

Análisis de la influencia de la meteorología adversa en las operaciones aéreas

| Fecha de recibido: 05 de julio de 2024 | Fecha de aprobado: 19 de agosto de 2024 |

| Reception date: July 5, 2024 | Approval date: August 19, 2024 |

| Data de recebimento: 05 de julho de 2024 | Data de aprovação: 19 de agosto de 2024 |

Juan Carlos Daza Rincón

<https://orcid.org/0000-0002-5277-7837>
jcdazar01@libertadores.edu.co

Ingeniero Aeronáutico
Fundación Universitaria Los Libertadores, Colombia
Rol del investigador: teórico y escritura
Grupo de investigación ARESYS

Aeronautical Engineer
Los Libertadores University Foundation, Colombia
Researcher's role: theoretical and writing
ARESYS research group

Engenheiro Aeronáutico
Fundação Universitária Los Libertadores, Colômbia
Papel do investigador: teórico e escrito
Grupo de investigação ARESYS

Rafael Enrique Ucros Rojas

<https://orcid.org/0000-0001-5125-4252>
reucrosr@libertadores.edu.co

Ingeniero Aeronáutico
Fundación Universitaria Los Libertadores, Colombia
Rol del investigador: teórico y escritura
Grupo de investigación ARESYS

Aeronautical Engineer
Los Libertadores University Foundation, Colombia
Researcher's role: theoretical and writing
ARESYS research group

Engenheiro Aeronáutico
Fundação Universitária Los Libertadores, Colômbia
Papel do investigador: teórico e escrito
Grupo de investigação ARESYS

Luisa Fernanda Mónico Muñoz

<https://orcid.org/0000-0002-3597-6332>
luisa.monico@libertadores.edu.co

Docente e investigadora - Fundación
Universitaria Los Libertadores, Colombia
Rol del investigador: teórico y escritura
Grupo de investigación ARESYS

Ph.D. in Propulsive Systems in Means of Transportation
Teacher and researcher - Fundación Universitaria Los
Libertadores, Colombia
Researcher's role: theoretical and writing
ARESYS research group

Doutorado em Sistemas Propulsivos
em Meios de Transporte
Professor e pesquisador - Fundación Universitaria Los
Libertadores, Colômbia
Papel do pesquisador: teórico e escrito
Grupo de pesquisa ARESYS

Cómo citar este artículo: Daza Rincón, J. C., Ucros Rojas, R. E. y Mónico Muñoz, L. F. (2025). Análisis de la influencia de la meteorología adversa en las operaciones aéreas. *Ciencia y Poder Aéreo*, 20(1), 59-67. <https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaereo.834>



Análisis de la influencia de la meteorología adversa en las operaciones aéreas

Resumen: La industria de la aviación es un componente vital del desarrollo económico global, dado que impulsa sectores como el turismo y el comercio. Las condiciones meteorológicas adversas impactan significativamente la seguridad y la eficiencia operativa de la aviación, lo cual representa un factor incontrolable importante. Este estudio tiene como objetivo analizar la influencia de las condiciones meteorológicas adversas en las operaciones aéreas. Los hallazgos muestran que el 23 % de los accidentes aéreos están relacionados con factores meteorológicos como el viento adverso, la baja visibilidad, la formación de hielo y la turbulencia. Además, en Estados Unidos el 82 % de los retrasos y el 42 % de las cancelaciones de vuelos son atribuibles a eventos meteorológicos adversos. La puesta en marcha de tecnologías de punta, como la inteligencia artificial y los modelos predictivos, junto con algoritmos como el ATMAP (ATM Airport Performance), se considera crucial para mejorar la planificación y respuesta operativa frente a estas condiciones, lo cual permite una gestión más eficaz del tráfico aéreo, y mantiene la seguridad y la puntualidad de las operaciones aeroportuarias.

Palabras clave: aeropuerto; demoras; desvíos; meteorología adversa; operaciones aéreas.

Analysis of the Influence of Adverse Weather on Aircraft Operations

Abstract: The aviation industry is a vital component of global economic development, as it drives sectors such as tourism and trade. Adverse weather conditions significantly impact the safety and operational efficiency of aviation, which represents an important uncontrollable factor. This study aims to analyze the influence of adverse weather conditions on aviation operations. The findings show that 23 % of air accidents are related to meteorological factors such as adverse wind, low visibility, icing and turbulence. In addition, in the United States 82 % of flight delays and 42 % of flight cancellations are attributable to adverse weather events. The implementation of state-of-the-art technologies, such as artificial intelligence and predictive models, together with algorithms such as ATMAP (ATM Airport Performance), is considered crucial to improve planning and operational response to these conditions, enabling more efficient air traffic management, and maintaining the safety and punctuality of airport operations.

