

Evaluation of preventive cancellations: discrepancy between aeronautical forecast (TAF) and observation (METAR) using temporal models

Patricia Uceda, Dr.¹; Luis Polo, Mg.¹

¹ Universidad Privada del Norte, Perú, patricia.uced@upn.edu.pe, luis.polo@upn.edu.pe

Abstract– This study evaluates in the ten Peruvian airports with the highest movement between 2015 and 2025, to what extent the discrepancy between the TAF aeronautical forecast and the METAR observation is associated with preventive cancellations, operationalized through a monthly proxy based on commercial operations and observed meteorological severity. Historical TAF/METAR series downloaded from OGIMET and commercial operations by airport-month were integrated from CORPAC's National Airport General Movement report. The proxy label was defined as the conjunction between a strange drop in operations and observed adverse weather determined by global percentiles of METAR variables (FG/TS phenomena, visibility, wind and ceiling). A base model with METAR variables was compared with models incorporating TAF-METAR discrepancies, using temporal validation (train ≤ 2022 ; test ≥ 2023). The results show incremental improvement by including robust discrepancies in phenomena such as fog and storm. In addition, airports with a higher frequency of falls without adverse weather observed were identified, providing evidence to focus operational audits and future studies with flight-level data.

Keywords– TAF, METAR, discrepancy, preemptive cancellation, business operations.

Evaluación de cancelaciones preventivas: discrepancia entre pronóstico aeronáutico (TAF) y observación (METAR) mediante modelos temporales

Patricia Uceda, Dr.¹; Luis Polo, Mg.¹

¹ Universidad Privada del Norte, Perú, patricia.uced@upn.edu.pe, luis.polo@upn.edu.pe

Resumen– El presente estudio evalúa en los diez aeropuertos peruanos con mayor movimiento entre los años 2015 y 2025, en qué medida la discrepancia entre el pronóstico aeronáutico TAF y la observación METAR se asocia con cancelaciones preventivas, operacionalizadas mediante un proxy mensual basado en operaciones comerciales y severidad meteorológica observada. Se integraron series históricas TAF/METAR descargadas de OGIMET y operaciones comerciales por aeropuerto-mes del reporte Movimiento General Aeroportuario Nacional de CORPAC. La etiqueta proxy se definió como la conjunción entre una caída extraña de operaciones y clima adverso observado determinado por percentiles globales de variables METAR (fenómenos FG/TS, visibilidad, viento y techo). Se comparó un modelo base con variables METAR frente a modelos que incorporan discrepancias TAF-METAR, usando validación temporal (train ≤ 2022 ; test ≥ 2023). Los resultados muestran mejora incremental al incluir discrepancias robustas en fenómenos como niebla y tormenta. Además, se identificaron aeropuertos con mayor frecuencia de caídas sin clima adverso observado, aportando evidencia para focalizar auditorías operacionales y futuros estudios con datos a nivel vuelo.

Palabras clave– TAF, METAR, discrepancia, cancelación preventiva, operaciones comerciales.

I. INTRODUCCIÓN

El mal clima incide de manera recurrente en la prestación de los servicios aéreos, ocasionando retrasos, cancelaciones y reprogramaciones que afectan directamente la experiencia de los pasajeros. Esta situación se ve agravada cuando las aerolíneas no brindan información clara, oportuna y consistente, lo que genera incertidumbre, desconfianza y malestar en los usuarios respecto al restablecimiento y la continuidad del servicio.

En Arequipa, Perú, en febrero del 2025 se reportó afectación de servicios de vuelos hasta por cinco días consecutivos, debido a mal clima, lluvias de moderada intensidad y cielo nublado [1] y, en enero del 2026 se reportó cancelación de 10 vuelos en Arequipa debido al mal tiempo [2].

Investigaciones peruanas revelan que, durante la estación invernal, la baja visibilidad y los techos nubosos reducidos impactan negativamente las operaciones aéreas. Estos fenómenos generan las mayores incidencias de condiciones

por debajo de los mínimos entre las 6 y 8 de la mañana, lo que provoca cancelaciones o retrasos en los vuelos bajo Reglas de Vuelo Visual (VFR). Además, complica las maniobras conforme a Reglas de Vuelo por Instrumentos (IFR), afectando así la continuidad del servicio aéreo [3].

Ante las cancelaciones de vuelos ocasionadas por condiciones meteorológicas adversas, los pasajeros conservan sus derechos como consumidores, y las aerolíneas tienen la obligación de proporcionar información clara y oportuna, ofrecer la reprogramación del vuelo en las condiciones pactadas o la devolución del monto pagado, y mantener operativos sus canales de atención, aun cuando dichas circunstancias sean ajenas a su control, bajo la supervisión de la autoridad competente [4] como lo pueden ser causas de fuerza mayor.

A nivel internacional, estudios desarrollados en países como México y España han demostrado que las condiciones climáticas adversas impactan de forma significativa en la demanda y las operaciones aéreas, generando retrasos, cancelaciones, mayores costos operativos y un incremento del riesgo de incidentes. Estas investigaciones han empleado métodos estadísticos, como modelos de regresión y análisis de series temporales, para identificar relaciones entre variables meteorológicas y desempeño operativo, así como para analizar la responsabilidad legal de las aerolíneas frente a los pasajeros ante dichas disrupciones, particularmente en materia de información, reprogramación y compensación conforme a la normativa vigente [5].

No obstante, permanece una brecha de investigación en el análisis de las cancelaciones preventivas, especialmente en la evaluación de la discrepancia temporal entre el pronóstico aeronáutico (TAF) y las condiciones meteorológicas observadas (METAR), y su influencia en la toma de decisiones operacionales.

En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo evaluar en qué medida la discrepancia entre el pronóstico aeronáutico (TAF) y la observación meteorológica (METAR) se asocia con cancelaciones preventivas, operacionalizadas mediante un proxy basado en operaciones comerciales y severidad meteorológica observada (METAR).

