

ESTUDIO CLIMATOLÓGICO DE NIEBLA EN AEROPUERTOS ARGENTINOS

Melina Sol Yabra^{1,2}, Ramón de Elía², Luciano Vidal² y Matilde Nicolini^{1,3,4}

¹Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina.

²Servicio Meteorológico Nacional Argentina

³Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera, CONICET/FCEN-UBA, Buenos Aires, Argentina

⁴Instituto Franco-Argentino para el Estudio del Clima y sus Impactos, CNRS/IRD/CONICET-UBA, Buenos Aires, Argentina

RESUMEN

Este trabajo presenta un estudio climatológico sobre niebla utilizando reportes aeronáuticos horarios (METAR) para el período 2000-2019 en los siguientes aeropuertos con distintos entornos geográficos: Ezeiza, Aeroparque, San Fernando, Mar del Plata, Rosario, Resistencia, Iguazú, Córdoba, Neuquén, Bariloche, Río Gallegos, Río Grande, Ushuaia y Montevideo. Se analizaron diferentes fuentes de datos (argentina SMN, española OGIMET y estadounidenses NOAA y IEM) y se eligió la base NOAA por ser la más completa, robusta y que se extiende por un mayor período de tiempo con el fin de construir las climatologías más representativas de la realidad posibles. Los datos fueron analizados considerando las regulaciones internacionales de la OACI a las observaciones meteorológicas y las prácticas de los observadores meteorológicos en Argentina. Entre los resultados más destacables, se encontró la mayor cantidad promedio de días por año con presencia de niebla en Mar del Plata, Ezeiza, Río Grande y Montevideo (49,8, 49,1, 34,1 y 34,8 respectivamente) mientras que Neuquén, Bariloche, Ushuaia y Aeroparque presentaron los menores valores (3,5, 4,4, 1,4 y 7,1 respectivamente). Se encontró un grupo de aeropuertos en los que las frecuencias de ocurrencia tienen un ciclo diario con los mayores valores en horas cercanas al amanecer (15-20 %, 7 am) durante la mayor parte del año (Ezeiza, Mar del Plata, San Fernando, Córdoba, Rosario, Montevideo) mientras que, en otro grupo, las frecuencias diarias no presentan un rango horario predominante pero sí se encuentran mayormente en los meses invernales (Río Gallegos, Río Grande, Aeroparque). El análisis climatológico de la dirección y velocidad del viento se abordó considerando la infraestructura de los aeropuertos como la dirección de la pista y la presencia de instrumental que permita operaciones con visibilidad reducida. En particular, el primer grupo presentó un predominio de vientos calmos durante las horas de visibilidad reducida, mientras que en el segundo predominaron los vientos leves y moderados provenientes desde cuerpos de agua. Por último, se estudió la reducción de visibilidad por niebla de forma simultánea en diferentes aeropuertos con el fin de establecer el impacto del fenómeno en la logística de las aerolíneas en lo que respecta al uso de aeropuertos alternativos.

Palabras clave: niebla, visibilidad, METAR, climatología, aeronáutica.

FOG CLIMATOLOGY IN ARGENTINA'S AIRPORTS

ABSTRACT

The main objective of this work is to present a climatology and characterization of fog and mist periods over Argentinean airports with different geographical environments. Hourly aeronautical reports, METAR, were used for the 20-year period corresponding to 2000-2019 at the following airports: Ezeiza, Aeroparque, San Fernando, Mar del Plata, Rosario, Resistencia, Iguazú, Córdoba, Neuquén, Bariloche, Río Gallegos, Río Grande, Ushuaia and Montevideo (Uruguay). Different data sources were analyzed (from the SMN, Argentina, from OGIMET, Spain, and from NOAA and IEM, United States) and the NOAA data source was selected for this study because it was found to be the most complete and extended one. Data analysis was made considering international ICAO's regulations for meteorological observations and the local meteorological observers' practices. The greatest mean number of days per year with fog was found at Mar del Plata, Ezeiza, Río Grande and Montevideo airports (49.8, 49.1, 34.1 y 34.8, respectively), whereas Neuquén, Bariloche, Ushuaia and Aeroparque airports presented the lowest values (3.5, 4.4, 1.4 y 7.1, respectively). At some airports (Ezeiza, Mar del Plata, San Fernando, Córdoba, Rosario, Montevideo) occurrence frequencies had a daily cycle with larger values near dawn (15-20 %, 7 am) during most of the year, while at others (Río Gallegos, Río Grande, Aeroparque), even if mainly found during the cold season, it did not present a predominant hourly range. Wind speed and direction were analyzed and included with particular emphasis on the airport infrastructure such as runways directions and landing instruments. The first mentioned airports presented calm wind conditions linked to the presence of fog and mists. At the secondly mentioned airports, weak and moderate winds were dominant and mostly from coastal directions. Lastly, to measure the impact that fogs have on aviation logistics from airlines, frequencies of simultaneous hours with reduced visibility due to fog in neighboring or alternative airports were studied.

Keywords: fog, visibility, METAR, climatology, aviation.

1. INTRODUCCIÓN

La importancia de la meteorología para determinar las condiciones de vuelo fue puesta en relevancia desde los inicios de la aeronáutica a principio del siglo XX (Dines, 1917) y continúa en la actualidad con creciente atención (Cook y otros 2009; Rudra y otros 2015; Gultepe y otros 2014a, b, 2017; entre otros). Entre las principales condiciones meteorológicas que causan o contribuyen a los incidentes y accidentes en la aviación se encuentra la reducción de visibilidad cerca de la superficie. Este efecto puede producir cuantiosas pérdidas económicas debido a la cancelación, demora

de vuelos, desvío hacia destinos alternativos y, en los casos más adversos, puede producir incidentes que generen pérdidas materiales y humanas. La reducción de visibilidad en los aeropuertos es frecuentemente causada por la niebla y la precipitación (Tardif y Rasmussen, 2007; Gultepe y otros, 2009), pero también puede ser causada por el polvo y la ceniza de origen volcánico (Hodges y Pu, 2015), humo (Milke, 2000), arena (Nabavi, 2016), smog (White y Roberts, 1967), etc. De todos ellos, el presente trabajo se concentrará en la niebla, fenómeno meteorológico ya definido como uno de los más disruptivos del tránsito aéreo (Gultepe y otros, 2009).

A pesar del interés que han generado los eventos de niebla en actividades de investigación meteorológica en el último medio siglo, todavía queda mucho por conocer sobre el fenómeno y muchas necesidades a cubrir en lo que respecta a su previsibilidad (Tardif, 2017). Para la industria de la aviación la reducción de visibilidad, a pesar de los progresos tecnológicos en la navegación aérea (OACI, 2004), ha sido y todavía representa una perturbación importante de las actividades normales. En las últimas dos décadas se han realizado varios estudios sobre esta temática en distintos aeropuertos internacionales alrededor del mundo como Lisboa (Teixeira, 2001), Nueva York (Tardif y Rasmussen 2007, 2008), Salónica (Stolaki y otros, 2009), París (Haeffelin y otros, 2010), Estambul (Tuncay Özdemir y otros, 2016), México (González-Viveros y otros, 2018), Nueva Delhi (Kulkarni y otros, 2019), Maceio (Fedorova y otros, 2013) y Porto Alegre (Afonso y otros, 2019).

Aun cuando la reducción de visibilidad por niebla o neblina trae grandes complicaciones a la actividad aeronáutica, en la Argentina la investigación de este fenómeno es limitada a pocas regiones (Quinteros de Menzies y Obertello, 1972; Piccolo, 1983; Schonholz, 2014; Vasques Ferro y Ribero, 2015; Ruiz y otros, 2018; Lapido, 2019). Recientemente, Yabra y otros (2021a) resumieron los trabajos nacionales realizados previamente sobre la formación de niebla en los aeropuertos, y los complementaron con entrevistas a pronosticadores aeronáuticos con el fin de revelar conocimientos adquiridos en la experiencia que no hayan sido consolidados en textos. De esta forma, se generó una base de conocimientos en esta temática, que permitió circunscribir las lagunas de entendimiento y los hipotéticos mecanismos que dan lugar a la reducción de visibilidad por niebla en los respectivos aeropuertos. Dicha información recolectada fue contrastada con los resultados arrojados a partir de un estudio climatológico preliminar apoyando varias de las ideas previamente planteadas (Yabra y otros, 2021b, c).