Keywords: Airport; delays; diversions; adverse weather; air operations.

Análise da influência do clima adverso nas operações aéreas

Resumo: O setor de aviação é um componente vital do desenvolvimento econômico global, pois impulsiona setores como o turismo e o comércio. As condições climáticas adversas afetam significativamente a segurança e a eficiência operacional da aviação, o que representa um importante fator incontrolável. Este estudo tem como objetivo analisar a influência das condições climáticas adversas nas operações de aviação. Os resultados mostram que 23% dos acidentes aéreos estão relacionados a fatores meteorológicos, como vento adverso, baixa visibilidade, formação de gelo e turbulência. Além disso, nos Estados Unidos, 82% dos atrasos de voos e 42% dos cancelamentos de voos são atribuídos a eventos climáticos adversos. A implementação de tecnologias de ponta, como inteligência artificial e modelagem preditiva, juntamente com algoritmos como o ATMAP (ATM Airport Performance), é considerada crucial para melhorar o planejamento e a resposta operacional a essas condições, permitindo um gerenciamento mais eficiente do tráfego aéreo e mantendo a segurança e a pontualidade das operações aeroportuárias.

Palavras-chave: Aeroporto; atrasos; desvios; clima adverso; operações aéreas.

Introducción

Desde sus inicios, la aviación ha sido un componente vital del desarrollo económico, impulsora de otras industrias como el turismo y el comercio, y esencial en épocas de guerra o conflictos entre naciones. Para el 2019 la aviación generó 704,4 billones de dólares en beneficios brutos directos e impulsó 65,5 millones de puestos de trabajo alrededor del mundo (Oo y Oo, 2022).

Un factor importante que tiene un impacto directo en la aviación es la meteorología, uno de los aspectos que más influyen en el funcionamiento de una aeronave y en su seguridad. Aunque si bien la meteorología puede traer beneficios para la aviación, es un factor incontrolable con el que se debe convivir a la hora de realizar operaciones aéreas; por tanto, es fundamental conocer cuál es su influencia en el transporte aéreo (Oo y Oo, 2022).

La importancia de estudiar la meteorología en aviación radica en que puede alterar la seguridad de los vuelos y las operaciones, generar pérdidas económicas e incluso causar muertes (Gultepe, 2023). Se considera que su influencia en la seguridad se debe a que en el periodo 1995-1998 se presentaron 1520 accidentes de aviación general, y al menos una condición meteorológica fue un factor contribuyente para los accidentes reportados por la Junta Nacional de Seguridad en el Transporte. Se llegó a registrar que cerca del 30% de los accidentes de aviación en Estados Unidos son causados por la meteorología (Gultepe, 2023). Este tipo de afectaciones como incidentes o accidentes tienen un impacto directo no solo en la seguridad de la aviación, sino también en diferentes aspectos de la economía.

Uno de los efectos más relevantes y comunes de la meteorología en la aviación es el retraso o la cancelación de los vuelos, el cual representa un problema para todos los agentes involucrados en el transporte aéreo, entre ellos los pasajeros, las aerolíneas, los aeropuertos y los proveedores de servicios de navegación; de hecho, llegan a representar pérdidas estimadas para el 2019 de 33 billones de dólares. Un retraso en

la red de transporte aéreo genera distintos problemas posteriores, pues teniendo en cuenta que una aeronave realiza varios vuelos al día, un evento de retraso o cancelación puede afectar las operaciones siguientes, la programación de las tripulaciones y las conexiones o escalas en el caso de los pasajeros (Bombelli y Sallan, 2023).

Entre las causales de retraso están las siguientes: problemas de seguridad, meteorología adversa, retrasos debido al Sistema Nacional de Aviación, retrasos debidos al operador de la aeronave, llegada tarde de la aeronave, etc. (Hosterltur España, 13 de noviembre de 2008; Aerocivil, 2017). En cifras para el 2019, como se presenta en la Figura 1, se tiene que el 6% de los retrasos en las operaciones aéreas se debieron a la meteorología. Esta cifra durante años se ha mantenido alrededor del 6%, lo cual indica que no se presenta un cambio significativo, ya que es una variable que no es posible controlar (Oo y Oo, 2022).