Asimismo, se busca reconocer patrones en el tiempo (por meses) y situaciones operativas en las que se observan posibles cancelaciones preventivas medidas con un proxy basado en caídas anómalas de operaciones, sin que el clima observado (METAR) muestre condiciones adversas.

Y como objetivos específicos, se definieron:

- Construir y validar un proxy mensual de cancelación preventiva por aeropuerto - mes utilizando (a) caída anómala de operaciones comerciales y (b) clima adverso observado (METAR).
- Estimar el desempeño de un modelo base (METAR) para explicar el proxy con efectos por aeropuerto y validación temporal.
- Evaluar si la discrepancia TAF-METAR incrementa el desempeño predictivo frente al modelo base y determinar qué componentes aportan señal robusta.
- Realizar análisis de sensibilidad del aporte de discrepancias bajo imputación y bajo restricción a registros con discrepancias completas.
- Identificar aeropuertos peruanos con mayor frecuencia de caídas anómalas de operaciones en condiciones meteorológicas favorables (sin clima adverso METAR).

II. TRABAJOS RELACIONADOS

La verificación y comparación de pronósticos aeronáuticos se ha abordado mediante procedimientos de evaluación de TAF utilizando observaciones METAR/SPECI, apoyándose en estándares de codificación y consistencia operacional (por ejemplo, ICAO Annex 3 y el manual de códigos WMO-No. 306) [6], [7]. Estudios como Novotný et al. [8] y Boucouvala [9] presentan procedimientos de verificación TAF con METAR, enfatizando retos de cobertura y definición de criterios de comparación.

Desde la perspectiva operacional, trabajos previos relacionan meteorología con interrupciones en aviación. Peck y Hedding [10] propusieron un índice de impacto meteorológico para caracterizar degradación operacional en aeropuertos, mientras que Ohi y Chen [11] modelaron interrupciones, incluyendo cancelaciones, como conteos explicados por clima y otros factores. En aprendizaje automático, Kan et al. [12] evaluaron enfoques escalables para predicción de cancelaciones.

Este estudio es representativo pese a su antigüedad porque definió de manera clara y repetible la cancelación preventiva, utilizando un proxy mensual (en lugar de depender de registros por vuelo, que no siempre están disponibles). Con ese proxy, el estudio incorporó la discrepancia entre el pronóstico TAF y la observación METAR, y la evaluó con validación temporal, es decir, entrenó con años anteriores y probó con años posteriores, para que el resultado se pareciera más a un escenario real. Utilizaron métricas como AUC (Área

Bajo la Curva ROC) y F1 (F1 Score), cuya utilidad en este tipo de casos se sustenta en la relación entre las curvas ROC y Precision-Recall descrita por Davis y Goadrich [13].

III. METODOLOGÍA

A. Enfoque y tipo de la investigación

El presente estudio tuvo un enfoque cuantitativo, con un diseño no experimental y longitudinal, basado en el análisis de series temporales históricas de información meteorológica aeronáutica (TAF y METAR) y registros agregados de operaciones comerciales.

El alcance de la investigación fue explicativo - predictivo, ya que evalúa la asociación entre la discrepancia TAF-METAR y la ocurrencia de eventos compatibles con cancelación preventiva y porque desarrolla modelos con validación temporal para estimar el aporte incremental de incorporar discrepancias TAF-METAR frente a un modelo base con METAR.

El análisis longitudinal permitió capturar patrones recurrentes (estacionalidad mensual) y variaciones interanuales, así como identificar escenarios operacionales donde se observan caídas anómalas de operaciones sin evidencia de clima adverso observado.

B. Ámbito de estudio y unidades de análisis

El ámbito de estudio comprende los diez aeropuertos peruanos con mayor flujo aéreo (PE10), seleccionados por su relevancia operativa y su representatividad geográfica y climática:

- **SPJC:** Aeropuerto Internacional Jorge Chávez (Lima)
- **SPQU:** Aeropuerto Internacional Rodríguez Ballón (Arequipa)
- **SPZO:** Aeropuerto Internacional Alejandro Velasco Astete (Cusco)
- **SPRU:** Aeropuerto Internacional Capitán FAP Carlos Martínez de Pinillos (Trujillo)
- **SPUR:** Aeropuerto Internacional Capitán FAP Guillermo Concha Iberico (Piura)
- **SPQT:** Aeropuerto Internacional Coronel FAP Francisco Secada Vignetta (Iquitos)
- **SPCL:** Aeropuerto Internacional Capitán FAP David Abenzur Rengifo (Pucallpa)
- **SPJL:** Aeropuerto Internacional Inca Manco Cápac (Juliaca)
- **SPHI:** Aeropuerto Internacional Capitán FAP José Abelardo Quiñones Gonzales (Chiclayo)
- **SPST:** Aeropuerto Cadete FAP Guillermo del Castillo Paredes (Tarapoto)

La unidad de análisis principal es el registro aeropuerto-mes para el periodo 2015-2025. Cada unidad integra:

- el total mensual de operaciones comerciales por aeropuerto,
- indicadores mensuales de severidad meteorológica observada (METAR), y
- medidas de discrepancia TAF-METAR agregadas a nivel mensual (cuando aplica).

De manera complementaria, se emplearon indicadores mensuales derivados (como caída anómala de operaciones y clima adverso observado) para construir el proxy de cancelación preventiva y para identificar escenarios operacionales con disminuciones de operaciones que no se acompañan de severidad climática observada.

C. Fuentes de datos y periodos de análisis

Se emplearon dos fuentes principales:

- Operaciones comerciales por aeropuerto y mes (2015-2025), provenientes de reportes oficiales de Movimiento General Aeroportuario Nacional (CORPAC) [14][15][16][17][18][19][20][21][22][23][24].
- Datos meteorológicos aeronáuticos descargados desde OGIMET [25], incluyendo:
 - METAR (observaciones),
 - TAF (pronósticos),
 para los aeropuertos PE10 en el periodo 2015-2025.