Para continuar con la caracterización de los eventos de visibilidad reducida por niebla, el objetivo de este trabajo es presentar un estudio climatológico que resuma las principales características del fenómeno en aeropuertos con distintos entornos geográficos (continental, costero, con topografía compleja), utilizando reportes meteorológicos aeronáuticos de rutina. Los aeropuertos que abarca este trabajo se muestran en la Figura 1 y fueron seleccionados con base en la opinión de los pronosticadores aeronáuticos (Yabra y otros, 2021a) y las climatologías aeronáuticas preliminares realizadas por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Para trabajar con este tipo de datos observacionales, es necesario realizar previamente un análisis de los mismos considerando tanto las regulaciones que la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI, por sus siglas en inglés) impone para hacer las mediciones (OACI 2016a; OMM, 2014), como también las regulaciones argentinas al trabajo de los observadores y pronosticadores (ANAC, 2022) con el objetivo de evitar llegar a conclusiones erróneas.

El trabajo se organiza de la siguiente manera. En la Sección 2 se describen los datos observacionales utilizados para el estudio climatológico, su disponibilidad y las consideraciones necesarias para la comprensión de los resultados, así como también las principales características de los aeropuertos seleccionados. La metodología empleada para llevar a cabo el estudio climatológico se explica en la Sección 3 y en la Sección 4 se muestran los resultados encontrados para todos los aeropuertos, concentrándose en algunos casos específicos. Finalmente, en la Sección 5 se enumeran las conclusiones de este trabajo.

2. DATOS Y METODOLOGÍA

2.1. METAR

El Reporte Meteorológico Aeronáutico de Rutina (METAR, por sus siglas en inglés) es un reconocido formato internacional que informa

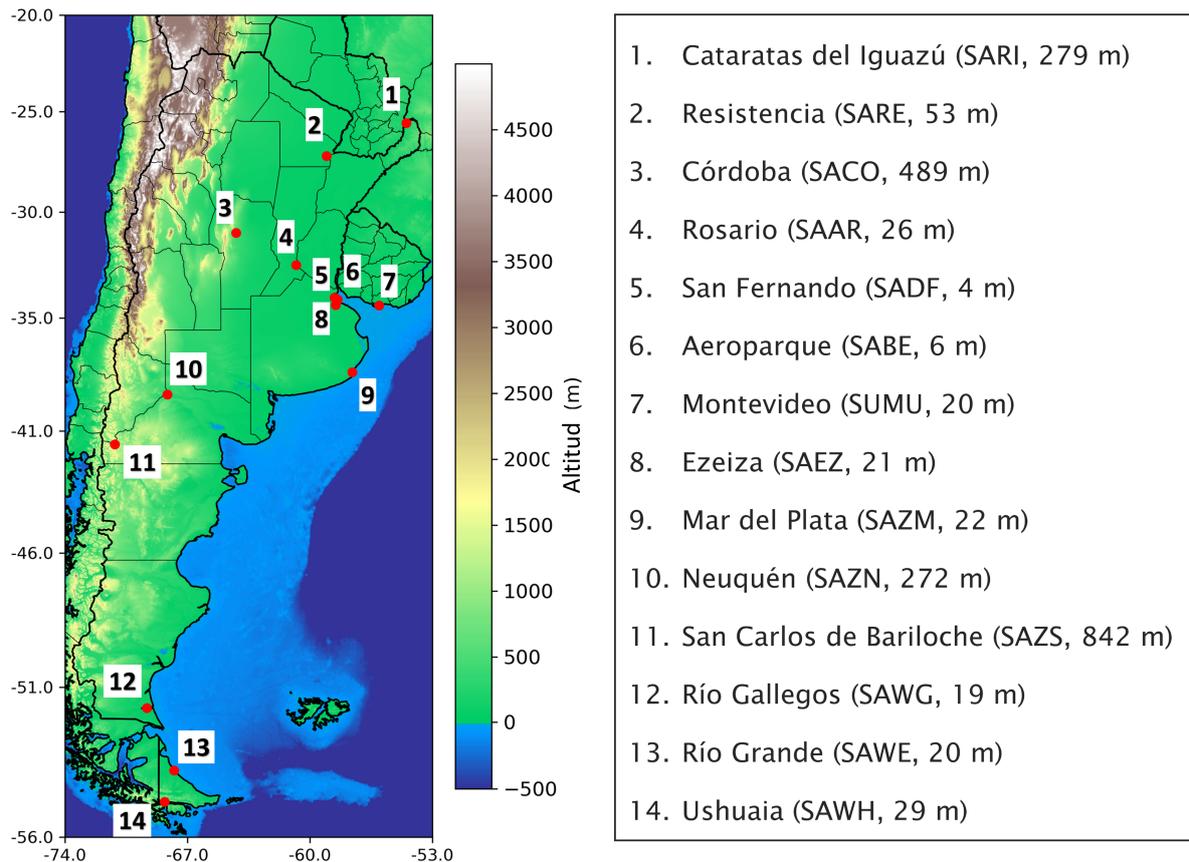


Figura 1: Aeropuertos seleccionados para realizar este trabajo. Entre paréntesis se indica el código OACI y su altitud sobre el nivel medio del mar. La información topográfica proviene del Modelo de Elevación Digital (DEM, por sus siglas en inglés) y de HydroSHEDS a partir de la misión SRTM (NASA Shuttle Radar Topography Mission) (Rodríguez y otros, 2005) con resolución horizontal de 90 m.

las condiciones meteorológicas del aeródromo. Frecuentemente es utilizado tanto por pilotos y despachantes de vuelo, como parte de los procedimientos previos al mismo, como también por investigadores al constituir una fuente de datos meteorológicos horarios (Tuncay y otros, 2016). Estos reportes meteorológicos fueron estandarizados por la OACI en 1968 para asegurar la uniformidad de formato en todo el mundo (OACI, 2016a). De esta forma, los METARs contienen principalmente la siguiente información en el orden indicado: identificación del tipo de informe, indicador de lugar, día y hora considerando el Tiempo Universal Coordinado (UTC, por sus siglas en inglés) de observación, dirección y velocidad del viento en la superficie, visibilidad, alcance visual en

la pista, tiempo presente, cantidad de nubes, tipo de nubes y altura de la base de las nubes, temperatura del aire y del punto de rocío, presión atmosférica (Ver Apéndice A).

Una vez confeccionados por el observador meteorológico aeronáutico, los METARs, se difunden hacia el SMN y luego en boletines de Información Operativa Meteorológica (OPMET. OMM, 2015) en Formato IWXXM hacia los bancos internacionales de datos designados por el Acuerdo Regional de Navegación Aérea (Brasilia, en el caso de Argentina. OACI, 2010) a través del Sistema de Manejo del Mensaje Aeronáutico (AMHS, por sus siglas en inglés) independiente de la conexión a Internet. Hasta

el 2015 el SMN no contó con un sistema de almacenamiento interno que permitiera disponer de antiguos reportes METAR (y sus metadatos) provenientes de todas las históricas estaciones meteorológicas aeronáuticas. Este hecho contribuyó a que, a diferencia de los datos de estaciones meteorológicas no aeronáuticas, no exista en el SMN una única base de almacenamiento que reuniera todos los datos de forma homogénea.

Para este estudio climatológico se utilizaron los reportes METAR provenientes de las estaciones meteorológicas aeronáuticas de la red de observaciones de superficie del SMN ubicadas en los aeropuertos seleccionados (Fig. 1), correspondientes al período 2000-2019 y almacenados en la Base Integrada de Datos de Superficie (ISD, por sus siglas en inglés. Smith y otros, 2011) del Centro Nacional de Información Ambiental (NCEI, por sus siglas en inglés) de la Administración Nacional del Océano y la Atmósfera (NOAA, por sus siglas en inglés) de Estados Unidos. Se eligió esta base de datos porque es la que contiene el período de información más largo, a diferencia de otras bases como la propia del SMN (desde el 2016), la base española OGIMET (desde el 2005) o la base Iowa Environmental Mesonet (IEM, por sus siglas en inglés, desde el 2011; Todey y otros 2002), como se observa en la Figura 2.

