
Divergencia (a cada lado)		10 %	
Primera sección			
Longitud		3000	
Pendiente		10 %	
Segunda sección			
Longitud		-	
Pendiente		-	
De transición			
Pendiente		40 %	
Superficie de ascenso en el despegue			
Longitud del borde interior		50	
Distancia desde el umbral		30	
Divergencia (a cada lado)		10 %	
Pendiente		10 %	
Longitud		2000	
Horizontal interna			
Altura		75	
Radio		1600	

Fuente: ANAC (2021).

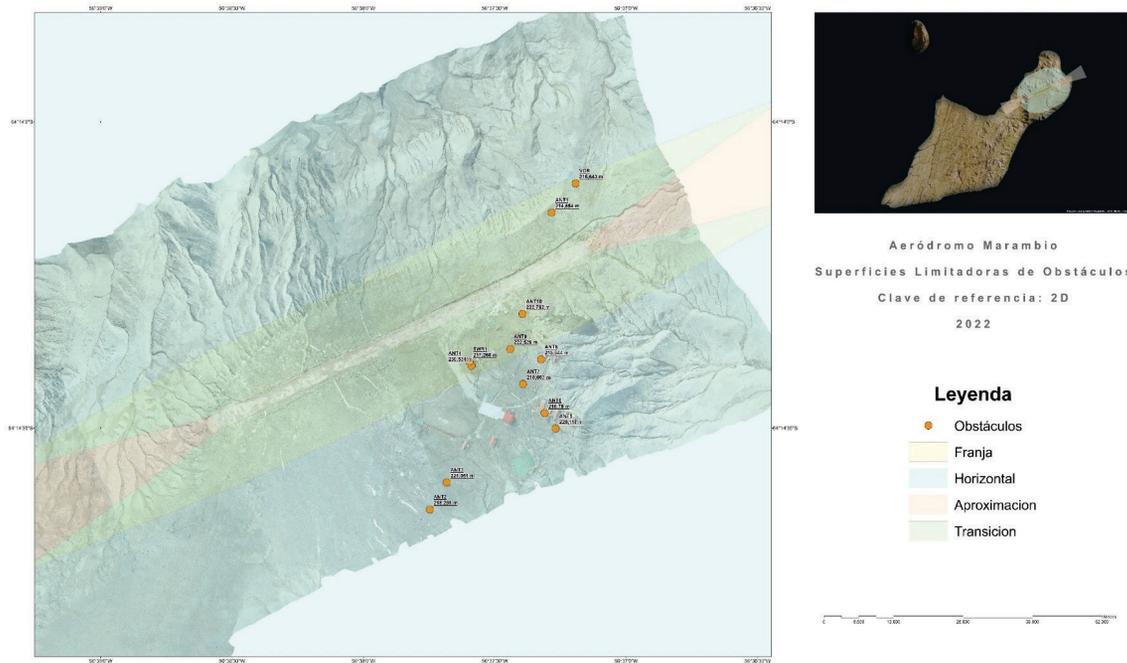
Tabla 11. Evaluación obstáculos

N	Latitud	Longitud	DESC_	Cota super	Superficie	Alt máx.	Dif. altura
1	64° 14' 08,89" S	56° 37' 17,00" W	Antena 1	214,854	Transición	251,794	36,94
2	64° 14' 37,98" S	56° 37' 44,81" W	Antena 2	218,291	Horizontal	270,291	52,00
3	64° 14' 35,34" S	56° 37' 40,96" W	Antena 3	221,051	Horizontal	272,051	51,00
4	64° 14' 23,90" S	56° 37' 35,34" W	Antena 4	230,534	Transición	264,927	34,39
5	64° 14' 30,06" S	56° 37' 16,11" W	Antena 5	220,117	Horizontal	269,117	49,00
6	64° 14' 25,69" S	56° 37' 23,53" W	Antena 7	218,667	Horizontal	275,667	57,00
7	64° 14' 23,27" S	56° 37' 19,43" W	Antena 8	215,844	Horizontal	276,844	61,00
8	64° 14' 22,26" S	56° 37' 26,47" W	Antena 9	222,529	Transición	266,693	44,16
9	64° 14' 18,82" S	56° 37' 23,67" W	Antena 10	222,762	Transición	234,559	11,80

10	64° 14' 23,50" S	56° 37' 35,77" W	TWR1	217,268	Transición	259,442	42,17
11	64° 14' 06,03" S	56° 37' 11,55" W	VOR	215,643	Transición	272,706	57,06
12	64° 11' 57,86" S	56° 50' 50,06" W	Monte Cockburn	451,000	Fuera SLO	0,000	0,00
13	64° 12' 50,02" S	57° 37' 16,60" W	Monte Haddington	1,650,000	Fuera SLO	0,000	0,00
14	64° 14' 28,53" S	56° 37' 18,59" W	Antena 6	216,790	Horizontal	273,790	57,00

Fuente: elaboración propia.

Mapa 7. Superficies limitadoras de obstáculos en Marambio



Fuente: elaboración propia.

Ayudas visuales

- *Letreros de distancia remanente:* Se emplazarán letreros de distancia remanente en las pistas en las que resulte necesario proveer información de la longitud de pista restante durante las operaciones de aterrizaje y despegue. Los letreros de distancia remanente se utilizan para proveer a los pilotos de información de distancia durante las operaciones de despegue y aterrizaje, en aquellas pistas en las que dicha información resulta necesaria o adecuada en atención a las características del emplazamiento, dimensiones, tipo

de aeronaves y el entorno geográfico de la pista (ANAC, 2021).

El aeródromo Marambio tiene instalados letreros de distancia remanente al lado izquierdo de la pista 05, distanciados a 300 m, de colores reflectivos rojo y blanco y con números enteros que le ayudan al piloto a conocer el recorrido de despegue y aterrizaje en la pista.

- *Señal designadora de pistas no pavimentadas:* En Marambio están instaladas las marcas de umbral y ancho de pista en color rojo (imagen 3), que ayudan a la identificación del inicio y el final de la pista.

Imagen 3. Señales designadoras de umbrales



Fuente: elaboración propia.

Certificación del aeródromo

La certificación del aeródromo se realiza anualmente por los cartógrafos de la FAA, quienes realizan el levantamiento topográfico para verificar que las dimensiones, pendiente y franja cumplen lo establecido para para pistas y diseño de aeródromos en entorno Antártico en la parte 154 de las Regulaciones Argentinas de Aviación Civil (2022, apéndice 8).