Los datos se estandarizaron por código ICAO (Organización de Aviación Civil Internacional) [6], se limpiaron y se consolidaron en un panel aeropuerto-mes, garantizando comparabilidad entre aeropuertos mediante normalización de granularidad (una fila por aeropuerto-mes).

Se emplearon datos meteorológicos aeronáuticos históricos obtenidos de repositorios especializados de acceso abierto, incluyendo pronósticos TAF y observaciones METAR, correspondientes al periodo 2015 - 2025 [25]. La información fue complementada con datos operacionales que permitieron identificar eventos de cancelación preventiva.

D. Variables del estudio

Variable dependiente: proxy de cancelación preventiva.

Considerada como variable dicotómica. Muestra la presencia de un evento compatible con *cancelación preventiva* a nivel aeropuerto-mes, definida como:

$y_{\text{proxy_cancel_prev}} = 1 \text{ si } (\text{ops_drop} = 1) \ \&\& \ (\text{wx_bad} = 1)$

donde *ops_drop* representa una caída anómala de operaciones y *wx_bad* representa severidad meteorológica observada.

Variables independientes principales: Discrepancia TAF-METAR.

Se cuantificó la discrepancia mediante variables basadas en diferencias absolutas agregadas mensualizadas, priorizando componentes operativamente críticos y comparables:

$|\Delta \text{FG}|$: discrepancia asociada a presencia/intensidad relativa de **niebla (FG)**

$|\Delta \text{TS}|$: discrepancia asociada a presencia/intensidad relativa de **t tormenta (TS)**

$|\Delta \text{vis_min}|$: diferencia absoluta en visibilidad mínima (cuando disponible y comparable)

$|\Delta \text{wind_max}|$: diferencia absoluta en viento máximo (cuando disponible y comparable).

Adicionalmente se controló cobertura TAF:

- *Cobertura any*: existe al menos una discrepancia disponible,
- *Cobertura full*: están disponibles simultáneamente todas las discrepancias definidas.

Variables de control:

- Aeropuerto,
- Mes y/o estacionalidad implícita en la construcción de *ops_drop*,
- Variables meteorológicas base METAR agregadas: *wx_fg_rate*, *wx_ts_rate*, *vis_min*, *wind_max*, *ceiling_min*, proporciones IFR/LIFR (si aplica).

E. Construcción del Índice de Discrepancia TAF - METAR

i) Caída anómala de operaciones (*ops_drop*)

Se controló estacionalidad mensual mediante un z-score estacional por aeropuerto, calculado como:

$\text{ops_mu} = \text{mean}(\text{ops_comercial}) \text{ por } (\text{aeropuerto_mes})$
 $\text{ops_sd} = \text{sdt}(\text{ops_comercial}) \text{ por } (\text{aeropuerto_mes})$
 $\text{ops_z} = (\text{ops_comercial} - \text{ops_mu}) / \text{ops_sd}$

y se definió:

$\text{ops_drop} = 1 \text{ si } \text{ops_z} \leq -1.5$

ii) Clima adverso observado (*wx_bad*)

Se definieron umbrales globales y reproducibles mediante percentiles:

- $fg_q = P75(wx_fg_rate)$
- $ts_q = P75(wx_ts_rate)$
- $vis_q = P25(vis_min)$
- $wnd_q = P75(wind_max)$
- $ceil_q = P25(ceiling_min)$

y se estableció:

$wx_bad = 1$

si $(wx_fg_rate \geq fg_q) \vee (wx_ts_rate \geq ts_q) \vee (vis_min \leq vis_q) \vee (wind_max \geq wnd_q) \vee (ceiling_min \leq ceil_q)$

iii) Proxy final (y_proxy_cancel_prev)

$y_proxy_cancel_prev = 1$ si $(ops_drop=1) \&\& (wx_bad=1)$

iv) Discrepancia TAF-METAR

Se estimaron discrepancias como diferencias absolutas y se evaluó su efecto incremental en modelos, comparando:

- **M0**: sólo variables METAR,
- **M1 / M1b**: METAR + discrepancias (en particular FG/TS como set robusto).

F. Formulación de hipótesis y estrategia de contraste

En línea con los objetivos del estudio, se plantearon hipótesis orientadas a:

- **H1 (principal)**: La discrepancia TAF-METAR se asocia con la ocurrencia del proxy de cancelación preventiva y aporta mejora predictiva frente a un modelo basado solo en METAR.
- **H1a**: Discrepancias en fenómenos críticos (FG/TS) aportan señal robusta.
- **H1b**: Discrepancias en visibilidad/viento aportan señal, sujeta a cobertura y calidad de extracción.
- **H2**: Existen patrones temporales/estacionales en la ocurrencia del proxy y/o las discrepancias.
- **H3**: Existen aeropuertos con caídas anómalas de operaciones sin clima adverso observado (escenarios no atribuibles a METAR adverso).

La estrategia de contraste se basó en:

- Comparación de desempeño fuera de muestra (AUC, F1, precisión, recall) con validación temporal,
- Análisis de sensibilidad restringiendo a registros con discrepancias completas (cobertura full) vs cobertura parcial.

G. Modelos de análisis y técnicas de inteligencia artificial

Se empleó regresión logística (con estandarización numérica y codificación one-hot para variables categóricas como aeropuerto), comparando modelos:

- M0: METAR (base),
- M1 / M1b: METAR + discrepancias TAF-METAR (con foco en FG/TS).

Dado el desbalance del proxy, se consideró ponderación de clases y se interpretó el recall como capacidad de detección de meses con evento proxy.