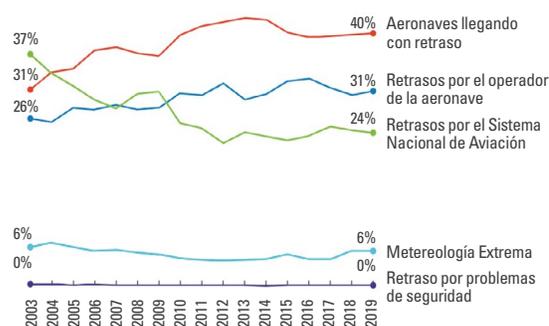


Figura 1. Causa del retraso por año, en porcentaje del total de minutos de retraso

Fuente: adaptado de Oo y Oo (2022).

Debido a la problemática presentada, algunos autores han realizado estudios relacionados con la meteorología adversa y su influencia. En el estudio de Gultepe *et al.* (2019), se analizan los efectos de varios fenómenos meteorológicos, como la niebla y la baja visibilidad, en las operaciones aeroportuarias y el control del tráfico aéreo. Se hace énfasis en cómo estos eventos pueden reducir significativamente la capacidad operativa y aumentar los retrasos. Los autores ofrecen un análisis de las medidas de mitigación y las estrategias de gestión de tráfico aéreo para mejorar

la resiliencia y la eficiencia bajo condiciones climáticas adversas.

Por su parte, Rodríguez-Sanz *et al.* (2021) investigan cómo las condiciones climáticas adversas afectan el rendimiento de los aeropuertos en términos de retrasos en las llegadas y la capacidad operativa. Ellos utilizan una metodología para evaluar el impacto de eventos meteorológicos adversos en el rendimiento de la llegada a los aeropuertos, utilizando datos de más de 750 000 vuelos en un importante centro europeo y datos meteorológicos locales del periodo 2015-2018.

Con el fin de buscar una solución a estas problemáticas, surge el estudio de Gultepe (2023), que ofrece una visión general de la meteorología aeroportuaria. Se discute cómo los pronósticos precisos y la interpretación meteorológica pueden mejorar la seguridad y la eficiencia de las operaciones aeroportuarias. A su vez, se destaca la importancia de tecnologías avanzadas y la integración de datos meteorológicos en tiempo real con sistemas de gestión de operaciones aeroportuarias para adaptarse dinámicamente a las condiciones cambiantes y minimizar impactos operativos adversos.

Siguiendo la idea de Gultepe *et al.* (2019), Goodman y Small-Griswold (2019) destacan la implementación de sistemas avanzados que pueden facilitar una mejor planificación y respuesta a las condiciones meteorológicas adversas. Asimismo, analizan casos específicos en los que la tecnología ha permitido a los operadores de aeropuertos y controladores de tráfico aéreo tomar decisiones más informadas para gestionar eficazmente el flujo de tráfico aéreo, y mantener la seguridad y la puntualidad de las operaciones.

Si bien existen tecnologías para el estudio de la meteorología, es importante implementarlas en conjunto con las tendencias actuales como el caso de la inteligencia artificial. Por eso, es necesario mencionar a Schultz *et al.* (2018), quienes destacan la implementación de modelos predictivos que integran datos meteorológicos en tiempo real para optimizar la programación de vuelos y minimizar retrasos. Este último estudio también discute la aplicación de modelos estadísticos y de simulación para evaluar el efecto de

diversas condiciones meteorológicas en la puntualidad de los vuelos y la eficiencia operacional de los aeropuertos.

Metodología

Se comienza por definir claramente el problema, lo cual ayuda a establecer un marco específico para la investigación, identificando los objetivos y las preguntas clave que se quieren responder. El objetivo principal de este trabajo es analizar cómo influye la meteorología adversa en las operaciones aéreas. Una vez determinado el problema de investigación, se realiza una revisión de la literatura. Esta última etapa es esencial para entender lo que ya se sabe sobre el tema, identificar qué áreas no han sido exploradas y cómo nuestro enfoque puede aportar algo nuevo al conocimiento existente.

Con la información recopilada, se procede a comparar y a contrastar los datos y estudios existentes para ver si realmente se alinean con el planteamiento inicial y si pueden ofrecer respuestas a las preguntas de investigación. Es un proceso en el que se evalúa la relevancia y la actualidad de la información, y se revisa si lo que se ha encontrado satisface las necesidades iniciales. Si la respuesta es negativa, se avanza a la fase de revisión de literatura para ajustar el enfoque o buscar más datos; si es afirmativa, se avanza hacia la fase final.