Diagnóstico

A partir del análisis del aeródromo, se determinó que la clave de referencia es 2D, su temperatura de referencia es 1.46 °C, tiene capacidad para recibir aeronaves que sean configuradas para aterrizar en una pista disponible de 40 m de ancho por 1209 m de longitud, tal como lo ha venido desarrollando la FAA con el Hércules C-130:

- El ancho mínimo de pista establecido es de 23 m por la ANAC y de 30 m por OACI, siendo el ancho actual de 40 m.
- La franja hacia el costado norte está afectada por desagües, que representan un riesgo en caso de una salida de pista, pero está libre de obstáculos y se realizan trabajos permanentes con el rodillo compactador. El personal encargado del mantenimiento del aeródromo no tiene un equipo de medición para evaluar la resistencia del suelo y realiza apreciaciones de acuerdo a su experiencia.
- No hay calles de rodaje y las plataformas existentes no se usan para el parqueo de aeronaves,

condiciones que permiten el aterrizaje y parqueo de una aeronave a la vez sobre la pista.

- Existen ayudas visuales adecuadas para identificar el inicio y final de pista, así como la distancia del recorrido de aterrizaje y despegue, fabricadas en materiales visibles y resistentes a las condiciones meteorológicas cambiantes de la meseta.
- Existe una radiayuda para la navegación (VORDME MBI / NDB MBI), pero no cuenta con la calibración y certificación periódica que permita su utilización en los procedimientos de aproximación publicados en la AIP Argentina (Administración Nacional de Aviación Civil, 2022).
- Ninguno obstáculo vulnera las SLO diseñadas para aeródromos en entorno antártico; sin embargo, teniendo en cuenta que las condiciones meteorológicas presentan cambios súbitos en la reducción de la visibilidad, las antenas que se encuentran próximas a la pista están señalizadas e iluminadas normativamente, reduciendo los peligros para las aeronaves.
- Las pendientes longitudinal y transversal no superan el 2 %, pero los valores arrojados por la nivelación indican presencia de baches y posible acumulación de agua en varios sectores de la pista.

Cartografía aeronáutica

Es la representación de una porción terrestre, su relieve y construcciones, diseñada especialmente para satisfacer los requisitos de la navegación

aérea (OACI, 2009). Los procedimientos de vuelo por instrumentos son un componente esencial de las operaciones aéreas, por tal razón, al considerarse como un elemento crítico dentro de la gestión de espacios aéreos, se deben garantizar niveles de precisión e integridad durante todo el proceso de desarrollo, hasta su codificación para uso en una base de datos de navegación aérea.

Los criterios generales para el diseño de una carta de aproximación por instrumentos incluyen: longitud mínima de un tramo, protección de virajes y evaluación de obstáculos, construcción de procedimientos RNAV, altitud de llegada terminal (TAA), validación del procedimiento y codificación de la base datos de navegación (OACI, 2014).

La navegación basada en la performance (PBN) especifica que los requisitos de los sistemas RNAV y RNP de las aeronaves se definen en función de la precisión, integridad, continuidad y funcionalidad que son necesarias para las operaciones propuestas en el contexto de un concepto de espacio aéreo particular (OACI, 2013). Existen dos tipos de especificaciones de navegación: RNAV, que no incluye requisitos de vigilancia y alertas de la performance a bordo, y RNP, que sí los incluye (OACI, 2014).

Para el diseño de los procedimientos, se tuvo en cuenta que la Antártida inicia aproximadamente en el paralelo 60 ° S y que debido a la geomorfología de la tierra surte un achatamiento hacia el polo, además de ser el epicentro de confluencia de variaciones magnéticas que se van juntando en latitudes

bajas. Asimismo, las distancias de separación entre meridianos se van reduciendo en cercanía al polo. Por lo anterior, se consultaron diferentes fuentes de información para verificar la pertinencia de diseñar procedimientos RNP en Marambio.

GNSS

Al pensar en un procedimiento de aproximación RNP para la Antártida, surge la primera inquietud respecto a si los equipos a bordo del Hércules C-130 cuentan con la suficiente disponibilidad de satélites para triangular la posición de la aeronave. El Hércules colombiano tiene instaladas dos antenas GPS WAAS mono frecuencia L1, configuradas para detectar la constelación GPS, además de tecnología Receiver Autonomous Integrity Monitoring (RAIM), que permite detectar datos erróneos (Avionics Services, 2014). La determinación de la posición de la aeronave requiere mínimo de cuatro o cinco satélites, como cualquier otro GNSS.

Se verificó la calidad de la señal GPS con el GNSS GS16 Leica doble frecuencia llevado a Marambio. Este análisis no es determinante para definir si la antena a bordo cumple o no con las características mínimas operacionales en ese entorno. Se analizaron los umbrales, por ser los puntos más críticos en la aproximación, y un punto aleatorio. Los umbrales se rastrearon diez minutos seguidos y el otro punto tres minutos. En la tabla 12 se muestra la disponibilidad de satélites en cada posición:

Tabla 12. Disponibilidad de satélites en Marambio

Ítem	Fecha	Hora	Mínimo		Máximo	
			GPS	GLONASS	GPS	GLONASS
THR 05	28/01/2022	15:52 – 16:02	10	5	11	6
THR 23	28/01/2022	17:15 – 17:25	7	4	7	5
Antena	18/02/2022	10:16 – 10:19	10	7	10	7

Fuente: elaboración propia.

La tabla 12 muestra cómo en los puntos analizados se detectaron mínimo 07 satélites GPS y 04 GLONASS. Ahora bien, para evaluar la calidad de la disposición geométrica de los satélites detectados

se verificó el GDOP (*geometric dilution of precision*). Un buen GDOP no debería ser mayor a 5 (IGAC, 2022) y en la tabla 13 se presentan estos valores para las tres posiciones evaluadas anteriormente.

Tabla 13. Geometric dilution of precisión

Ítem	GDOP
THR 05	2,89
THR 23	3,09
Antena	1,93

Fuente: elaboración propia.