Se deja planteada como extensión el uso de modelos secuenciales, como LSTM, si se dispone de series con granularidad más fina (diaria u horaria) y etiquetas más cercanas al evento real. En la presente investigación, el núcleo de resultados se concentra en el panel mensual.

H. Procedimiento de análisis

El procedimiento metodológico se desarrolló siguiendo las siguientes etapas:

- i) Recolección de operaciones comerciales (CORPAC) y meteorología aeronáutica (OGIMET: METAR/TAF).
- ii) Limpieza y estandarización de códigos ICAO y formatos.
- iii) Construcción del panel aeropuerto-mes (2015-2025) y control de calidad.
- iv) Cálculo de ops_drop (z-score estacional por aeropuerto) y wx_bad (percentiles globales).
- v) Construcción del proxy y_proxy_cancel_prev.
- vi) Construcción de discrepancias TAF-METAR y medición de cobertura any/full.
- vii) Modelado y validación temporal (train ≤ 2022 ; test ≥ 2023): M0 vs M1/M1b.
- viii) Sensibilidad: evaluación en subset con discrepancias completas.
- ix) Análisis complementario: ranking por aeropuerto de caídas sin clima adverso (drop_not_wx) para escenarios operacionales no respaldados por METAR adverso.

I. Herramientas utilizadas para el procesamiento

El procesamiento y análisis se implementaron en Google Colab utilizando Python.

Se emplearon librerías estándar para análisis de datos y modelado: pandas y NumPy para manipulación de datos, scikit-learn para entrenamiento y evaluación de modelos (regresión logística, escalamiento y codificación), y matplotlib para visualización.

Para favorecer la reproducibilidad, el flujo se organizó en un notebook con pasos secuenciales de extracción, transformación, construcción del proxy ($\text{ops_drop} \wedge \text{wx_bad}$) y validación temporal ($\text{train} \leq 2022$; $\text{test} \geq 2023$).

J. Consideraciones éticas

El estudio utiliza datos abiertos de carácter meteorológico y datos agregados de operaciones, sin información personal identificable. Los resultados se reportan a nivel aeropuerto-mes, evitando cualquier identificación individual. El propósito es académico y orientado a la mejora de comprensión técnica de decisiones operativas frente a incertidumbre meteorológica.

IV. RESULTADOS

Primero se resume el tamaño del dataset, la unidad de análisis aeropuerto - mes y la partición temporal utilizada en el entrenamiento y prueba.

Es así como, el panel final integró 10 aeropuertos (PE10) con 132 meses por aeropuerto (2015-2025), obteniendo 1320 registros aeropuerto-mes tras la agregación y control de duplicados. Con una cobertura de discrepancias: $\text{any}=1.000$; $\text{full}=0.933$.

La cobertura de discrepancias indica qué tan completos fueron los datos para comparar TAF (pronóstico) vs METAR (observación) en cada registro aeropuerto - mes. En este estudio, $\text{any} = 1.000$ significa que en el 100% de los meses se pudo calcular al menos una discrepancia (por ejemplo, en fenómenos como niebla o tormenta). En cambio, $\text{full} = 0.933$ significa que solo en el 93.3% de los meses fue posible calcular todas las discrepancias definidas de forma simultánea; en el 6.7% restante faltó al menos una variable (principalmente visibilidad o viento), porque no fue reportada en algunos TAF.

La etiqueta proxy de cancelación preventiva se definió como $\text{y_proxy_cancel_prev} = (\text{ops_drop}=1) \wedge (\text{wx_bad}=1)$, donde:

- ops_drop se calcula por z-score estacional ($\text{airport} \times \text{month}$) y
- wx_bad por umbrales percentilares globales.

A. Cobertura de discrepancias TAF-METAR

La cobertura TAF fue completa para al menos una discrepancia (cobertura $\text{any} = 1.000$).

Sin embargo, la cobertura simultánea de todas las discrepancias (cobertura full) fue 0.933, debido a valores faltantes en discrepancias continuas (visibilidad y viento).

En particular, se observaron valores faltantes en $|\Delta \text{vis_min}|$ ($n=148$) y $|\Delta \text{wind_max}|$ ($n=123$), mientras que $|\Delta \text{FG}|$ y $|\Delta \text{TS}|$ no presentaron faltantes.

B. Aporte predictivo de la discrepancia TAF-METAR

Se comparó un modelo base M0 (sólo variables METAR) frente a un modelo extendido que incorpora discrepancias.

El mejor desempeño se obtuvo con el conjunto robusto de discrepancias en fenómenos ($|\Delta \text{FG}|$, $|\Delta \text{TS}|$), denominado M1b.

En el conjunto de prueba temporal (≥ 2023), M1b incrementó el AUC y el F1 respecto a M0, manteniendo el mismo recall (alto) y aumentando moderadamente la precisión, tal como se observa en la Tabla I y Fig. 1.

TABLA I.
DESEMPEÑO DE MODELOS (VALIDACIÓN TEMPORAL: TRAIN ≤ 2022 ; TEST ≥ 2023)

Modelo	AUC	F1	Precisión	Recall	n_train	n_test
M0 (METAR)	0.650	0.068	0.036	0.867	1517	602
M1b (METAR + $ \Delta \text{FG} $ + $ \Delta \text{TS} $)	0.673	0.080	0.042	0.867	1517	602

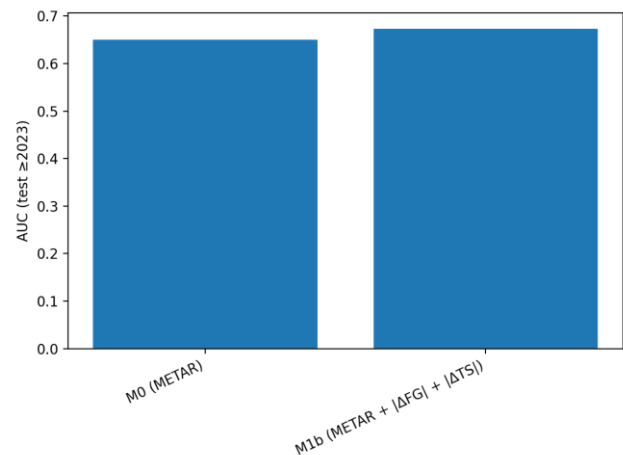


Fig. 1 Comparación de AUC entre M0 y M1b (test ≥ 2023)

C. Análisis de sensibilidad (subset full)

Como verificación, se evaluó el desempeño restringiendo la muestra a filas con discrepancias completas (subset full).