2.1.1. DISPONIBILIDAD DE LOS REPORTES METAR

Si bien los datos utilizados fueron producidos desde la red de observación de superficie del SMN y del Instituto Uruguayo de Meteorología (INUMET), éstos fueron obtenidos desde una base de datos externa a dichos organismos. Debido a esto, no es fácil atribuir la causa de la falta de datos que podría tener su origen tanto en la medición y codificación por parte del observador de turno, como también fallas en las comunicaciones, tanto internas como externas, que pueden darse dentro del circuito que atraviesan los reportes hasta formar parte de la base final de datos. Además, las

fallas en la comunicación generan una pérdida casi instantánea de la información ya que los METARs del día remitidas con atraso de más de 18 horas serán rechazadas por el banco OPMET (OACI, 2010). Un evento importante que puede haber jugado un rol en la falta de datos en los primeros años de este siglo es la transición que sufrió el SMN a partir del 1 de enero del 2007 (Fig. 2a-c), donde la institución pasó de ser dependencia del Comando de Regiones Aéreas a cargo de la Fuerza Aérea Argentina, a la actual Secretaría de Investigación, Política Industrial y Producción para la Defensa del Ministerio de Defensa de la Nación (Decreto N° 1689/2006).

Por otro lado, existe una variación con los años de las horas con reportes en cada uno de los aeropuertos. Por ejemplo, la reducción de las horas nocturnas de medición entre las 20 y 6 hora oficial argentina (HOA UTC-3) a partir del 2001 y la ampliación de las mismas a partir del año 2013 (Fig. 2a-c) es seguramente atribuible a una sucesión de distintos Planes de Labor que son las regulaciones y requerimientos de los observadores meteorológicos aeronáuticos determinados por el SMN teniendo en cuenta las necesidades de las dependencias de los servicios de tránsito aéreo (ver Apéndice 1 en Yabra y otros, 2021b). La variación de los Planes de Labor condujo a períodos con reportes horarios distribuidos en diferentes horas del día y con variaciones interanuales en función de la evolución de uso de los aeropuertos. Lamentablemente no existe metadata sobre estos cambios en los Planes de Labor para asegurar que todo cambio que se aprecia sea únicamente resultado de modificaciones de dichos planes. Algunos de estos cambios pueden deberse a mejoras de Planes de Labor que originalmente solo emitían reportes trihorarios (en horas principales y secundarias) y/o reportes solamente activos en las horas en las que el aeropuerto estaba operativo. Estos cambios en el régimen horario de reportes tienen incidencia en el análisis de frecuencias de ocurrencia horarias. La Figura 3 muestra la cantidad de datos faltantes relativa a la cantidad que tendría que haber si se hubiesen efectuado las mediciones

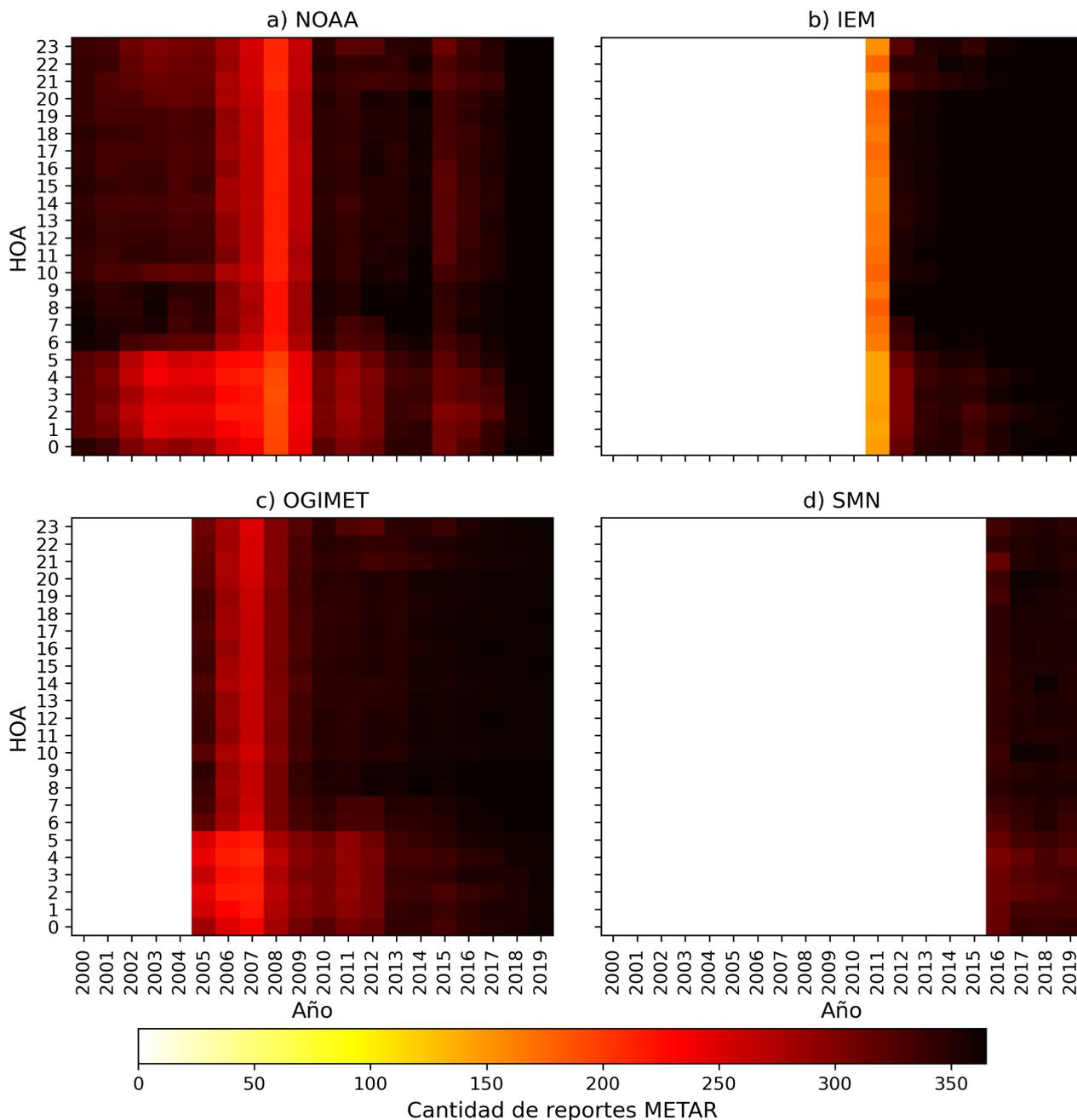


Figura 2: Evolución anual media de la cantidad de reportes METAR en función de la Hora Oficial Argentina (HOA, promedio de los aeropuertos estudiados) generados por el SMN y almacenados en las distintas bases: a) NOAA, b) IEM, c) OGIMET, d) SMN.

en cada una de las horas del día todos los días del año (365) durante todo el período de estudio (20 años). El aeropuerto de Río Grande (SAWE) es el que presenta mayor cantidad de datos faltantes en las horas nocturnas hasta el 2017 superando el 60% entre la 1 y las 6 HOA,

asociada probablemente a una operatividad del aeropuerto limitada a períodos diurnos. Este comportamiento también se encontró pero en menor medida en los aeropuertos de Ushuaia (SAWH), Bariloche (SAZS), Mar del Plata (SAZM), Neuquén (SAZN) y San Fernando

(SADF). Estos últimos dos son los que tienen mayor cantidad de datos faltantes distribuidos en todas las horas del día y esto se debe a la ausencia o escasa cantidad de reportes durante años completos: del 2005 al 2010 en el caso de Neuquén (SAZN), y del 2000 al 2009 en el caso de San Fernando (SADF). Los aeropuertos con menor cantidad de datos faltantes son Ezeiza (SAEZ), Resistencia (SARE), Cataratas del Iguazú (SARI), Río Gallegos (SAWG) y Montevideo (SUMU).