Considerando los resultados, se esperaría que las antenas a bordo puedan, al igual que el equipo empleado en Marambio, detectar 07 o más satélites GPS con señales que, de acuerdo a la geometría de los satélites en el momento del vuelo, no se degraden en la navegación de área; sin embargo, valdría la pena hacer estudios específicos, que permitan evaluar la calidad de las señales a diferentes altitudes y en diferentes tramos de la ruta de aproximación.

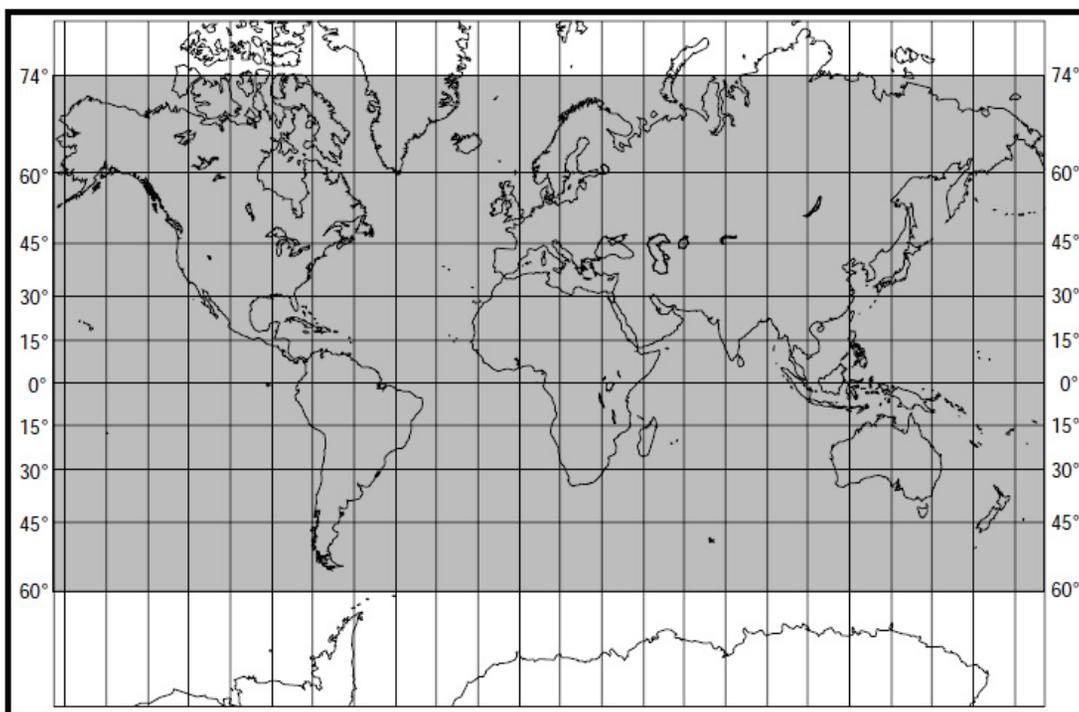
Variación magnética

Es la diferencia angular entre el norte verdadero y el norte magnético. El cálculo de la declinación

magnética se determina a partir del más reciente modelo magnético mundial (National Oceanic and Atmospheric Administration, 2022b).

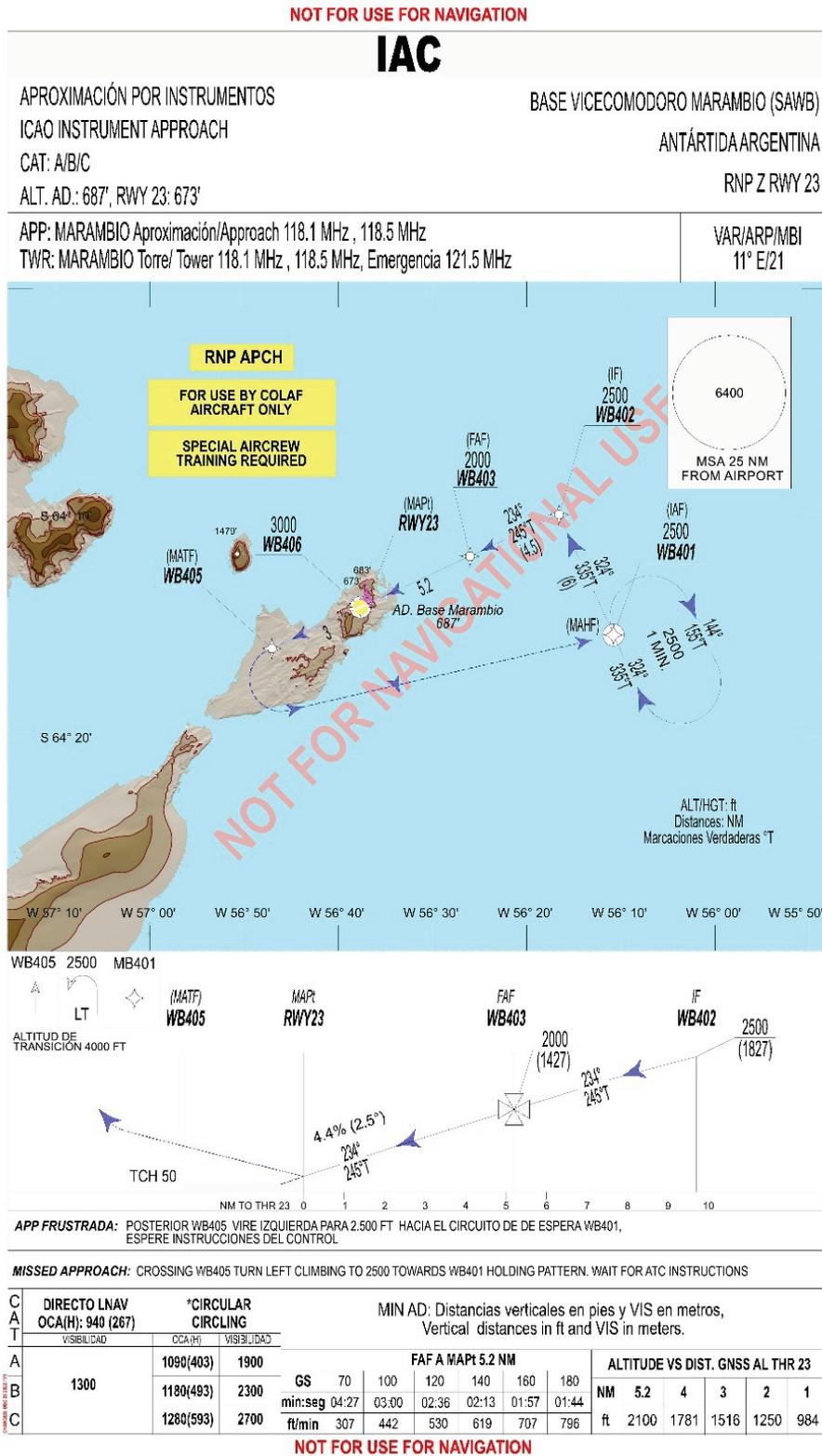
Surge una segunda inquietud respecto del funcionamiento de los equipos a bordo para la navegación aérea empleando rumbos magnéticos en latitudes bajas. A partir de la latitud 60 ° S, el sistemas de gestión de vuelo (FMS) debería cambiar manualmente a rumbo verdadero (Avionics Services, 2014). En el mapa 8 se muestra la cobertura de variación magnética del FMS.