El último paso consiste en analizar toda la información desde una perspectiva que permita alcanzar los objetivos planteados. Aquí, todo se enfoca en sacar conclusiones bien fundamentadas en las investigaciones encontradas que respondan al problema inicial, interpretando los datos y reflexionando sobre las implicaciones de los hallazgos. Lo anterior, se presenta esquemáticamente en la Figura 2.



Figura 2. Metodología

Fuente: elaboración propia.

Resultados y análisis

La influencia de la meteorología adversa en las operaciones aéreas es múltiple y compleja, por lo cual impacta la seguridad y la eficiencia operativa de la aviación.

En el periodo comprendido entre 2008 y 2020, por medio de datos de la Junta Nacional de Seguridad en el Transporte, es posible desarrollar una representación visual del impacto de diferentes condiciones meteorológicas en los accidentes relacionados con la aviación. La Figura 3 indica que el 23 % de todos los accidentes de aviación están relacionados con el clima, mientras que el 77 % no lo están, lo cual resalta la importancia significativa de las condiciones meteorológicas en la seguridad de la aviación. Este dato es crucial para entender la importancia del problema y resaltar la necesidad de estrategias efectivas para mitigar el impacto de las condiciones meteorológicas adversas. La distribución de las causas meteorológicas de los accidentes revela que el viento adverso es la causa más frecuente, con el 53 % de incidentes. Las fuertes ráfagas y los vientos cruzados pueden afectar la estabilidad y el control de las aeronaves durante el despegue y el aterrizaje. Esta alta incidencia destaca la importancia de mejorar las predicciones y las respuestas operativas a los vientos adversos.

Otra causa significativa es la baja visibilidad, con el 16 % de accidentes relacionados con el clima. Tales condiciones dificultan las operaciones de despegue y aterrizaje, aumentando el riesgo de accidentes. La formación de hielo en las estructuras de la aeronave y en el carburador en aeronaves que lo tienen también es una causa notable, que contribuye al 9 % de los accidentes (7 % por hielo en el carburador y 2 % por hielo en la estructura). La acumulación de hielo puede afectar negativamente la aerodinámica y el rendimiento del motor.

La turbulencia es responsable del 6 % de los accidentes, siendo otra causa significativa que puede desestabilizar la aeronave y afectar la seguridad del vuelo. La altitud de densidad, con el 5 %, afecta el rendimiento del motor y la sustentación de las aeronaves, especialmente en regiones montañosas y en días calurosos. Las corrientes de aire ascendentes y descendentes representan otro 5 % de los accidentes. Los cambios rápidos en la altitud pueden desestabilizar las aeronaves, especialmente en vuelos a baja altitud.

Las tormentas eléctricas, aunque solo representan el 2 % de los accidentes, son extremadamente peligrosas debido a los rayos, el granizo y la turbulencia severa asociada. La cizalladura del viento (*windshear*), también con el 2 %, es una condición crítica que puede causar pérdidas repentinas de altitud y velocidad

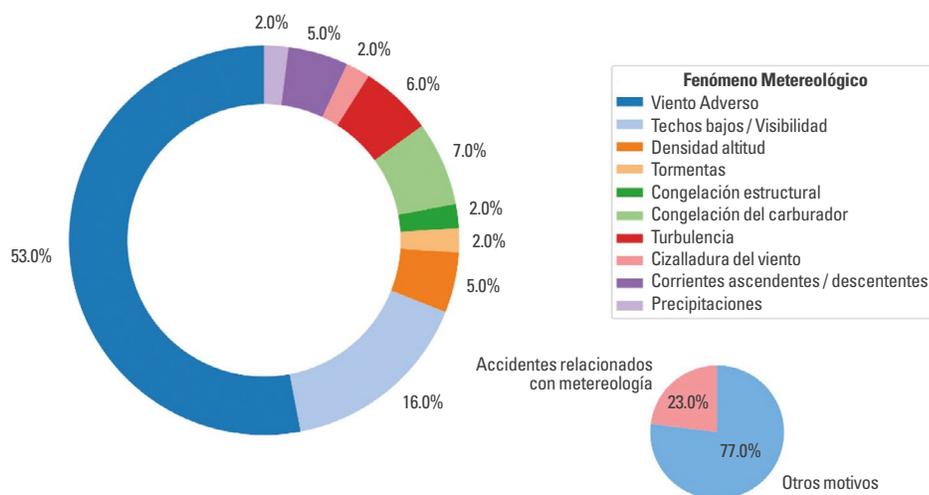


Figura 3. Accidentes relacionados con el factor medioambiental en el periodo 2008-2020, según datos de la Junta Nacional de Seguridad en el Transporte
Fuente: adaptado de Gutelpe (2023).