2.1.2. CONSIDERACIONES NECESARIAS PARA LA UTILIZACIÓN DE METAR

Para corroborar que se tratara de los mismos mensajes realizados por los observadores meteorológicos del SMN, se compararon los valores de visibilidad de ambas fuentes (NOAA y SMN) durante el año 2017 para el aeropuerto de Rosario y se encontró que, en efecto, los mensajes son idénticos. No obstante, algunos aspectos vinculados a la utilización de los reportes deben ser tenidos en cuenta para el análisis de los resultados:

a) Metadato. El METAR sólo informa el día y la hora UTC de validez del reporte, por ende, el mes y el año al que pertenecen deberá ser extraído del metadato siendo este de suma importancia a la hora de trabajar con períodos de varios años.

b) Medición de la visibilidad. El Anexo 3 (OACI, 2016a) comprende prescripciones tanto para las observaciones como para los pronósticos orientados a contribuir a la seguridad operacional en la navegación aérea. En Argentina las observaciones meteorológicas en aeródromos informan la visibilidad mínima, la cual se basa en la estimación de la mayor distancia visible en la dirección de menor visibilidad a partir de visualización de obstáculos de referencia preestablecidos para cada aeropuerto sin importar la dirección en la que se encuentre. Es importante notar que los obstáculos de referencia que utiliza el

observador para medir dicha variable no son contruidos con el propósito de esta medición, sino que consisten en estructuras elegidas ad hoc que responden a las características propias de cada aeropuerto. Este hecho conduce a una discretización de la medición de visibilidad (tanto en su variabilidad angular como en distancia) que no resulta uniforme dentro del mismo aeropuerto y tampoco entre distintos aeropuertos. Una vez ya realizada la medición de visibilidad por el observador meteorológico, esta deberá ser especificada en el reporte bajo el siguiente criterio: cada 50 m cuando la visibilidad se encuentra entre 0 y 800 m; cada 100 m cuando la visibilidad se encuentra entre 800 y 5000 m; cada 1000 m cuando la visibilidad se encuentra entre 5000 y 10000 m. Todo valor observado que no corresponda a la escala de notificación utilizada será redondeado hacia el incremento inferior más bajo de la escala (OACI, 2016a).

c) Precisión con que se reporta la temperatura del aire y la de punto de rocío. Si bien estas variables son continuas, según la normativa del Anexo 3 (OACI, 2016a) sólo se reportan sus partes enteras. Además de la información que se pierde al redondear estos valores, la poca precisión puede conducir a cierto error en el cálculo de otros indicadores como, por ejemplo, la humedad relativa (este error puede ser de hasta 7%, y su análisis se puede encontrar en Yabra y otros, 2021b).

d) Medición sesgada de la dirección del viento. El Anexo 3 (OACI, 2016a) indica que la dirección y la velocidad del viento de superficie se notificarán en escalones de 10 grados angulares (°) y 1 kt, respectivamente, redondeado al escalón más próximo todo valor que no se ajuste a dicha escala. En los aeropuertos que no cuentan con Sistemas Automáticos de Observación Meteorológica (AWOS, por sus siglas en inglés), estas mediciones son realizadas por el observador utilizando el anemómetro y la veleta que se dispone en cada estación aeronáutica. En estos casos, la medición de la dirección del viento

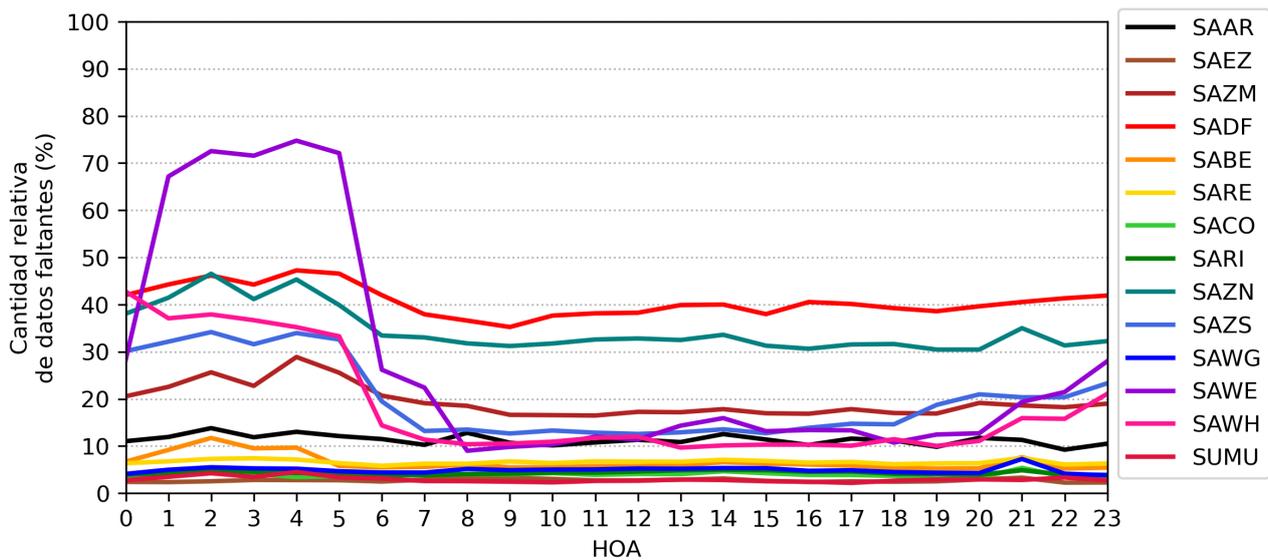


Figura 3: Distribución horaria de la cantidad relativa de datos METAR faltantes en cada aeropuerto para el período 2000-2019 en la base de almacenamiento NOAA.

puede verse sesgada por diferentes factores. Por un lado, la utilización de una escala de redondeo del valor por parte del observador que fuera distinta a la establecida en la normativa, por ejemplo, en intervalos de 45° conduciendo a la falta de precisión de las coordenadas. Por otro lado, la ondulación del terreno (Carrera y otros, 2009) o la existencia de construcciones cercanas a la estación meteorológica podría obstaculizar la circulación del viento y producir datos fuertemente sesgados en dirección y velocidad. En este caso, dichos datos conducirían a formular conclusiones erróneas respecto de, por ejemplo, la advección de humedad que daría lugar a la formación de niebla.

e) Inconsistencias en el tiempo presente. Existe una gran cantidad de reportes donde el tiempo presente, o bien falta, se encuentra mal codificado o contradice otras observaciones en el METAR. En particular, la diferencia entre reportar niebla o neblina radica en si el valor de la visibilidad es menor a 1000 m o, mayor a 1000 m y menor a 5000 m, respectivamente (OMM, 1966). Sin embargo, se encontraron reportes con niebla en el tiempo presente y visibilidad mayor a 1000 m (0,2% del total de reportes, calculado con el cociente 14/7511), y también numerosos

reportes con neblina y visibilidad menor a 1000 m (10% del total, calculado como el cociente 762/7511) como se muestra en la Tabla I para el aeropuerto de Ezeiza. Particularmente se destaca la cantidad de horas con niebla (por tener visibilidad menor a 1000 m) que fue reportada como neblina ya que representan el 19% de la cantidad total de horas con niebla (calculados como el cociente 762/3934). En otros aeropuertos también se encontraron estas últimas inconsistencias, pero con valores menores, por ejemplo, 4% en Córdoba y 2,5% en Aeroparque. A diferencia de estos, el aeropuerto de Bariloche se destaca por tener el 56% de las horas con neblina reportadas como niebla. Esto tiene incidencia a la hora de analizar el fenómeno que explica la reducción de visibilidad y definir la metodología utilizada en este trabajo, y nos obliga a, o bien a tomar a una de las dos informaciones contradictorias como verdadera, o a desecharlas (ver Sección 2.3).

2.2. AEROPUERTOS

Cook y otros (2009) cuantificaron el impacto de los factores meteorológicos en los retrasos de los vuelos y encontraron que los factores contribuyentes dependen en gran medida del

	METAR con visibilidad [0 m, 1000 m)	METAR con visibilidad [1000 m, 5000 m)	Total
METAR con niebla	3172	14	3186
METAR con neblina	762	3563	4325
Total	3934	3577	7511

Tabla I: Cantidad de reportes METAR para el aeropuerto de Ezeiza (SAEZ) cuyo tiempo presente reportado es niebla (primera fila) y neblina (segunda fila), categorizados según el valor de la visibilidad reportada: entre 0 m y 1000 m (primera columna) y entre 1000 m y 5000 m (segunda columna). Una tabla correspondiente a un aeropuerto sin inconsistencias entre la visibilidad y el tiempo presente, tendría ceros en las categorías “niebla con visibilidad entre 1000 m y 5000 m” y “neblina con visibilidad menor a 1000 m”.