Mapa 8. Disponibilidad mundial variación magnética para FMS



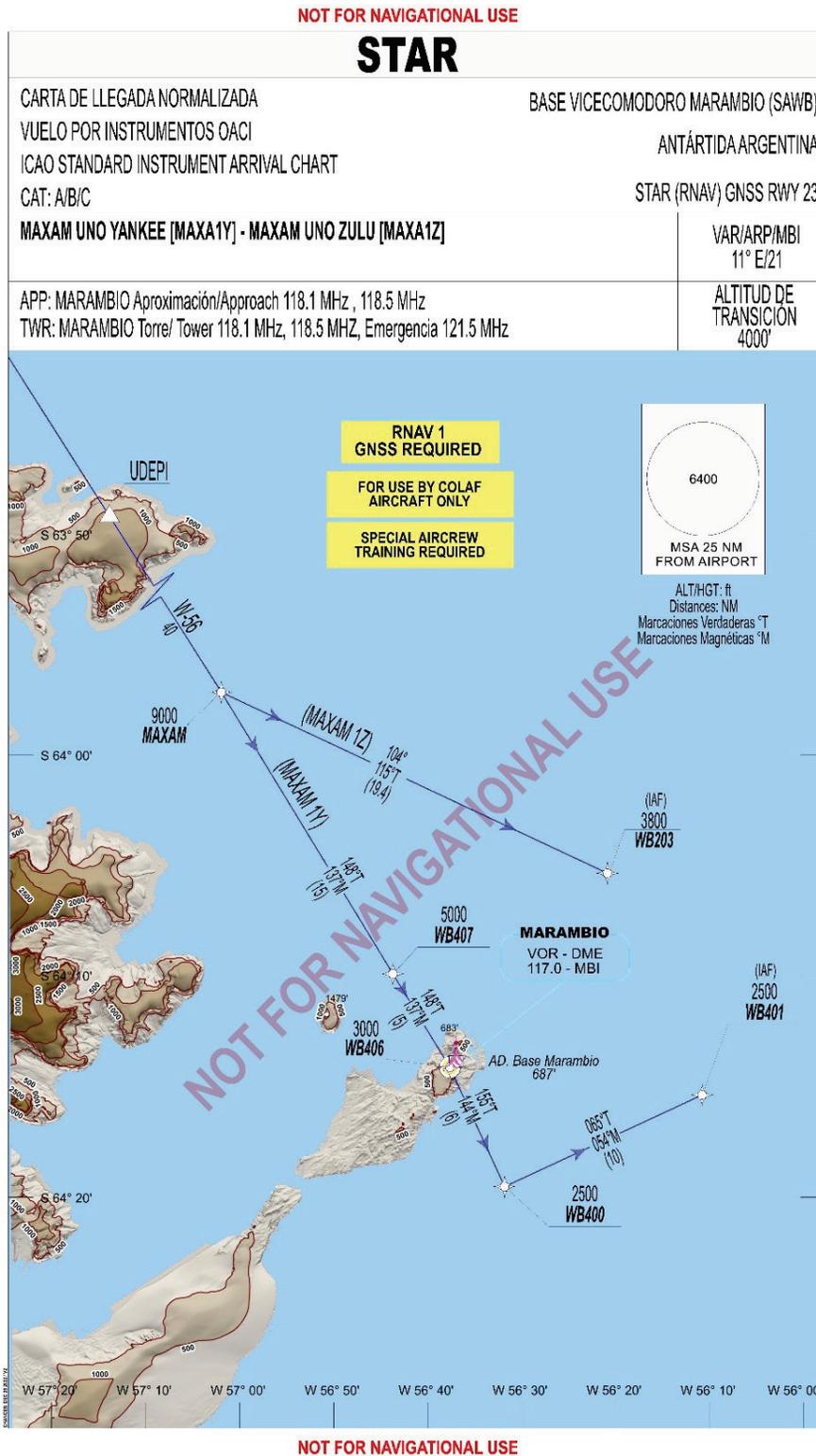
Fuente: AlliedSignal Aerospace (2020).