durante el despegue y el aterrizaje. La precipitación, incluyendo lluvia intensa y nieve, contribuye al 2% de los accidentes al afectar la visibilidad y las condiciones de la pista.

Los retrasos y las cancelaciones de vuelos son una de las consecuencias más reveladoras de las condiciones meteorológicas adversas. Los eventos meteorológicos extremos en Estados Unidos contribuyen significativamente a los retrasos en las operaciones aéreas, con 82% de los minutos de retraso en el Sistema Nacional del Espacio Aéreo atribuidos al clima. Asimismo, el 42% de las cancelaciones de vuelos se debieron a eventos meteorológicos adversos, y los retrasos más graves fueron asociados con condiciones de congelación, tormentas eléctricas y baja visibilidad (Goodman y Small-Griswold, 2019).

Si bien las condiciones meteorológicas, junto con su intensidad, pueden variar drásticamente dependiendo de la ubicación geográfica, siempre existe el factor climático. En Europa, se estudiaron el impacto de las condiciones climáticas adversas en los retrasos de llegadas y en la capacidad operativa de los aeropuertos europeos, utilizando una metodología basada en redes bayesianas. Se encontró una fuerte correlación entre eventos meteorológicos adversos y retrasos de llegada, especialmente en condiciones de alta demanda y capacidad limitada; la intensidad y dirección del viento, la baja visibilidad y las condiciones de tormenta se identificaron como variables meteorológicas críticas (Gultepe, 2023).

Con el fin de cuantificar las condiciones meteorológicas, se crea el algoritmo ATMAP (ATM Airport Performance) para describir condiciones meteorológicas en los aeropuertos, creado por la Organización Europea para la Seguridad de la Navegación Aérea. El objetivo es cuantificar y gestionar los impactos meteorológicos en las operaciones aeroportuarias, proporcionando una base para la programación y la toma de decisiones informadas en la industria de la aviación.

Los resultados obtenidos por este algoritmo muestran que las condiciones climáticas severas, como altas velocidades de viento, baja visibilidad y fenómenos peligrosos (tormentas, nieve intensa), tienen

un impacto importante en la capacidad operativa de los aeropuertos y resultan en mayores tasas de cancelaciones y retrasos. Por medio de estos resultados, se destaca la importancia de los modelos predictivos y la integración de datos meteorológicos en tiempo real para mejorar la programación de vuelos y minimizar los retrasos (Schultz *et al.*, 2019).

Con el algoritmo ATMAP se realizó un estudio en el aeropuerto de Gatwick, que puede ser observado en la Figura 4. En el eje horizontal, se representa el tiempo del día en minutos, mientras que en el eje vertical izquierdo se muestra el retraso acumulado en minutos, y en el eje vertical derecho se presenta la puntuación ATMAP. La relación entre la puntuación ATMAP (línea negra) y los retrasos acumulados (barras grises) es evidente en el gráfico. Se observa que durante los periodos en que la puntuación ATMAP es alta, los retrasos acumulados también aumentan significativamente, lo cual indica que las condiciones meteorológicas adversas, reflejadas por una alta puntuación ATMAP, tienen un impacto directo en el incremento de los retrasos de vuelo (Schultz *et al.*, 2019). A lo largo del día, se observan patrones de retrasos significativos, especialmente al inicio del día. En este periodo, se produce un rápido incremento de los retrasos con un máximo de 795 minutos acumulados debido a un periodo de dos horas de niebla, asociado con una puntuación ATMAP de 5 (Schultz *et al.*, 2019).

La comparación entre los movimientos programados de aeronaves (línea roja) y los movimientos reales de aeronaves (línea azul) muestra que durante los periodos de alta puntuación ATMAP hay una diferencia significativa entre los dos tipos de movimientos. Esto indica una reducción en la capacidad operativa del aeropuerto de Gatwick debido a las condiciones meteorológicas adversas. La niebla se destaca como un fenómeno meteorológico crítico en este caso y causa una gran acumulación de retrasos en un corto periodo de tiempo. Debido a lo anterior, es importante tener previsiones precisas y medidas de mitigación para gestionar los periodos de baja visibilidad y minimizar los impactos en las operaciones del aeropuerto (Schultz *et al.*, 2019).