tipo de aeropuerto. La gravedad del impacto que puede provocar la niebla recae en la infraestructura y el instrumental que disponga, es decir, en la máxima categoría de operaciones que se puedan llevar a cabo en dicho aeropuerto. Para ello, se deben tener en cuenta varios aspectos (las condiciones meteorológicas, el instrumental meteorológico, la infraestructura del aeropuerto, el instrumental de la aeronave, la capacitación de la tripulación) y, en función de estos, se pueden clasificar los vuelos en visuales o instrumentales (ANAC, 2016). En un vuelo visual (VFR, por sus siglas en inglés), el piloto dirige su aeronave manteniendo en todo momento contacto visual con el terreno. Para este tipo de vuelo el mínimo meteorológico que se debe cumplir es 5000 m para la visibilidad. Los vuelos instrumentales (IFR, por sus siglas en inglés) son aquellos que se pueden llevar a cabo en los aeropuertos que disponen de infraestructura instrumental y por aviones y tripulaciones preparados para utilizarlas, cuando la visibilidad se encuentra por debajo de 5000 m. Los procedimientos

y mínimos meteorológicos de visibilidad para las operaciones en las diferentes categorías se establecen para asegurar que se alcance un cierto nivel de seguridad en condiciones de visibilidad reducida asociadas con las operaciones en un determinado aeropuerto. En cuanto a las condiciones meteorológicas requeridas, se utilizan umbrales mínimos de visibilidad o de alcance visual en pista (RVR, por sus siglas en inglés, se define como la distancia a la cual el piloto de una aeronave que se encuentra sobre el eje de una pista puede ver las señales de superficie de la pista o las luces que la delimitan o que señalan su eje. OACI, 2016b). Según ANAC (2019a), las diferentes categorías (CAT) meteorológicas de operaciones en cada aeropuerto se determinan como I, II y III dependiendo de la adversidad de las condiciones bajo las que se puede operar. Los aeropuertos con CAT I pueden realizar operaciones cuando la visibilidad mínima es mayor a 800 m o RVR mayor a 550 m, mientras que los aeropuertos con CAT III (A y B) pueden operar mientras que el RVR sea mayor a 200 m o incluso, con cualquier valor de RVR en el caso de CAT III C. Las categorías y los mínimos meteorológicos de los aeropuertos seleccionados para este trabajo fueron obtenidos de la Publicación de Información Aeronáutica (AIP) realizada por la Administración Nacional de Aviación Civil de Argentina (ANAC) y se encuentran detallados en el Apéndice B (<http://ais.anac.gov.ar/aip> accedido el 30/10/21).

2.3. METODOLOGÍA

Los reportes horarios METAR para todo el período y aeropuertos fueron descargados desde la fuente dentro de un archivo de texto que reúne toda la información meteorológica horaria disponible en cada aeropuerto y para cada año del período. A partir de cada archivo, los reportes fueron decodificados utilizando el módulo “Metar” desarrollado en lenguaje Python por Tom Pollard y disponible en GitHub (<https://github.com/tomp/python-metar> accedido el 30/10/21). En este trabajo, como se propone realizar

un estudio local dentro de un mismo país (con mismo huso horario) a excepción del aeropuerto de Montevideo (Uruguay), se realizó la conversión de todas las fechas a las correspondientes en HOA.

El foco de este estudio climatológico está puesto en los períodos con visibilidad reducida por niebla y neblina. Para analizar los períodos de niebla, se seleccionaron los reportes que indican visibilidad menor a 1000 m y niebla o neblina como tiempo presente (codificadas como “FG y “BR, respectivamente), mientras que no incluya simultáneamente otro fenómeno que pueda disminuir la visibilidad (“reportes con niebla en adelante). La justificación para incluir ambos fenómenos en el tiempo presente radica en las incongruencias encontradas entre la visibilidad y el tiempo presente, aspecto ya discutido en la sección 2. Para analizar los períodos de neblina, el criterio de selección es análogo pero la visibilidad reportada debe ser mayor o igual a 1000 m y menor a 5000 m (“reportes con neblina en adelante). Según OMM (2008), un buen control de calidad de las observaciones que corresponden a nieblas y neblinas incluye la condición de superar el 90 % de humedad relativa. La Figura 4 muestra las distribuciones de depresión de punto de rocío (D) para cada intervalo de visibilidad en horas con presencia de sólo niebla/neblina en el tiempo presente considerando todos los aeropuertos. Es importante mencionar que las variables expresadas con sus números enteros, como es el caso del METAR, sólo permiten una estimación aproximada de la real depresión del punto de rocío. Es decir, lo que aquí se define como $D = 0^{\circ}\text{C}$, es en realidad un número entre 0°C y $0,9^{\circ}\text{C}$. Por ejemplo, se podría tener $10,4^{\circ}\text{C}$ de temperatura y $9,5^{\circ}\text{C}$ de temperatura de punto de rocío, lo cual representa un $D = 0,9^{\circ}\text{C}$, mientras que calculado a partir del METAR daría $D = 0^{\circ}\text{C}$. A partir de la Figura 4, se puede ver que la mayor cantidad de casos ocurre con valores cercanos a la saturación, con depresión de punto de rocío menor a 2°C . Particularmente, el 75 % de las horas con hasta los 3000 m de visibilidad tienen valores menores

o iguales a 1°C cualquiera sea el fenómeno que esté obstruyendo la visibilidad. Como trabajos anteriores han notado (Isaac y otros, 2020; Zhang y otros, 2020), a simple vista se observa la compleja relación entre estas dos variables en las horas con niebla/neblina. Los valores de depresión mayores a 2°C con nieblas/neblinas son muy poco frecuentes para las horas con visibilidad menor a 5000 m. Estos casos pueden tratarse de tiempo presente mal codificado, es decir, que se hayan reportado nieblas o neblinas cuando el fenómeno que redujo la visibilidad haya sido otro (humo o calima, por ejemplo). Otro factor que puede estar influyendo en la relación entre visibilidad, depresión de punto de rocío y tiempo presente es la localización desde donde se ha realizado la medición de cada uno. Es decir, mientras que ambas temperaturas se miden in situ en la estación meteorológica aeronáutica, la obstrucción de visibilidad puede deberse a un banco de niebla que se encuentra entre el observador meteorológico y el obstáculo de referencia, pero no sobre la estación. En este razonamiento, estas observaciones no refieren al mismo estado local de la atmósfera. A raíz de esto, se eligió no utilizar la depresión de punto de rocío como control de calidad de los datos. El criterio de selección de reportes con niebla o neblina se restringe a los valores obtenidos de visibilidad y de tiempo presente con el objetivo de no limitar por demás la cantidad de datos.

Algunos resultados de este trabajo son producto de la aplicación de promedios en diferentes cantidades absolutas o proporciones. Para poder realizar la comparación de estos promedios entre los distintos aeropuertos, es necesario conocer las medidas de la incertidumbre que llevan asociadas en su estimación. Por esta razón, los resultados estadísticos que se describen en la siguiente sección se informan en forma de intervalo de confianza utilizando la metodología denominada “Wilson modificado por continuidad” con un 90 % de confianza. Para una discusión más detallada ver Wallis (2013).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

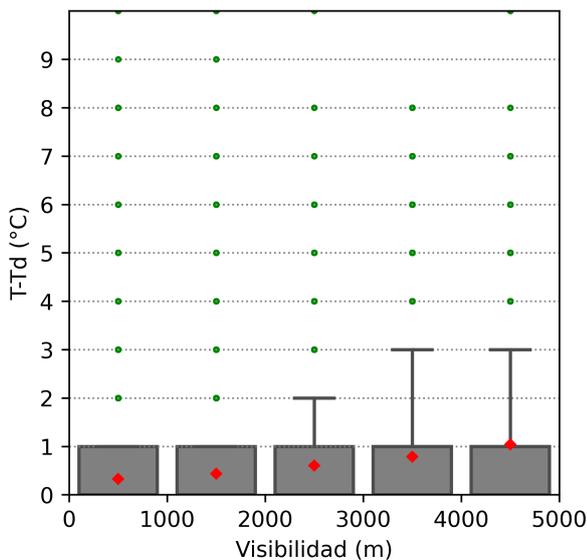


Figura 4: Boxplot para las distribuciones de depresión de punto de rocío en intervalos de visibilidad para las horas con nieblas o neblinas en su tiempo presente considerando todos los aeropuertos seleccionados.