Mapa 10. Aproximación por instrumentos



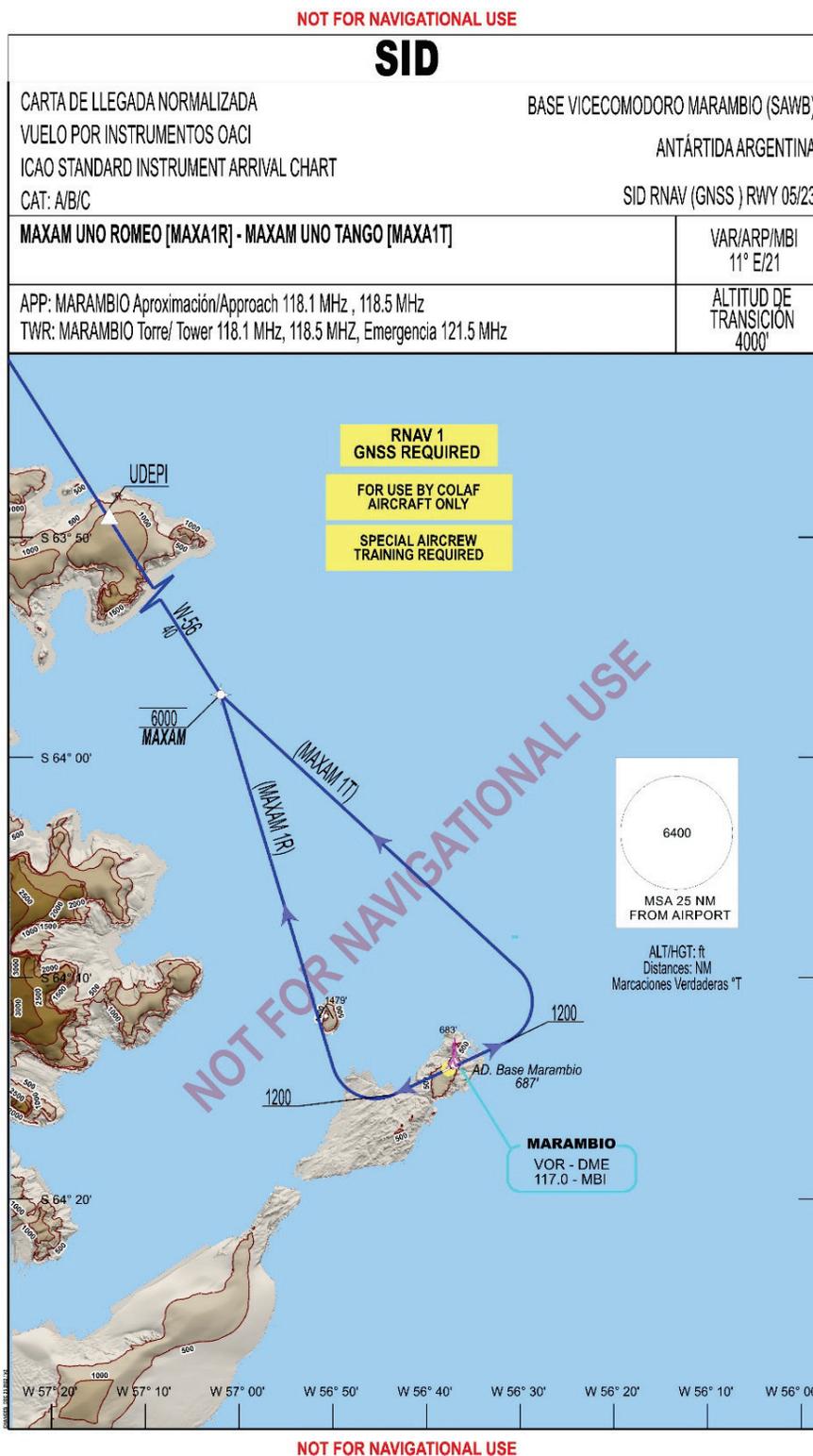
Fuente: elaboración propia.

Mapa 11. Carta llegada normalizada por instrumentos



Fuente: elaboración propia.

Mapa 12. Carta de llegada normalizada



Fuente: elaboración propia.

Resultados

A partir de los resultados de las fases de la investigación, se identificaron los factores de riesgo técnico asociados, que al no ser gestionados pueden representar un grave riesgo para continuar el vuelo y aterrizaje seguro de una aeronave.

La tabla 14 presenta los principales factores de riesgo técnico detectados:

- La información para el análisis de aeródromo y la generación de la cartografía aeronáutica provienen principalmente del levantamiento geodésico y el vuelo con dron, tal como se observa en la tabla 14, indicando que un dato crítico y/o esencial corrupto significa un riesgo para los productos derivados y por ende para la seguridad en vuelo. A fin de mitigar el riesgo es imperativo que la autoridad aeronáutica entrene al personal técnico en levantamientos geodésicos de aeródromo, acorde a los requisitos de integridad exigidos. Asimismo, es requerido usar equipos de medición calibrados, actualizados y robustos para soportar las condiciones adversas del entorno antártico.
- Los resultados del análisis indican que el aeródromo Marambio presenta condiciones favorables y algunos factores de riesgo en su infraestructura. Favorables: 1) las ayudas visuales instaladas en la pista, esenciales y de gran ayuda para los pilotos al aproximar o despegar, 2) que es un aeródromo adecuado en la parte más alta de la isla y por ende no tiene vulneración del terreno en la evaluación de las SLO, y 3) que el ancho de la pista cumple los criterios de OACI y ANAC.

Entre las condiciones desfavorables: 1) la meteorología afecta la visibilidad del aeródromo y la resistencia del suelo, ya que estudios geofísicos han demostrado la presencia de acuíferos sobre el permafrost, por lo que al presentarse temperaturas superiores se produce descongelamiento y por ende áreas pantanosas que impiden el aterrizaje, 2) la verificación visual de la resistencia del suelo para el aterrizaje es una práctica que debe ir acompañada de un ensayo de resistencia del suelo, usando un penetrómetro dinámico ligero (DCP) y teniendo en cuenta que una mala apreciación

puede generar un accidente grave, 3) al verificar la franja con la ortofoto se observa que sobrepasa los desagües en aproximadamente 6 m, generando un factor de riesgo en caso de una salida de pista, 4) las pendientes y baches presentes en la pista hacen que personal de la base use maquinaria amarilla para compactar el suelo e incorporar material faltante para su mantenimiento, de forma visual, siendo una práctica poco confiable para la nivelación y adecuado drenaje de la pista. Por lo anterior, es indispensable incluir en los trabajos de nivelación un nivel de precisión que realmente indique qué tanto se debe rellenar y compactar la pista, y 5) la no calibración del VOR, lo cual implica un riesgo al transmitir señales potencialmente inseguras o erróneas que no permiten una guía de navegación confiable, por lo que la única forma de gestionarlo es mediante la calibración y certificación de la radioayuda.

- La cartografía aeronáutica puede presentar factores de riesgo que al no mitigarlos representan un grave peligro en la seguridad en vuelo, tales como: 1) desviación de los criterios de diseño, factor que es de gran importancia porque requiere el conocimiento del escenario operacional, la aeronave de diseño y otros elementos esenciales para su mitigación, por lo cual la autoridad aeronáutica debe capacitar al personal en el diseño de procedimientos de vuelo y garantizar que cuenten con experiencia en tránsito aéreo, y 2) errores en los sistemas de navegación, por alteraciones en la cadena de tratamiento de la base de datos de navegación. En la actualidad, los FMS han revolucionado la forma en que se opera una aeronave, ofreciendo funcionalidades que permiten administrar y gestionar todos los sistemas del avión y su comportamiento; sin embargo, algunos datos aún requieren de la interacción del piloto, generando la posibilidad de ingresar errores que pueden tener implicaciones en la seguridad y consecuencias catastróficas. Por su parte, los operadores pueden establecer medidas de mitigación para prevenir el error en la transcripción de datos de ruta, puntos de recorrido, coordenadas, entre otros, como resultado de estudios de seguridad operacional; no obstante, es recomendable que las rutas o los procedimientos de uso exclusivo del

operador tengan el mismo tratamiento de codificación que las bases de datos de navegación para

los ciclos AIRAC (Aeronautical Information Regulation and Control).