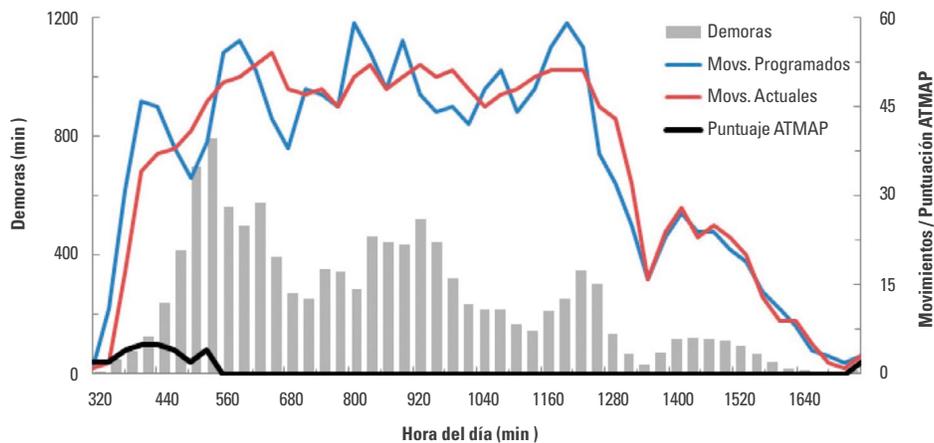


Figura 4. Datos sobre el rendimiento del aeropuerto y puntuación meteorológica ATMAP en el aeropuerto de Gatwick
Fuente: adaptado de Schultz et al. (2019).

Los diferentes estudios que han revisado el impacto de las condiciones meteorológicas destacan la necesidad de implementar tecnologías avanzadas y estrategias de mitigación para mejorar la resiliencia y la eficiencia bajo condiciones climáticas adversas. Gultepe (2023) y Goodman y Small-Griswold (2019) discuten cómo los pronósticos precisos y la interpretación meteorológica pueden mejorar la seguridad y la eficacia de las operaciones aeroportuarias. La integración de procesos como la inteligencia artificial y el aprendizaje automático en los sistemas de gestión de operaciones aeroportuarias permite una mejor planificación y respuesta a las condiciones meteorológicas adversas.

Dado lo anterior, se resalta la aplicación de modelos predictivos y simulaciones para evaluar el efecto de diversas condiciones meteorológicas en la puntualidad de los vuelos y la eficiencia operacional de los aeropuertos. Estos modelos permiten una evaluación más precisa de los impactos del clima y ayudan a desarrollar estrategias para mitigar los retrasos y mejorar la capacidad operativa (Schultz et al., 2018).

A su vez, los algoritmos no supervisados hacen inferencias a partir de conjuntos de datos utilizando solo vectores de entrada, sin hacer referencia a salidas conocidas o etiquetadas. Un método básico de esta área es la agrupación de *k-media*, que busca un

número definido de *k* grupos en un conjunto de datos que son similares entre sí y tienen en cuenta los patrones subyacentes. El algoritmo comienza con un primer conjunto de centroides, seleccionados aleatoriamente, utilizados como punto de partida para cada grupo y luego realiza cálculos iterativos para optimizar las posiciones de los centroides (Hartigan y Wong 1979). Sin embargo, era uno de los métodos más antiguos y su precisión no era la mejor, por lo cual ya está en desuso.

Hoy en día, la inteligencia artificial ha demostrado ser una herramienta esencial en la precisión de las predicciones climáticas y en el desarrollo y el planteamiento de soluciones novedosas para encarar los problemas medioambientales. La inteligencia artificial tiene la capacidad de analizar grandes volúmenes de datos ambientales (temperaturas, precipitaciones, patrones de viento, etc.), con el fin de identificar tendencias y hacer proyecciones sobre el futuro climático con mayor precisión. Por ejemplo, algoritmos de inteligencia artificial están siendo utilizados para mejorar los modelos climáticos globales, y permiten a los científicos prever con más exactitud fenómenos extremos como huracanes, olas de calor y sequías (CDETECH, 20 de mayo 2024). Esta mayor precisión en las predicciones hace que los seres humanos puedan actuar y buscar soluciones a los problemas que se avecinan.