En este subset, el modelo extendido con todas las discrepancias (incluyendo variables continuas) degradó el desempeño (AUC y recall), lo que sugiere que las discrepancias continuas ($|\Delta \text{vis_min}|$, $|\Delta \text{wind_max}|$) introducen ruido o inestabilidad cuando se exige completitud y se reduce

el tamaño efectivo de muestra, tal como se muestra en la Tabla II.

Este resultado respalda reportar M1b (FG/TS) como configuración principal por robustez (Ver Tabla II).

TABLA II.
SENSIBILIDAD EN SUBSET FULL (SÓLO FILAS CON
DISCREPANCIAS COMPLETAS)

Modelo	AUC	F1	Precisión	Recall	n_train	n_test
M0_full (METAR) - subset full	0.648	0.076	0.040	0.867	1469	588
M1_full (METAR + discrepancias completas) - subset full	0.530	0.052	0.028	0.467	1469	588

D. Ranking de escenarios operacionales no respaldados por METAR adverso (OE5/PI4)

Se calculó por aeropuerto la tasa de meses con caída anómala de operaciones sin clima adverso observado (drop_not_wx).

Este indicador identifica escenarios operacionales donde la disminución de operaciones no coincide con severidad METAR, sirviendo como señal para priorizar auditoría / explicación operacional.

Los aeropuertos con mayor tasa de drop_not wx fueron SPUR (9.85%) y SPJL (8.33%), mientras que SPJC, SPQT y SPRU no registraron drop_not_wx en el panel mensual, tal como se observa en la Tabla III (ver Tabla III y Fig. 2).

TABLA III.
RANKING POR AEROPUERTO DE ESCENARIOS OPERACIONALES
(2015–2025)

Aeropuerto (ICAO)	n_months	n_drop_not_wx	rate_drop_not_wx	n_proxy	rate_proxy
SPUR	132	13	0.098485	0	0.000000
SPJL	132	11	0.083333	2	0.015152
SPQU	132	8	0.060606	5	0.037879
SPZO	132	4	0.030303	9	0.068182
SPHI	132	3	0.022727	4	0.030303
SPST	132	3	0.022727	10	0.075758
SPCL	132	2	0.015152	9	0.068182
SPJC	132	0	0.000000	12	0.090909
SPQT	132	0	0.000000	9	0.068182
SPRU	132	0	0.000000	9	0.068182

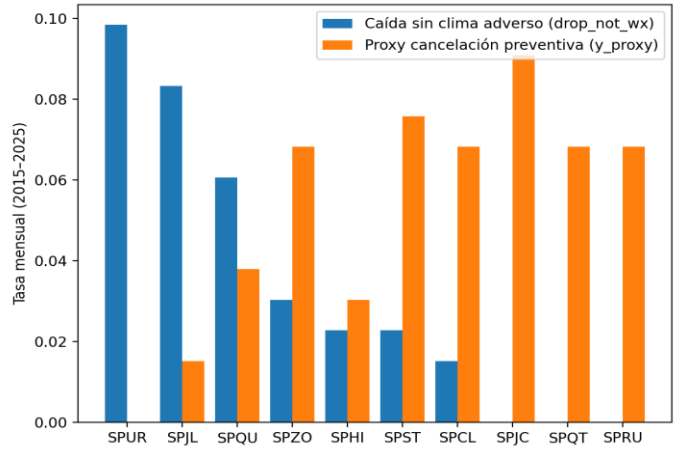


Fig. 2 Tasas mensuales por aeropuerto: caída sin clima adverso vs proxy de cancelación preventiva

V. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos confirman empíricamente lo reportado en estudios y reportes nacionales recientes sobre el impacto del clima adverso en la operación aérea peruana. Los eventos documentados en Arequipa durante febrero de 2025 y enero de 2026 [1], [2] evidencian que las cancelaciones y retrasos pueden extenderse por varios días consecutivos, afectando de manera significativa la continuidad del servicio aéreo. Sin embargo, dichos reportes periodísticos describen el fenómeno desde una perspectiva descriptiva y coyuntural, sin incorporar un análisis cuantitativo que permita evaluar la razonabilidad técnica de cada cancelación preventiva.

En estudios previos se ha comparado el pronóstico TAF con lo observado en METAR/SPECI para evaluar qué tan bien anticipa condiciones reales. Estos trabajos señalaron que la comparación depende mucho de la regla de evaluación y de la cobertura de datos disponibles. Los resultados de la presente investigación fueron consistentes con esa idea y ayudan a explicar por qué algunas discrepancias son más estables que otras a lo largo del tiempo [2], [3], [7], [8].

Desde el punto de vista operativo, otros autores también han mostrado que el clima puede afectar la operación del aeropuerto, pero que no todo se explica solo por meteorología: también influyen restricciones operativas y factores de demanda. Por eso, es posible que en algunos aeropuertos aparezcan caídas de operación sin clima adverso observado. Además, como el evento es poco frecuente, es prudente utilizar métricas como AUC y F1 para evaluar el modelo [1], [4], [5], [6].