Tabla 14. Evaluación de riesgos técnicos

Fase	Factor de riesgo técnico	Afectación	Gestión
Levantamiento GNSS y vuelo con dron	Corrupción datos críticos y esenciales.	Insumo con errores inaceptables para la generación de cartografía aeronáutica que generan un riesgo grave en vuelo.	Validación de los requisitos de calidad.
			Uso de equipos de medición calibrados y en buenas condiciones.
			Implementación de bases de datos con protocolos de seguridad y roles definidos para el mantenimiento de la integridad de los datos originales.
	Meteorología	Alteración del estado del permafrost que impide soportar el peso de aeronaves.	Medición de la capacidad de resistencia del suelo previo al aterrizaje mediante ensayo DCP.
		Baja o nula visibilidad del aeródromo.	Verificación constante de la meteorología.
	Inspecciones visuales de las condiciones del aeródromo.	Información errónea sobre el estado real de la pista en cuanto a la condición del permafrost y la nivelación.	Medición de la capacidad de resistencia del suelo previo al aterrizaje mediante ensayo DCP. Trabajos de nivelación de la pista con nivel de precisión en conjunto con retroexcavadora y rollo compactador.
Análisis del aeródromo	Franja pista - Canales de desagüe pista "Chorrillos"	Daño de la aeronave en caso de una salida de pista.	Reubicación de los desagües sin vulnerar la franja.
		Inundación de áreas con baches en la pista debido a acumulación y derretimiento de nieve.	
	Presencia de partículas pequeñas, baches y desniveles en la pista.	Accidente y daño de la aeronave.	Trabajos de nivelación de la pista con nivel de precisión en conjunto con retroexcavadora y rollo compactador. Verificación visual de la pista y limpieza de ser necesario.
	Pendientes longitudinal y transversal.	Acumulación de agua por sectores de la pista.	Nivelación de la pista manteniendo la pendiente uniforme hacia los desagües.
	No calibración VOR.	Transmisión de señales potencialmente inseguras o erróneas que no permiten una guía de navegación confiable.	Calibración y certificación VOR.

Fase	Factor de riesgo técnico	Afectación	Gestión
Cartografía aeronáutica	Aplicación incorrecta y/o desviación de los criterios de diseño.	Cartas que no satisfacen requerimientos operativos de seguridad, eficiencia y gestión del espacio aéreo.	Evaluación de riesgos de seguridad operacional antes de la implantación de un procedimiento de vuelo. Validación en tierra de los procedimientos de vuelo.
	Errores en los sistemas de navegación por alteraciones en la cadena de tratamiento de la base de datos de navegación.	Incumplimiento de los requisitos vigentes del sistema. Control de calidad para el procesamiento de datos aeronáuticos.	Codificación de los procedimientos de vuelo de acuerdo a lo previsto en el documento DO 200A de RTCA/ED 76 de Eurocae, Standards for Processing Aeronautical Data.

Fuente: elaboración propia.

Discusión

Se verificó la existencia de investigaciones previas sobre los riesgos técnicos asociados a captura de datos, análisis del aeródromo y generación de cartografía aeronáutica, pero no se encontró información, si bien existe documentación relacionada con algunos de los criterios aplicados para pistas en entorno antártico por parte de las Fuerzas Militares de Estados Unidos, por lo que se discutirán los procedimientos de mantenimiento y operación de aeródromos antárticos, así como la importancia del personal técnico especializado y la maquinaria empleada.

El primer aspecto evaluado es el levantamiento GNSS y el vuelo con dron, resaltando la importancia en la calidad de los datos, que, de presentar vulneración en su integridad, representan un riesgo en la seguridad operacional, así como lo sugiere la OACI. Este factor no es ajeno para otros países, como Estados Unidos, que tiene sus propios criterios de operación, indicando que todas las mediciones serán realizadas por personal con conocimientos técnicos dentro de su programa antártico. Las mediciones se determinan usando métodos y herramientas de medición disponibles (por ejemplo, cinta, rueda de medición, tránsito, láser) para verificar dimensiones y grados de la pista, berma, plataforma, entre otros (Department of Defense, 2015).

El segundo factor técnico evaluado es el análisis del aeródromo, que conllevó diferentes hallazgos positivos y por mejorar en Marambio, cada a

uno de los cuales se discutirá y se comparará con los criterios establecidos por Estados Unidos. Es importante aclarar que Marambio está sobre permafrost, mientras que los aeródromos de Estados Unidos son adecuados sobre hielo glaciar, blanco y marino; sin embargo, las prácticas de mantenimiento para ambos países resultan similares, por lo que vale la pena analizar ambos criterios.

- Las dimensiones establecidas para la operación del Hércules en el aeródromo Marambio están definidas en 1209 m de longitud y 40 m de ancho. La OACI no sugiere criterios para pistas en entorno antártico; por su parte, el Departamento de Defensa de los Estados Unidos revela que la longitud mínima para aeronaves C-130 totalmente cargadas debe ser de 2440 m y 46 m de ancho, a menos que el Comando Superior de Dirección de Operaciones indique lo contrario. Con referencia a lo anterior, se concluye que las dimensiones de las pistas, a pesar de ser definidas por criterios que incluyen la evaluación del performance de la aeronave de diseño, pueden ser adecuadas a las necesidades operacionales de cada autoridad aeronáutica, garantizando una aproximación segura al aeródromo, además de la influencia de factores como la meteorología del lugar, que puede variar considerablemente de un lugar a otro en la Antártida.

La meteorología siempre será un factor determinante en el desarrollo de operaciones aéreas, ya que, por un lado, afecta la visibilidad del aeródromo, y por otro, puede cambiar el estado del suelo.