En el sector aéreo, la inteligencia artificial ha ayudado también en la predicción de las trayectorias de las aeronaves empleando algoritmos de *deep learning* (Peñas-Pérez, 2022), a predecir la formación de tormentas (Hamlet, 19 de mayo de 2021) y a pronosticar variables meteorológicas a través del algoritmo LGB Classifier con 250 estimadores de la librería Scikit-Learn (Valenciano, 1 de octubre de 2023).

El análisis de los estudios revisados muestra que las condiciones meteorológicas adversas tienen un impacto significativo en las operaciones de aviación, pues afectan tanto la seguridad como la eficiencia operativa. Fenómenos meteorológicos como la baja visibilidad, el viento, la precipitación y las condiciones de congelación son factores críticos que contribuyen a los retrasos y a las cancelaciones de vuelos, así como a la reducción de la capacidad operativa de los aeropuertos. El hecho de que los aeropuertos puedan contar con herramientas de predicción cada vez más precisas permitiría que las compañías aéreas que transportan pasajeros y carga planteen soluciones oportunas y eficaces ante situaciones críticas.

A nivel nacional, en el 2023 se reportaron inconvenientes a causa del mal clima, lo cual afectó la salida y la llegada de los vuelos nacionales e internacionales. La Aeronáutica Civil de Colombia reportó 211 vuelos con demoras que afectaron a 34 000 pasajeros, 52 vuelos fueron cancelados con 7130 pasajeros afectados y 1900 pasajeros que perdieron sus vuelos de conexión (Rairán, 20 de noviembre de 2023). Para ese mismo año, en el este de Estados Unidos más de 7000 vuelos se vieron afectados por las fuertes tormentas de verano (Wallace y Rothenberg, 7 de agosto de 2023).

Es crucial mejorar las capacidades de predicción y medición de estos fenómenos, implementar tecnologías avanzadas y desarrollar modelos predictivos que integren datos meteorológicos en tiempo real. Estas medidas permitirán a los operadores de aeropuertos y controladores de tráfico aéreo tomar decisiones más informadas, gestionar eficazmente el flujo de tráfico aéreo y mantener la seguridad y la puntualidad de las operaciones.

Conclusiones

Luego de realizar la revisión, se concluye que las condiciones meteorológicas adversas tienen un impacto significativo en la seguridad y eficiencia operativa de la aviación. El 23% de los accidentes aéreos están relacionados con factores meteorológicos, siendo los más críticos el viento adverso, la baja visibilidad, la formación de hielo y la turbulencia. En Estados Unidos, el 82% de los retrasos y el 42% de las cancelaciones de vuelos se atribuyen a eventos meteorológicos adversos. Estos hallazgos resaltan la necesidad de mejorar las predicciones meteorológicas y las respuestas operativas.

La implementación de tecnologías de punta, como la inteligencia artificial y los modelos predictivos, junto con algoritmos como el ATMAP, es esencial para cuantificar y gestionar los impactos meteorológicos en las operaciones aeroportuarias. Estas medidas permitirán a los operadores y controladores de tráfico aéreo tomar decisiones más oportunas, gestionar eficazmente el flujo de tráfico aéreo y mantener la seguridad y puntualidad de las operaciones. Lo anterior ayudará a mantener la calidad del servicio que se les presta a los pasajeros y, por qué no, al transporte de carga. Asimismo, tener herramientas que ayuden a planear alternativas de solución ante un evento meteorológico permitirá que las operaciones aéreas sean más organizadas.

Referencias

- Aerocivil. (2017). Anexo 01. Códigos de demora de causas de incumplimiento de itinerario. En: *Circular informativa N.º 2. Metodología cálculo del cumplimiento aerocomercial de empresas de transporte aéreo regular de pasajeros* [en línea]. <https://www.aerocivil.gov.co/atencion/estadisticas-de-las-actividades-aeronauticas/Cumplimiento/Circular%20No.%202%20-Anexo.pdf>
- Bombelli, A. y Sallan, J. M. (2023). Analysis of the effect of extreme weather on the us domestic air network. A