En contraste, los resultados muestran que la discrepancia TAF-METAR aporta señal incremental, pero su utilidad depende de la estabilidad de las variables disponibles. En la comparación principal, el modelo con discrepancias en fenómenos (M1b: $|\Delta FG|$ y $|\Delta TS|$) mejoró el AUC (0.673 vs

0.650) y el F1 (0.080 vs 0.068) frente al modelo base METAR, manteniendo un recall alto (Tabla II; Fig. 1). Esto sugiere que discrepancias asociadas a fenómenos operativamente críticos (niebla/tormenta) capturan parte de la incertidumbre del pronóstico que se traduce en decisiones operativas cautelosas [26] (ver Tabla I y Fig. 1).

No obstante, el análisis de sensibilidad con discrepancias completas (subset full) evidenció degradación del desempeño cuando se incorporan discrepancias continuas ($|\Delta\text{vis}_{\text{min}}|$ y $|\Delta\text{wind}_{\text{max}}|$). Esta caída (AUC 0.530; recall 0.467) indica que dichas variables pueden introducir ruido por diferencias claras en extracción/normalización o por reducción de la muestra efectiva al exigir completitud. En la práctica, se recomienda reportar el conjunto robusto FG/TS como principal, y tratar visibilidad/viento como análisis exploratorio o con tratamiento adicional de imputación/armonización. (ver Tabla II).

El ranking operacional aporta una lectura complementaria: aeropuertos como SPUR y SPJL concentran la mayor tasa de caídas anómalas sin clima adverso observado, lo que sugiere que parte de la reducción de operaciones podría estar mediada por factores no meteorológicos (capacidad, demanda, restricciones ATC, infraestructura, etc.) o por una severidad meteorológica no capturada por los reportes mensuales. Este hallazgo no prueba causalidad, pero sí orienta la priorización de investigación con datos a nivel vuelo y/o variables operacionales adicionales, a diferencia de lo reportado por Domínguez y Boeta [5] quienes concluyeron que las condiciones climáticas adversas en México y España generaron impactos significativos en la operación aérea, incrementando costos, retrasos y cancelaciones, y plantean la necesidad de mecanismos de gestión del riesgo climático. Si bien dichos autores emplean modelos estadísticos y análisis de series temporales, su enfoque se orienta principalmente a la gestión financiera y contractual del riesgo, más que a la evaluación ex post de decisiones operativas específicas (ver Tabla 3; Fig. 2).

Finalmente, se observa que el proxy mensual permite estudiar 2015-2025 con cobertura amplia, pero impone una limitación de granularidad: meses con eventos puntuales intensos pueden diluirse, y caídas de operaciones pueden reflejar cambios de programación además de cancelaciones. A pesar de ello, el enfoque es útil para evaluar consistencia temporal y comparar aeropuertos bajo un marco reproducible, además de generar hipótesis para una fase posterior con datos de cancelación por vuelo.

Este enfoque no ha sido abordado de manera explícita en los estudios nacionales ni internacionales citados, lo que refuerza el carácter original y complementario del presente trabajo.

Desde el punto de vista normativo, el marco de actuación del INDECOP establece que, aun cuando las cancelaciones obedezcan a causas ajenas al proveedor, las aerolíneas mantienen obligaciones de información, reprogramación y atención al consumidor [4]. No obstante, la evaluación de la razonabilidad técnica de una cancelación preventiva suele aparecer difuso al carecer de herramientas cuantitativas objetivas.

En este contexto, el Índice de Discrepancia TAF -METAR y los modelos temporales propuestos no sustituyen la evaluación administrativa, pero sí aportan evidencia técnica verificable que puede complementar el análisis de idoneidad del servicio. En particular, permiten distinguir entre cancelaciones sustentadas en condiciones meteorológicas efectivamente adversas y aquellas basadas en pronósticos que no se materializan, lo cual resulta relevante en la ponderación de responsabilidades frente al consumidor.

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El presente estudio evaluó la relación entre las cancelaciones preventivas de vuelos y la discrepancia entre el pronóstico aeronáutico (TAF) y la observación meteorológica real (METAR), mediante el uso de modelos estadísticos y temporales, aplicados a los diez aeropuertos con mayor flujo aéreo del Perú.

En el periodo 2015–2025 y para el Top 10 aeropuertos peruanos del estudio, las discrepancias entre el pronóstico aeronáutico TAF (Terminal Aerodrome Forecast) y la observación METAR (Meteorological Aerodrome Report) en fenómenos relevantes - FG (fog/niebla) y TS (thunderstorm/tormenta) aportaron señal incremental para modelar el proxy de cancelación preventiva. En validación temporal (train ≤ 2022 ; prueba test ≥ 2023), el modelo conformado por METAR y discrepancias FG/TS superó al modelo base M0 (solo METAR) en Área Bajo la Curva ROC (0.673 vs 0.650) y en media armónica entre precisión y recall (0.080 vs 0.068).

La disponibilidad de discrepancias fue total cuando se consideró “al menos una discrepancia” (cobertura any = 1.000), pero disminuyó al exigir “todas las discrepancias simultáneas” (cobertura full = 0.933) debido a faltantes en discrepancias continuas (principalmente visibilidad y viento). En el análisis de sensibilidad restringido al subset full (solo filas con discrepancias completas), el modelo que incorpora todas las discrepancias mostró degradación de desempeño, lo que respalda reportar como resultado principal el conjunto más estable basado en FG/TS.

El análisis por aeropuerto evidenció diferencias claras operacionales. En particular, SPUR (Puerto Maldonado) y SPJL

(Juliaca) presentaron las mayores tasas de caídas anómalas de operaciones sin clima adverso observado (9.85% y 8.33%, respectivamente). En contraste, SPJC (Lima/Jorge Chávez), SPQT (Talara) y SPRU (Trujillo) no registraron este patrón en el panel mensual. Estos resultados sugieren que, en ciertos aeropuertos, parte de las disminuciones de operaciones podría estar asociada a factores no meteorológicos o a severidad no capturada por la agregación mensual. (ver Tabla III y Fig. 2).