Marambio está sobre tierra congelada y depende de bajas temperaturas para que el acuífero sobre el permafrost no se descongele y genere zonas pantanosas. Para las pistas de Estados Unidos en la Antártida, los vientos forman acumulaciones de nieve que generan irregularidades y en verano se descongelan áreas de la pista, produciendo baches que restringen las operaciones de transporte aéreo, condiciones que son comunes en la pista de hielo Pegasus de EE. UU.

Independientemente del aeródromo y del material con el cual fue adecuado, es necesario realizar inspecciones visuales y ensayos con el DCP, equipo portátil que debería ser parte de las revistas a la pista, para evaluar la resistencia del suelo, ya sea tierra o hielo. Este tipo de prácticas son documentadas por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos, permitiendo tener mayor información en la toma de decisiones para el aterrizaje seguro de las aeronaves.

Cada autoridad aeronáutica debe hacer estudios que caractericen el suelo sobre el cual se proyecte la adecuación de un aeródromo antártico, además de servir para el diseño de métodos de chequeo en la evaluación de su resistencia, permitiendo identificar valores ideales que sugieran el aterrizaje seguro de una aeronave. Asimismo, la administración del aeródromo debe contar con personal capacitado y equipos de medición que incluyan como mínimo, nivel de precisión y DCP.

- Respecto a las zonas libres de obstáculos, Argentina contempla la franja y las SLO (aproximación, horizontal, cónica y transición); por su parte, Estados Unidos incluye área nivelada, área lateral libre y aproximación. En cualquiera de los casos se debe garantizar que en cercanías al aeródromo no existan objetos que representen un riesgo a la seguridad en el aterrizaje y/o despegue; en caso de requerir instalar algún objeto para la navegación cerca de la pista, este debe ser frangible.
- Respecto de la certificación de aeródromo, ambas autoridades aeronáuticas tienen dentro de sus procedimientos la medición del aeródromo. La sugerencia para Marambio es la inclusión del equipo DCP en las inspecciones de la resistencia del suelo.

Frente al tercer factor, la cartografía aeronáutica, se consultaron las publicaciones argentinas para Marambio, encontrando dos cartas de aproximación VOR, pero actualmente la radioayuda no tiene certificación de operación, razón por la cual Colombia diseñó los procedimientos RNP de aproximación para el aterrizaje del Hércules en Marambio. Por otra parte, Estados Unidos tiene publicada una carta RNAV de la pista de esquí del polo sur Jack F. Paulus y una aproximación RNAV para el aeródromo Phoenix, entre otras.

Conclusiones

La experticia del Cocoantar en operaciones antárticas les ha permitido establecer sus propios criterios de operación en ese entorno, siendo Argentina el país latinoamericano referente en la adecuación, sostenimiento y mantenimiento de aeródromos en el continente blanco.

El aeródromo Marambio cuenta con las condiciones necesarias para el desarrollo de operaciones aéreas; sin embargo, valdría la pena reubicar los desagües, para evitar riesgos ante salidas de pista.

Por su parte, Colombia debe fortalecer las relaciones con países de alta experiencia, como Argentina o Estados Unidos, no solo desde el área de vuelo, sino también en el personal de controladores, diseñadores e ingenieros involucrados en los procesos de cartas aeronáuticas y de adecuación y certificación de aeródromos. Además, resulta importante establecer acuerdos bilaterales de infraestructura para la construcción de una base con pista a fin de hacer presencia en el continente blanco.

La corrupción de datos críticos y esenciales es el factor más complicado, porque afecta la información básica de referencia y en consecuencia las fases posteriores, demostrando que por la alteración de los datos originales se corre un grave riesgo de no poder continuar en condiciones seguras el vuelo y aterrizaje de una aeronave, posibilitando la ocurrencia de una catástrofe.

La forma adecuada de hacer levantamiento de información geoespacial implica la combinación de técnicas de topografía convencional y no convencional, las cuales permiten tener un espectro amplio de las condiciones del aeródromo,

detallando el estado de la pista y sus dimensiones, además de servir como complemento en caso de ausencia de información.

Los equipos mínimos requeridos para el mantenimiento e inspección de un aeródromo antártico son: nivel geométrico, DSP para la evaluación de la resistencia del suelo, retroexcavadora y rodillo compactador, además de contar con mínimo dos personas técnicas especializadas para la recolección de información, especialmente antes del aterrizaje.

Colombia, en cabeza de la FAC, debe generar documentos guía y listas de verificación que abarquen la adecuación, mantenimiento e inspección de aeródromos en entorno antártico como Argentina y Estados Unidos, países que tienen documentado cada proceso involucrado en el desarrollo seguro de operaciones aéreas antárticas.

El aeródromo Marambio está en la capacidad de recibir una aeronave a la vez, al no tener disponibilidad de plataformas y calle de rodaje, generando la ocupación de la pista durante la estancia de una aeronave.

La codificación de los procedimientos de vuelo en las bases de datos de la aeronave contribuye eficazmente en la prevención de transcripción de errores en datos en ruta, puntos de recorrido y coordenadas, entre otros, por parte del piloto.

Los métodos de levantamiento geodésico y vuelo con dron para la determinación de los factores de riesgo técnico del aeródromo Marambio fueron implementados principalmente porque son técnicas combinadas de recolección de información, que permiten evaluar la calidad de los datos recopilados y están incluidas en el apéndice E del documento 9674 *Manual del Sistema Geodésico Mundial WGS 84* (OACI, 2002).

La metodología de recolección de datos en campo a partir del levantamiento topográfico y vuelo con dron ofrece un gran potencial para dar cumplimiento a los requisitos de calidad de los datos aeronáuticos, además de reducir el tiempo empleado en el trabajo de campo respecto al uso de métodos convencionales, dado que Marambio posee limitaciones de acceso debido a su orografía compleja. En conclusión, la captura de datos con drones requiere menos personal y equipo, siendo una solución rápida, efectiva y de bajo costo en

comparación con la captura de imágenes aéreas desde una aeronave convencional.

Agradecimientos

Al TC Tabares William, por su confianza y por permitirnos participar en el proyecto de investigación; a los TE Cárdenas Erika y T1 Velasco Jorge, por su apoyo en los trabajos de campo de la fase II; al T1 (RA) Valencia Mario, por su asesoría en procedimientos aeronáuticos; a los T1 Barrios Harol y T3 Ardila Haiber, por la estandarización de las cartas aeronáuticas, y a Darinson Cubillos, por sus aportes desde el área de topografía aeronáutica.