3.1. FACTORES CAUSANTES DE LA REDUCCIÓN DE VISIBILIDAD

Tal como se mencionó en la Sección 1, la reducción de visibilidad puede deberse al efecto de otro fenómeno meteorológico y, por lo tanto, resulta de interés comparar las frecuencias de visibilidad reducida por niebla con las asociadas a otros factores meteorológicos tales como los distintos tipos de precipitación o litometeoros. La Figura 5 muestra la cantidad total de reportes METAR con visibilidad menor a 1000 m divididos según el tiempo presente para el aeropuerto de Rosario. Los otros aeropuertos no son mostrados por presentar comportamiento similar. La visibilidad reducida sin considerar el tiempo presente (Fig. 5a) tiene un régimen de ocurrencia similar al mismo considerando sólo los reportes con niebla (Fig. 5b), cuyos máximos se encuentran en las horas nocturnas y meses invernales. La cantidad de reportes con visibilidad reducida por niebla es la que domina el comportamiento de la frecuencia total lo cual otorga a este fenómeno un rol crucial dentro

de las condiciones meteorológicas necesarias para la navegación aérea. Por el contrario, la visibilidad reducida por precipitaciones (Fig. 5c) además de obedecer a otra estacionalidad, representa una menor proporción dentro del total de reportes. La reducción de visibilidad por presencia de litometeoros (Fig. 5d) presenta una muy baja ocurrencia y sin ciclos aparentes, aunque marginalmente más frecuente por la tarde que por la madrugada en Rosario. Particularmente, Aeroparque, Ezeiza, Rosario y San Fernando reportaron en reiteradas horas la presencia de humo debido a la quema de pastizales en el Delta. Por otro lado, Río Grande presentó reiterados eventos con litometeoros en suspensión durante los meses de febrero y marzo cuando el agua de la Laguna Seca (ubicada a 1,5 km al oeste del aeropuerto de Río Grande) desaparece por completo, y los fuertes vientos conducen a levantar nubes de polvo que suelen reducir la visibilidad sobre gran parte de la ciudad. En el caso de Bariloche y Neuquén, la reducción de visibilidad por presencia de litometeoros se debió principalmente a dos eventos de cenizas tras la erupción de los volcanes Puyehue en 2011 y Calbuco en 2015. Se encontraron considerables cantidades de reportes cuyo tiempo presente incluye niebla y algún tipo de precipitación (Fig. 5e) y, en aeropuertos como Río Grande, Córdoba y Aeroparque el patrón que presentan es similar al de los reportes con niebla o neblina, aunque su frecuencia es menor (Fig. 5b). Estos casos pueden deberse a la disminución de la visibilidad por la ocurrencia de precipitación y confundida con niebla o también a la formación de niebla producto de la condensación generada a partir de la saturación del aire tras la evaporación de la precipitación caída, dentro de la misma hora considerada para el reporte. Tal como se observa en el aeropuerto de Rosario, en los aeropuertos de Ezeiza y Mar del Plata también se encontraron escasos reportes nocturnos y cercanos a la hora del amanecer con visibilidad reducida, pero sin información del tiempo presente (Fig. 5f). Por el patrón que presentaron, similar al correspondiente a este fenómeno, se asume que en su mayoría fueron

nieblas no reportadas, aunque no se consideran para el estudio climatológico.

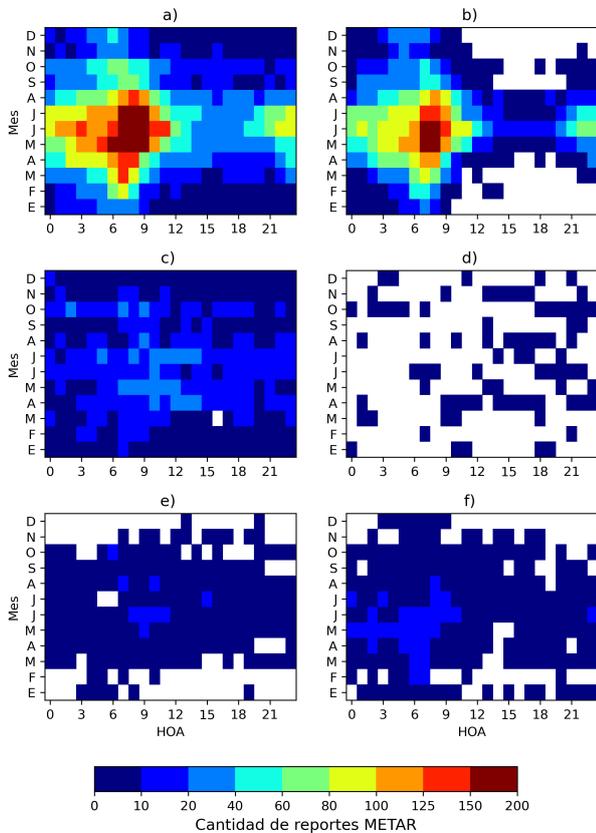


Figura 5: Cantidades de reportes METAR con visibilidad menor a 1000 m en el aeropuerto de Rosario por hora y mes para el período 2000-2019: a) totales, b) niebla, c) precipitación, d) litometeoros, e) precipitación y niebla y f) sin información en el tiempo presente.

3.2. CARACTERÍSTICAS TEMPORALES DE LAS NIEBLA Y NEBLINA

La Tabla II muestra la cantidad promedio de días por año (considerando los años disponibles en cada aeropuerto) y promedio de horas por día con visibilidad reducida por niebla o neblina en cada aeropuerto. Para calcularlas se seleccionaron todos los reportes con niebla y con neblina como se describió en la Sección 2.3. La cantidad de días por año refiere a la cantidad de días con al menos un (1) reporte con el fenómeno mientras que la cantidad de

horas por día equivale a la cantidad de reportes en cada uno de dichos días promediada por la cantidad total de días con niebla o neblina. Estas cantidades permiten tener una primera estimación de la frecuencia de ocurrencia de este fenómeno en cada región. Es importante tener en cuenta que la comparación entre aeropuertos debe realizarse con cierta precaución ya que como se mostró en la Figura 2 la disponibilidad de datos es variada. Entre los aeropuertos con mayor cantidad promedio de días por año con presencia de niebla se encuentra el de Mar del Plata con 49,8 y Ezeiza con 42,1 días, mientras que los de Neuquén y Ushuaia presentaron las menores cantidades con valores de 3,5 y 1,4, respectivamente. El comportamiento de los días por año con neblina es análogo al de la niebla, pero sumando al aeropuerto de Montevideo dentro de los que más días por año tienen y Bariloche dentro de los que menos días por año tienen (71,9 y 9,3 días, respectivamente).

Respecto de la cantidad de horas por día, el caso más extremo es Ushuaia para los casos de niebla, en el cual esos 1,4 días tienen en promedio reducción de visibilidad por 4,75 horas, estimando la ocurrencia de niebla como recurrente dentro del mismo día (no se puede aseverar estimaciones sobre la duración de la niebla ya que el estudio no incluye el tratamiento de horas consecutivas de reportes con niebla). Por el contrario, en los días en que la visibilidad es reducida por neblina en el mismo aeropuerto, estos días tienen en promedio 1,62 horas siendo el menor valor encontrado. Este estudio particular sobre la cantidad de horas por día con niebla o neblina tiene un carácter estimativo, ya que en la realidad los eventos de visibilidad reducida pueden ser una combinación de ambos fenómenos en horarios sucesivos y por ende, la cantidad de horas por día total podría ser mayor a la considerada individualmente para cada fenómeno. Seguido de Ushuaia, los aeropuertos de Ezeiza, Río Grande y Río Gallegos presentaron las mayores cantidades de horas por día con niebla (3,7, 3,9, 3,7 horas, respectivamente), mientras que Aeroparque es el que presentó mayor cantidad

Aeropuerto	Días por año con niebla	Días por año con neblina	Horas por día con niebla	Horas por día con neblina
Mar del Plata	49,8 (49,3 - 50,3)	83,4 (82,7 - 84,1)	3,6 (3,6 - 3,7)	3,0 (2,9 - 3,0)
Ezeiza	42,1 (41,7 - 42,6)	74,2 (73,6 - 74,7)	3,8 (3,7 - 3,8)	2,9 (2,9 - 3,0)
Rosario	30,5 (30,0 - 30,9)	50,8 (50,3 - 51,3)	3,5 (3,4 - 3,5)	3 (2,9 - 3,0)
Río Grande	34,1 (33,6 - 34,6)	47,3 (46,7 - 47,8)	4,0 (3,9 - 4,0)	3 (2,9 - 3,0)
Montevideo	34,8 (34,3 - 35,2)	71,9 (71,3 - 72,5)	3,8 (3,7 - 3,8)	3,3 (3,3 - 3,4)
Iguazú	30,8 (30,4 - 31,2)	58,8 (58,2 - 59,3)	3,0 (2,9 - 3,0)	2,9 (2,9 - 3,0)
Resistencia	20,0 (19,6 - 20,3)	49 (48,5 - 49,5)	2,9 (2,8 - 2,9)	2,4 (2,4 - 2,5)
San Fernando	18,8 (18,4 - 19,2)	34,1 (33,5 - 34,6)	3 (2,9 - 3,0)	2,7 (2,71 - 2,78)
Córdoba	16,0 (15,7 - 16,3)	36,3 (35,8 - 36,7)	2,8 (2,8 - 2,9)	2,7 (2,6 - 2,7)
Río Gallegos	15,1 (14,8 - 15,4)	19,7 (19,4 - 20,0)	3,78 (3,7 - 3,8)	2,7 (2,6 - 2,7)
Aeroparque	7,1 (6,9 - 7,3)	34,1 (29,7 - 30,5)	3,6 (3,5 - 3,6)	3,5 (3,5 - 3,6)
Bariloche	4,4 (4,2 - 4,6)	9,3 (9,0 - 9,5)	3,5 (3,4 - 3,5)	2,0 (2,0 - 2,1)
Neuquén	3,5 (3,3 - 3,6)	4,8 (4,6 - 5,0)	3,2 (3,1 - 3,2)	1,9 (1,9 - 2,0)
Ushuaia	1,4 (1,3 - 1,5)	1,9 (1,7 - 2,0)	4,8 (4,7 - 4,8)	1,6 (1,6 - 1,7)