La cancelación preventiva se operacionalizó mediante un proxy mensual reproducible definido como la intersección entre ops_drop (caída anómala de operaciones comerciales, detectada por z-score estacional) y wx_bad (clima adverso observado en METAR, definido por umbrales percentilares). Este proxy permitió estudiar 2015-2025 con cobertura amplia; sin embargo, sus resultados deben interpretarse como eventos compatibles con cancelación preventiva, y no como cancelaciones confirmadas a nivel de vuelo.

A nivel de recomendaciones, se puede mencionar que para fortalecer la validez externa y aproximarse más a la cancelación real, se recomienda incorporar en una fase posterior registros a nivel de vuelo (idealmente con motivo), provenientes de fuentes oficiales o comerciales, para calibrar y validar el proxy mensual basado en operaciones.

En la construcción de discrepancias TAF-METAR, se recomienda priorizar variables robustas y consistentes (por ejemplo, FG (niebla) y TS (tormenta)). Para discrepancias continuas (visibilidad y viento), se sugiere aplicar un tratamiento adicional: armonización de unidades, reglas de limpieza y/o imputación (relleno estadístico), reportando siempre análisis de sensibilidad para evidenciar estabilidad de resultados.

Desde el punto de vista científico, este trabajo aporta un enfoque metodológico novedoso al análisis de cancelaciones preventivas, al introducir un Índice de Discrepancia TAF - METAR cuantificable y su integración con modelos temporales de inteligencia artificial a futuro. A diferencia de estudios previos centrados únicamente en la severidad climática o en impactos operativos generales, el presente estudio aborda explícitamente la brecha entre pronóstico y observación, elemento clave en la toma de decisiones preventivas.

En el plano aplicado, los resultados proporcionan un marco técnico objetivo que puede complementar la evaluación de la razonabilidad de las cancelaciones preventivas, particularmente en contextos de alta incertidumbre meteorológica. En este sentido, el enfoque propuesto puede resultar útil tanto para operadores aéreos, en la mejora de sus procesos de decisión, como para entidades supervisoras y de protección al consumidor, como el INDECOPI, al aportar

evidencia empírica verificable para el análisis de controversias relacionadas con la idoneidad del servicio.

Así se tiene que, en los supuestos de cancelación o reprogramación de vuelos por condiciones meteorológicas adversas, el rol de INDECOPI se orienta a evaluar la razonabilidad y proporcionalidad de las decisiones preventivas desde la mirada de la protección al consumidor, sin sustituir el juicio técnico del operador aéreo ni interferir en la seguridad operacional. En este marco, el análisis objetivo de la discrepancia entre el pronóstico aeronáutico (TAF) y la observación meteorológica real (METAR), mediante indicadores verificables, no vinculante, constituye un insumo técnico complementario que fortalece la motivación administrativa, reduce la asimetría informativa y refuerza el control del deber de idoneidad del servicio.

Para aeropuertos con alta tasa de caídas sin clima adverso observado (por ejemplo, SPUR y SPJL), se recomienda integrar variables operacionales adicionales como capacidad aeroportuaria, NOTAM (Notice to Airmen/Avisos a los aviadores), restricciones de ATC (Air Traffic Control/Control de Tránsito Aéreo) y señales de demanda, con el fin de diferenciar mejores causas meteorológicas versus no meteorológicas.

A pesar de los aportes presentados, la presente investigación identificó algunas limitaciones que deben ser consideradas al interpretar los resultados. En primer lugar, el análisis se basa en datos meteorológicos y operacionales históricos no uniformizados, por lo que no incorpora información interna de las aerolíneas relativa a criterios específicos de decisión, políticas de seguridad o restricciones logísticas que también podrían influir en la cancelación de vuelos.

En segundo lugar, si bien el Índice de Discrepancia sintetiza múltiples variables meteorológicas, su construcción implica un proceso de normalización y ponderación que podría ajustarse según el tipo de operación aérea o las características particulares de cada aeropuerto. Asimismo, los modelos temporales empleados, aunque robustos, dependen de la calidad y continuidad de los datos disponibles.

Finalmente, el estudio se circunscribe al contexto peruano, por lo que la generalización de los resultados a otros países debe realizarse considerando diferencias regulatorias, climáticas y operativas.

AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

Agradecimiento a funcionaria de la Oficina Lima Norte de Indecopi por proporcionarnos resoluciones informativas, punto de partida para el inicio de la presente investigación.