Bibliografía

- Administración Nacional de Aviación Civil . (2022 de 04 de 2022). *Información Aeronáutica*. Obtenido de Publicación Información Aeronáutica: <http://ais.anac.gov.ar/aip>
- AlliedSignal Aerospace. (2020). *Pilot's Guide* . AlliedSignal Aerospace.
- ANAC. (2021). *Diseño de Aeródromos* (Tercera ed.). ANAC.
- Avionics Services. (2014). *C-130 Flight Manual*. Avionics Services.
- Bentley Systems. (2022). *ContextCapture - User guide Bentley*. Bentley. https://docs.bentley.com/LiveContent/web/ContextCapture_User_Guide_EN_PDF-v18/en/ContextCapture%20User%20Guide%20EN.pdf
- Busso, A. S. (2000). Caracterización del comportamiento hidrogeológico en la Isla Marambio, Antártida. *Águas Subterrâneas*. <https://aguassubterraneas.abas.org/subterraneas/article/view/23556>
- Comité Técnico Nacional de Asuntos Antárticos. (2014). *Agenda Científica Antártica de Colombia 2014-2035*.
- Comisión Colombiana del Océano. Comisión Colombiana del Océano: https://cco.gov.co/docs/publicaciones/Agenda_Antartica.pdf
- Consejo Nacional de beneficios tributarios en Ciencia, tecnología o de innovación. (04 de 12 de 2022). *Tipología de Proyectos calificados como de carácter científico, tecnológico e innovación*. Obtenido de Ministerio de Ciencia Tecnología e Innovación. https://minciencias.gov.co/sites/default/files/upload/convocatoria/Aneo3-tipologia-proyectos-version4_1.pdf
- Council of Managers of National Antarctic Programs. (2022). *Antarctic Flight Information Manual (AFIM)*. COMNAP.

- Department of Defense. (2015). *Air Force Design, Construction, Maintenance and Evaluation of snow and ice airfields in Antarctica*. Virginia: Department of Defense. <https://www.wbdg.org/ffc/dod/unified-facilities-criteria-ufc/fc-3-260-06f>
- Dirección Nacional del Antártico. (2020). *Evaluación Ambiental inicial Instalación de una central solar Fotovoltaica - Base Marambio*. DNA.
- European Organization for Civil Aviation Equipment. (2015). *Standards for Processing Aeronautical Data*. Malakoff. EUROCAE. <https://eshop.eurocae.net/eurocae-documents-and-reports/ed-76a/>
- IGAC. (2022). *Anexo 3 - Requerimientos para levantamientos topográficos y procesamiento de puntos de control terrestre*. IGAC. https://www.igac.gov.co/sites/igac.gov.co/files/anexo_6.3_requerimientos_para_el_levantamiento_y_procesamiento_de_datos.pdf
- Instituto Geográfico Militar. (06 de 12 de 2022). *Geodésia - Instituto Geográfico Nacional*. <https://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/Geodesia/Principal>
- Leica Geosystems. (2022a). *Leica Captivate*. Leica.
- Leica Geosystems. (2022b). *User Manual Leica GS14/GS16*. Leica.
- Lockheed Martin. (2022). *C-130J Super Hercules*. Lockheed Martin. <https://www.lockheedmartin.com/en-us/products/c130.html>
- National Aeronautics and Space Administration. (31 de 03 de 2020). *Crustal Dynamics Data Information System*. https://cddis.nasa.gov/Data_and_Derived_Products/GNSS/orbit_products.html
- National Oceanic and Atmospheric Administration. (02 de 10 de 2022a). *Antenna Calibrations*. <https://geodesy.noaa.gov/ANTCAL/>
- National Oceanic and Atmospheric Administration. (14 de 06 de 2022b). *Magnetic Field Calculators*. Magnetic Field Calculators. <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/calculators/magcalc.shtml>
- OACI. (1991). *Documento 9150 - Manual de Aeropuertos STOL*. OACI.
- OACI. (2002). *Manual del Sistema Geodésico Mundial - 1984 (WGS-84)*. OACI.
- OACI. (2006). *Documento 9157 - Manual de Diseño de Aeródromos - Parte 1 Pistas 3ª ed.* OACI.
- OACI. (2009). *Anexo 4 al Convenio sobre Aviación Civil Internacional - Cartas aeronáuticas 11ª ed.*OACI. <https://elibrary.icao.int/reader/267286/&returnUrl%3DaHR0cHM6Ly9lbGlicmFyeS5pY2FvLmludC9leHBsb3JlO3NlYXJjaFRleH-Q9YW5leG8lMjA0JTlWJUUYJGwJTk0JTlWY2FydG-FzJTIwYWVyb24lQzMIQTFF1dGJlYXNM7cGhyYXNl-TWF0Y2g9MDt0aGVtZU5hbWU9Qmx1ZS1UaGVt-ZS9wcm9kdWN0LWRldGFpbHMvMjY3Mj>
- OACI. (2013). *Manual de navegación basada en la performance (PBN)*. OACI.
- OACI. (2014). *Documento 8168 - Operación de Aeronaves - Volumen II Construcción de Vuelo Visual y por Instrumentos*. OACI.
- OACI. (2018). *Manual de gestión de la seguridad operacional 4ª ed.* OACI.
- OACI. (2018a). *Documento 10066 - Gestión de la Información Aeronáutica*. OACI.
- OACI. (2020). *Procedimientos para los Servicios de Navegación Aérea - Aeródromos - Documento 9981, 3ª ed.* OACI.
- Regulaciones Argentinas de Aviación Civil. (2022). *Parte 156 - Diseño y Operación de Aeródromos STOL*. ANAC.
- Servicio Meteorológico Argentino . (12 de 12 de 2022). *Descarga del Catálogo de Datos Abiertos del SMN*. <https://www.smn.gob.ar/descarga-de-datos>
- Tabares, W. A. (2021). Peligros de la operación aérea en la Antártida para gestionar la seguridad operacional de la Fuerza Aérea Colombiana. *Revista de Relaciones Internacionales, Estrategia y Seguridad*, 77-109. doi:<https://doi.org/10.18359/ries.5274>