Tabla II: Cantidad promedio de días por año y horas (reportes) por día con niebla y neblina en el análisis climatológico. Los intervalos de confianza al 90 % entre paréntesis, se calcularon de acuerdo a la metodología mencionada en la sección 2.3.

de horas por día con neblina (3,51 horas).

La Figura 6 muestra los ciclos anuales (5a) y diarios (5b) de las frecuencias relativas de reportes con neblina para cada aeropuerto. Mientras que en aeropuertos continentales como Rosario, Ezeiza, Córdoba, Iguazú y Resistencia estos reportes son más frecuentes en las horas nocturnas y cercanas al amanecer, principalmente en la temporada fría, los aeropuertos costeros como Aeroparque, Río Gallegos y Río Grande, no presentan un rango horario definido siendo sus frecuencias cuasi-homogéneas a lo largo del día (recordar que Río Grande carece de más del 50 % de los

datos en las horas nocturnas). Particularmente, en los aeropuertos de Iguazú y Resistencia cerca del 20 % de los reportes con neblina se concentran a las 7 de la mañana, mientras que en Aeroparque y Río Grande, este porcentaje a dicha hora se reduce a la mitad ya que se encuentra distribuido durante un período de tiempo más largo y la comparación se invierte en las horas de la tarde. En los aeropuertos continentales, el mecanismo dominante en la formación de la niebla sería el enfriamiento radiativo nocturno de la superficie bajo condiciones anticiclónicas y vientos calmos, llamándose así “niebla radiativa” (Byers, 1960). Esta hipótesis ya fue

aceptada en otros trabajos en los aeropuertos de Rosario (Lapido, 2019) y Ezeiza (Schonholz, 2015). En cambio, los aeropuertos costeros serían frecuentemente afectados en la temporada fría por la advección de masas de aire húmedas o bien de niebla ya formada proveniente de la superficie marina relativamente más cálida, llamándose “niebla advectiva” (Byers, 1960). Este resultado también ya fue expuesto en el trabajo de Vasques Ferro y Ribero (2015) enfocado en Aeroparque. También se encontraron diferencias entre aeropuertos con entornos geográficos similares. Por ejemplo, Mar del Plata y Montevideo se encuentran a poca distancia de la costa como Río Grande y Aeroparque, respectivamente, pero su régimen de ocurrencia se asemeja más al de los aeropuertos continentales. Yabra y otros (2021a) mencionaron que una posible justificación para este fenómeno se basa en la existencia de una zona boscosa entre la costa y el aeropuerto, imposibilitando o debilitando las advecciones desde esa dirección en el caso de Mar del Plata. En dicho trabajo, también se menciona la hipótesis en la que niebla radiativa formada tierra adentro hacia el noroeste, es advectada hacia este último aeropuerto cerca de la hora del amanecer. Por otro lado, los aeropuertos de Córdoba, Bariloche y Neuquén se localizan sobre regiones con terreno complejo (Ver Fig. 76 en Yabra y otros, 2021b). Mientras que los primeros parecieran estar dominados por el enfriamiento radiativo nocturno, el último pareciera tener otro mecanismo responsable de la formación de neblina que justifique el máximo de frecuencias en el mes de mayo. La extensión de las frecuencias horarias hasta el mediodía en Bariloche y Neuquén posiblemente esté influenciada por la fuerte estabilidad que se genera en los valles como consecuencia del flujo pendiente abajo de masas de aire frías, requiriendo de mayor radiación solar para romper dicha estabilidad y disipar la niebla/neblina (Pilié y otros, 1975).

Análogamente, se analizaron los ciclos anuales y diarios de las frecuencias relativas de reportes con niebla para cada aeropuerto y se

encontraron resultados similares (Fig. 7). Una de las diferencias más notables es la reducción de horas con máximas frecuencias de niebla en Bariloche y Neuquén que si bien alcanzan el mismo porcentaje entre las 8 y 9 de la mañana que en el caso de los reportes con neblina, el aumento de la frecuencia anterior a dicho máximo y la disminución posterior son más abruptos. Por otro lado, las frecuencias diarias de ocurrencia de neblina del aeropuerto de Iguazú presentaron un comportamiento similar al del aeropuerto de Resistencia. En cambio, las frecuencias de ocurrencia de niebla en dicho aeropuerto se encuentran más distribuidas durante todas las horas del día, aunque aumentan notablemente a partir de las 2 y conservan el máximo valor entre las 7 y 8 de la mañana.

3.3. COMPORTAMIENTO DEL VIENTO EN PRESENCIA DE NIEBLA Y NEBLINA

Las situaciones conducentes a niebla o neblina tienden en general a obedecer a situaciones sinópticas favorables bastante específicas incluidas la presencia de anticiclones en niveles bajos o ciclones con frentes cálidos, fríos o estacionarios asociados (Roach, 1995). Además de la indispensable humedad disponible en el aire, la intensidad y la dirección de los vientos en superficie pueden tener un rol fundamental. En lo que sigue se exploran las condiciones de viento para los casos de neblina o niebla concentrándose en dos aeropuertos con características peculiares.

La Figura 8 muestra las rosas de los vientos para los aeropuertos de Bariloche (arriba) y Río Grande (abajo). A la izquierda se muestran las rosas climatológicas utilizando todos los reportes disponibles (Fig. 8a y d), en el centro las rosas correspondientes sólo a aquellos reportes con neblina (Fig. 8b y e) y a la derecha correspondientes sólo a aquellos reportes con niebla (Fig. 8c y f). Como primer resultado, se puede ver que los vientos que acompañan la visibilidad reducida son muy