REFERENCIAS

- [1] Redacción EC, «Arequipa: reportan por quinto día consecutivo retraso en vuelos por mal clima», *El Comercio*, Lima, 12 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://elcomercio.pe/peru/arequipa/arequipa-reportan-por-quinto-dia-consecutivo-retraso-en-vuelos-por-mal-clima-aeropuerto-rodriguez-ballon-ultimas-noticia/>
- [2] Redacción EC, «Al menos diez vuelos son cancelados por mal tiempo en el aeropuerto de Arequipa», *El Comercio*, Lima, 14 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://elcomercio.pe/peru/arequipa/arequipa-al-menos-diez-vuelos-son-cancelados-por-mal-tiempo-en-el-aeropuerto-alfredo-rodriguez-ballon-senamhi-lluvias-ultimas-noticia/>
- [3] K. C. G. Cueva y R. E. C. Corzo, «“Estudio de la visibilidad y techo de nubes bajas en las operaciones aéreas durante la estación de invierno en el aeródromo las palmas, año 2023”: “estudio de la visibilidad y techo de nubes bajas en las operaciones aéreas durante la estación de invierno en el aeródromo Las Palmas, Año 2023”», *AD Majorem Patriae Gloriam*, vol. 8, n.º 8, pp. 149-162, 2024, doi: 10.61556/ampg.v5i06.85.
- [4] «Indecopi recuerda que pasajeros mantienen derechos ante cancelación de vuelos por mal tiempo». [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/indecopi/noticias/1333536-indecopi-recuerda-que-pasajeros-mantienen-derechos-ante-cancelacion-de-vuelos-por-mal-tiempo>
- [5] I. L. Domínguez y R. V. Boeta, «Gestión del riesgo climático mediante derivados. Aplicación al sector de líneas aéreas en México y España», *Contab. Negocios*, vol. 17, n.º 34, pp. 184-210, nov. 2022, doi: 10.18800/contabilidad.202202.008.
- [6] «International Civil Aviation Organization». [En línea]. Disponible en: <https://www.icao.int/>
- [7] World Meteorological Organization (WMO), «Guide to Services for Aviation Meteorology (WMO-No. 732)». Geneva, 2023. [En línea]. Disponible en: https://amc.name.gov.mn/wp-content/uploads/WMO/10.%20732_2023-edition_en.pdf
- [8] J. Novotny, K. Dejmál, V. Repal, M. Gera, y D. Sladek, «Assessment of TAF, METAR, and SPECI Reports Based on ICAO ANNEX 3 Regulation», *Atmosphere*, vol. 12, n.º 2, p. 138, feb. 2021, doi: 10.3390/atmos12020138.
- [9] D. Boucouvala y D. McCooley, *A Verification Procedure for Terminal Aerodrome Forecasts*. 2025. doi: 10.3390/eesp2025035030.
- [10] L. Peck y D. W. Hedding, «Developing a Weather Impact Index for O. R. Tambo International Airport, South Africa», ago. 2017, doi: 10.1175/WAF-D-17-0007.1.
- [11] S. J. Ohi y A. M. Kim, «Count Models to Represent the Impacts of Weather and Infrastructure on Flight Disruptions», *Transp. Res. Rec.*, vol. 2674, n.º 5, pp. 510-521, may 2020, doi: 10.1177/0361198120916731.
- [12] H. Y. Kan, K. Chau, y P. Cheong-iao Pang, «Scalable flight cancellation prediction with ensemble distributed KNN and feature selection», *Sci. Rep.*, vol. 15, n.º 1, p. 34936, oct. 2025, doi: 10.1038/s41598-025-18716-1.
- [13] J. Davis y M. Goadrich, «The relationship between Precision-Recall and ROC curves», en *Proceedings of the 23rd international conference on Machine learning - ICML '06*, Pittsburgh, Pennsylvania: ACM Press, 2006, pp. 233-240. doi: 10.1145/1143844.1143874.
- [14] Corporación Peruana de Aeropuertos y Aviación Comercial S.A., «Movimiento General Aeroportuario Nacional 2015». [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/corpac/informes-publicaciones/4954670-movimiento-general-aeroportuario-nacional-2015>
- [15] Corporación Peruana de Aeropuertos y Aviación Comercial S.A., «Movimiento General Aeroportuario Nacional 2016». [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/corpac/informes-publicaciones/4954670-movimiento-general-aeroportuario-nacional-2016>
- [16] Corporación Peruana de Aeropuertos y Aviación Comercial S.A., «Movimiento General Aeroportuario Nacional 2017». [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/corpac/informes-publicaciones/4954670-movimiento-general-aeroportuario-nacional-2017>
- [17] Corporación Peruana de Aeropuertos y Aviación Comercial S.A., «Movimiento General Aeroportuario Nacional 2018». [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/corpac/informes-publicaciones/3685355-movimiento-general-aeroportuario-nacional-2018>
- [18] Corporación Peruana de Aeropuertos y Aviación Comercial S.A., «Movimiento General Aeroportuario Nacional 2019». [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/corpac/informes-publicaciones/4954670-movimiento-general-aeroportuario-nacional-2019>
- [19] Corporación Peruana de Aeropuertos y Aviación Comercial S.A., «Movimiento General Aeroportuario Nacional 2020». [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/corpac/informes-publicaciones/4954670-movimiento-general-aeroportuario-nacional-2020>
- [20] Corporación Peruana de Aeropuertos y Aviación Comercial S.A., «Movimiento General Aeroportuario Nacional 2021». [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/corpac/informes-publicaciones/4954670-movimiento-general-aeroportuario-nacional-2021>
- [21] Corporación Peruana de Aeropuertos y Aviación Comercial S.A., «Movimiento General Aeroportuario Nacional 2022». [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/corpac/informes-publicaciones/4954670-movimiento-general-aeroportuario-nacional-2022>
- [22] Corporación Peruana de Aeropuertos y Aviación Comercial S.A., «Movimiento General Aeroportuario Nacional 2023». [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/corpac/informes-publicaciones/4954670-movimiento-general-aeroportuario-nacional-2023>
- [23] Corporación Peruana de Aeropuertos y Aviación Comercial S.A., «Movimiento General Aeroportuario Nacional 2024». [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/corpac/informes-publicaciones/5377428-movimiento-general-aeroportuario-nacional-2024>
- [24] Datos Abiertos Perú, «Información Tráfico por Operación - CORPAC: Ene 2019 - Set 2025 - Organismo Supervisor de la Inversión en Infraestructura de Transporte de Uso Público – OSITRAN | Plataforma Nacional de Datos Abiertos». [En línea]. Disponible en: <https://www.datosabiertos.gob.pe/dataset/informacionC3%B3n-trafficopor-operacionC3%B3n-corpac-ene-2019-set-2025-organismo-supervisor-de-la>
- [25] «OGIMET». Accedido: 12 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.ogimet.com/display_stations.php?lang=en&tipo=AND&isyn=&oaci=&nombre=&estado=peru&Send=Send
- [26] Federal Aviation Administration, «Aviation Weather Handbook (FAA-H-8083-28A)», 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.faa.gov/air_traffic/publications