- delay and cancellation propagation network approach. *Journal of Transport Geography*, 107. <https://doi.org/10.1016/J.JTRANGEO.2023.103541>
- CDETECH. (2024, 20 de mayo). *Inteligencia artificial en la predicción del cambio climático* [en línea]. <https://cdetech.org/inteligencia-artificial-en-la-prediccion-del-cambio-climatico/#:~:text=Mejora%20de%20la%20Precisi%C3%B3n%20en%20las%20Predicciones%20Clim%C3%A1ticas&text=Por%20ejemplo%2C%20algoritmos%20de%20IA,olas%20de%20calor%20y%20sequ%C3%ADas>
- Goodman, C. J. y Small-Griswold, J. D. (2019). Meteorological impacts on commercial aviation delays and cancellations in the continental United States. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 58(3), 479-494. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-17-0277.1>
- Gultepe, I. (2023). A review on weather impact on aviation operations: Visibility, wind, precipitation, icing. *Journal of Airline Operations and Aviation Management*, 2(1), 1-44. <https://doi.org/10.56801/JAOAM.V2I1.1>
- Gultepe, I., Sharman, R., Williams, P. D., Zhou, B., Ellrod, G., Minnis, P., Trier, S., Griffin, S., Yum, S. S., Gharabaghi, B., Feltz, W., Temimi, M., Pu, Z., Storer, L. N., Kneringer, P., Weston, M. J., Chuang, H. ya, Thobois, L., Dimri, A. P., ... Albuquerque Neto, F. L. (2019). A review of high impact weather for aviation meteorology. *Pure and Applied Geophysics*, 176, 1869-1921. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02168-6>
- Hamlet. (2021, 19 de mayo). *Un nuevo algoritmo permite predecir la formación de tormentas en el aeropuerto de Madrid-Barajas* [en línea]. <https://www.uco.es/hamlet/index.php/noticias/13-un-nuevo-algoritmo-permite-predecir-la-formacion-de-tormentas-en-el-aeropuerto-de-madrid-barajas>
- Hartigan, J. A. y M. A. Wong. (1979). Algorithm AS 136: A K-Means Clustering Algorithm. *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)*, 28(1), 100-108. <https://www.stat.cmu.edu/~rnugent/PCMI2016/papers/HartiganKMeans.pdf>
- Hosteltur España. (2008, 13 de noviembre). *Identifican las cinco causas fundamentales de los retrasos aéreos* [en línea]. https://www.hosteltur.com/57156_identifican-cinco-causas-fundamentales-retrasos-aereos.html
- Oo, K. T. y Oo, K. L. (2022). Analysis of the most common aviation weather hazard and its key mechanisms over the Yangon flight information region. *Advances in Meteorology* [en línea]. <https://doi.org/10.1155/2022/5356563>
- Peñas-Pérez, I. (2022). Predicción de trayectorias de aeronaves empleando algoritmos de Deep Learning [trabajo de grado, Universidad de Valladolid]. Repositorio institucional UVA. <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/55658>
- Rairán, S. (2023, 20 de noviembre). *Aeropuerto El Dorado anuncia demoras en vuelos: estas serían las causas*. Infobae [en línea]. <https://www.infobae.com/colombia/2023/11/21/aeropuerto-el-dorado-anuncia-demoras-en-vuelos-estas-serian-las-causas/>
- Rodríguez-Sanz, Á., Cano, J. y Rubio-Fernández, B. (2021). Impact of weather conditions on airport arrival delay and throughput. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1024(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1024/1/012107>
- Schultz, M., Lorenz, S., Schmitz, R. y Delgado, L. (2018). Weather impact on airport performance. *Aerospace*, 5(4). <https://doi.org/10.3390/aerospace5040109>
- Schultz, M., Reitmann, S. y Alam, S. (2019). *Classification of weather impacts on airport operations*. 2019 Winter Simulation Conference (wsc). Diciembre 8-11 de 2018. <https://doi.org/10.1109/WSC40007.2019.9004915>
- Valenciano, J. R. (2023, 1 de octubre). *Aplicación de la inteligencia artificial al pronóstico de las variables meteorológicas en el aeropuerto de Vigo*. AEMET Blog [en línea]. <https://aemetblog.es/2023/10/01/aplicacion-de-la-inteligencia-artificial-al-pronostico-de-las-variables-meteorologicas-en-el-aeropuerto-de-vigo/>
- Wallace, G. y Rothenberg, E. (2023, 7 de agosto). *Miles de vuelos cancelados y retrasados en EE.UU. por el mal tiempo que amenaza el este del país*. CNN en Español [en línea]. <https://cnnespanol.cnn.com/2023/08/07/miles-vuelos-retrasados-mal-tiempo-este-eeuu-trax>