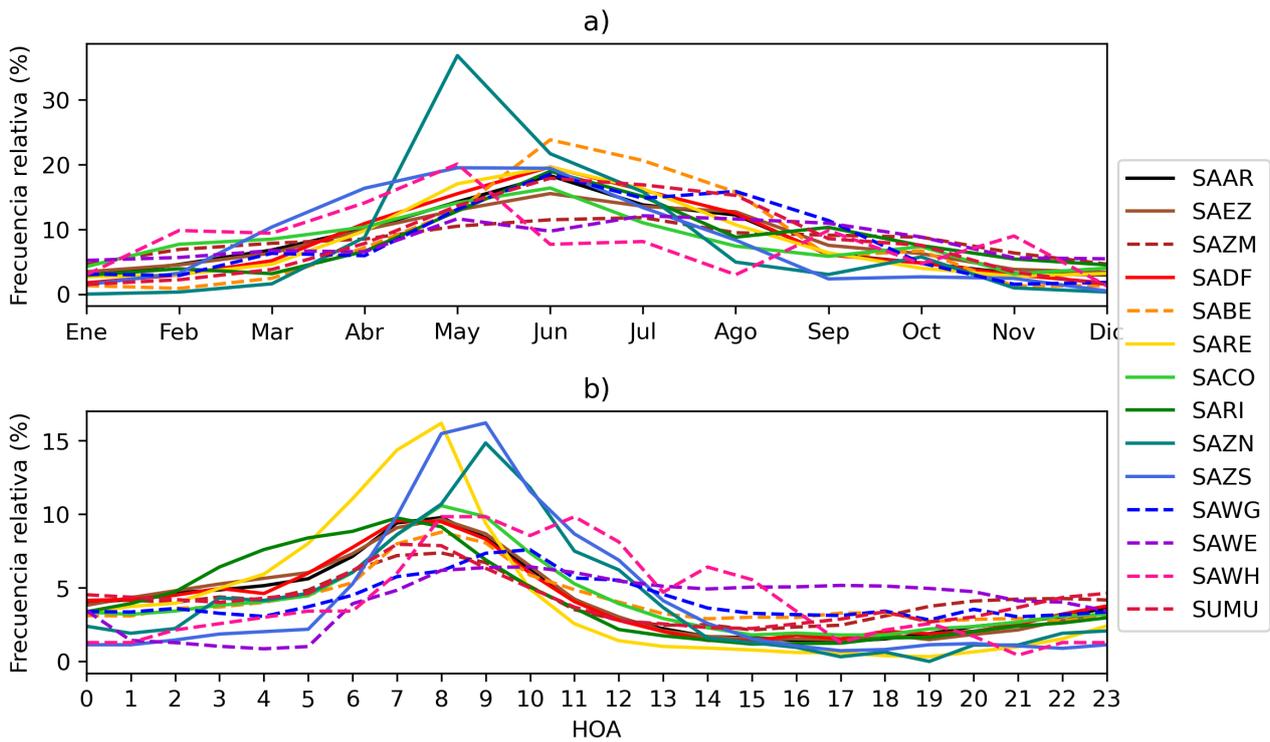


Figura 6: Frecuencia relativa de reportes METAR con neblina para el período 2000-2019 en los aeropuertos seleccionados. En el panel superior (a) se muestra el ciclo anual y en el inferior (b) el ciclo diario. En líneas continuas se presentan los aeropuertos continentales y en líneas segmentadas se presentan los aeropuertos costeros.

distintos a los climatológicos, aunque ello es más notorio en el caso de Bariloche. En los reportes con neblina o niebla de este aeropuerto se encontró un porcentaje de calmas muy elevado superior al 50%, seguido de vientos leves (2 - 6 kt) y moderados (6 - 12 kt) provenientes mayormente del sector SE. Esta dirección ya había sido señalada en las hipótesis formuladas por los pronosticadores (Yabra y otros, 2021a). Este posible efecto estaría vinculado con la topografía, ya que hacia el sudeste existe una pendiente pronunciada que podría estar favoreciendo el desarrollo de circulaciones locales de mesoescala. El comportamiento del viento prácticamente no cambia en los reportes con niebla, ya que el porcentaje de calmas se mantiene y la dirección predominante continúa siendo el SE. El predominio de vientos calmos es una característica que también se observó en la mayoría de los aeropuertos continentales como Rosario, Ezeiza, Resistencia, Córdoba, Neuquén,

y el caso más extremo, San Fernando. Este resultado refuerza la teoría sobre la formación de “niebla radiativa” (Byers, 1960) en estos aeropuertos.

Por el contrario, en el aeropuerto de Río Grande en los reportes con neblina se encontró un porcentaje de calmas poco mayor que la climatología, pero no predominante, seguido de vientos moderados y fuertes (mayores a 12 kt) provenientes mayormente de las direcciones comprendidas entre el NO y SE, dirección en la que se encuentra la costa del Mar Argentino a 2 km. El comportamiento del viento cambia en los reportes con niebla, ya que el porcentaje de calmas aumenta, no se observa ninguna dirección predominante, las velocidades disminuyen, dominan los valores menores a 8 kt y casi no superan los 16 kt. Los vientos más fuertes continúan proviniendo del mar, mientras que los leves y moderados provienen del sector

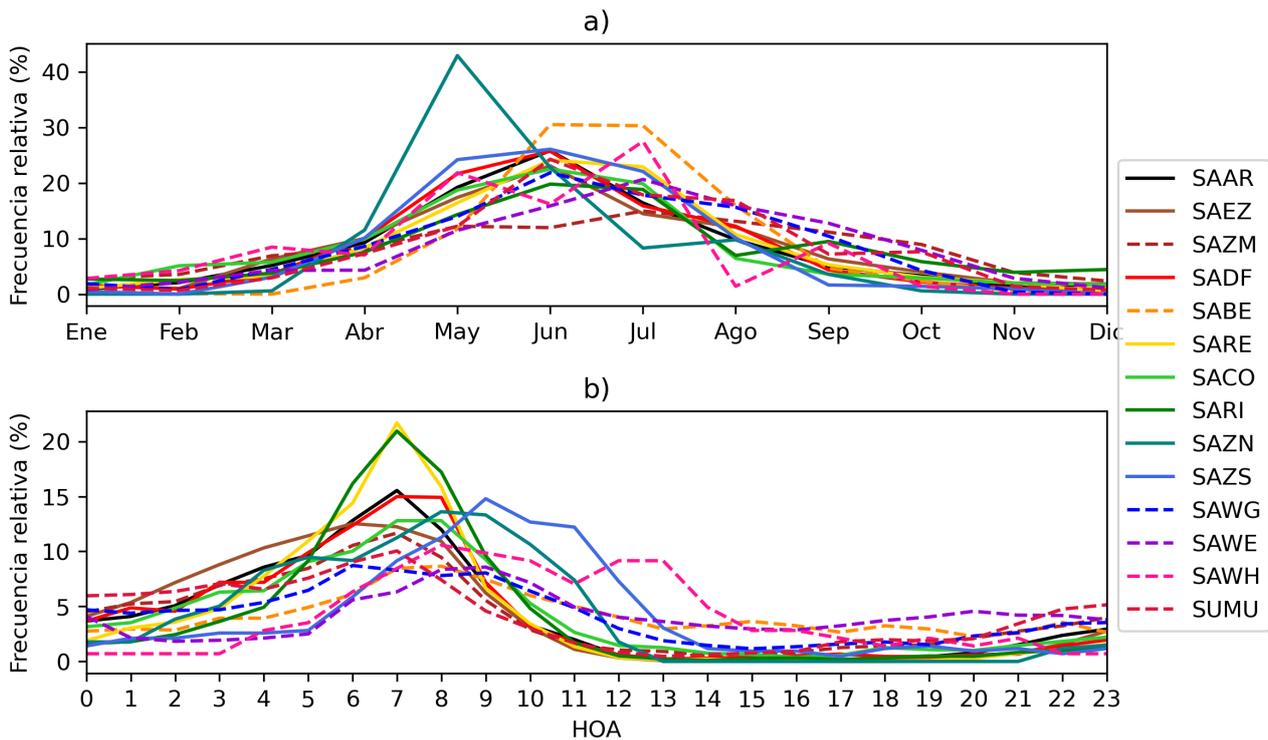


Figura 7: Ídem Fig. 6 pero para reportes con niebla.

SO, región continental con cuerpos de agua poco profundos. Comportamientos similares se encontraron en Aeroparque y Río Gallegos, aeropuertos que también se encuentran cerca de la costa. En el aeropuerto de Mar del Plata, a pesar de su localización a pocos kilómetros de la costa, se encontró que el viento que acompaña los reportes de visibilidad reducida por niebla y/o por neblina tiene un comportamiento más parecido al de Bariloche en cuanto al predominio de los vientos calmos, y nuevamente su patrón se asemeja más al de la niebla radiativa que a la niebla advectiva.

3.4. OPERACIONES CON SISTEMAS DE ATERRIZAJE POR INSTRUMENTOS

A la hora de mejorar la infraestructura de un aeropuerto, no siempre se cuenta con los recursos suficientes para optimizar todas las pistas en todas sus orientaciones, por lo cual en Argentina, los Sistemas de Aterrizaje por Instrumentos (ILS, por sus siglas en inglés) son

generalmente instalados en una sola cabecera de la pista (a excepción de aquellos que poseen CAT III). De acuerdo a la teoría de vuelo (ANAC, 2019c), las operaciones de despegue o aterrizaje con viento en contra favorecen la sustentación ya que aumenta la velocidad relativa de la aeronave respecto del viento y, de este modo, el avión consigue despegar o aterrizar en menor distancia. La Figura 8 indica la orientación de la pista y sus cabeceras en el aeropuerto de Bariloche y de Río Grande. Notar que los aviones pueden despegar o aterrizar en ambas direcciones dependiendo de las condiciones meteorológicas y técnicas en las que se encuentre el aeropuerto. El número que lleva la cabecera indica la orientación en la que se desplazan las aeronaves sobre dicha pista. Por ejemplo, en la rosa de la Figura 8f, el número 07 refiere a la orientación de la pista cuando el aterrizaje o despegue del avión comienza en el sector sudoeste.

En Bariloche, el ILS permite llevar a cabo operaciones de vuelo IFR con CAT I cuando se

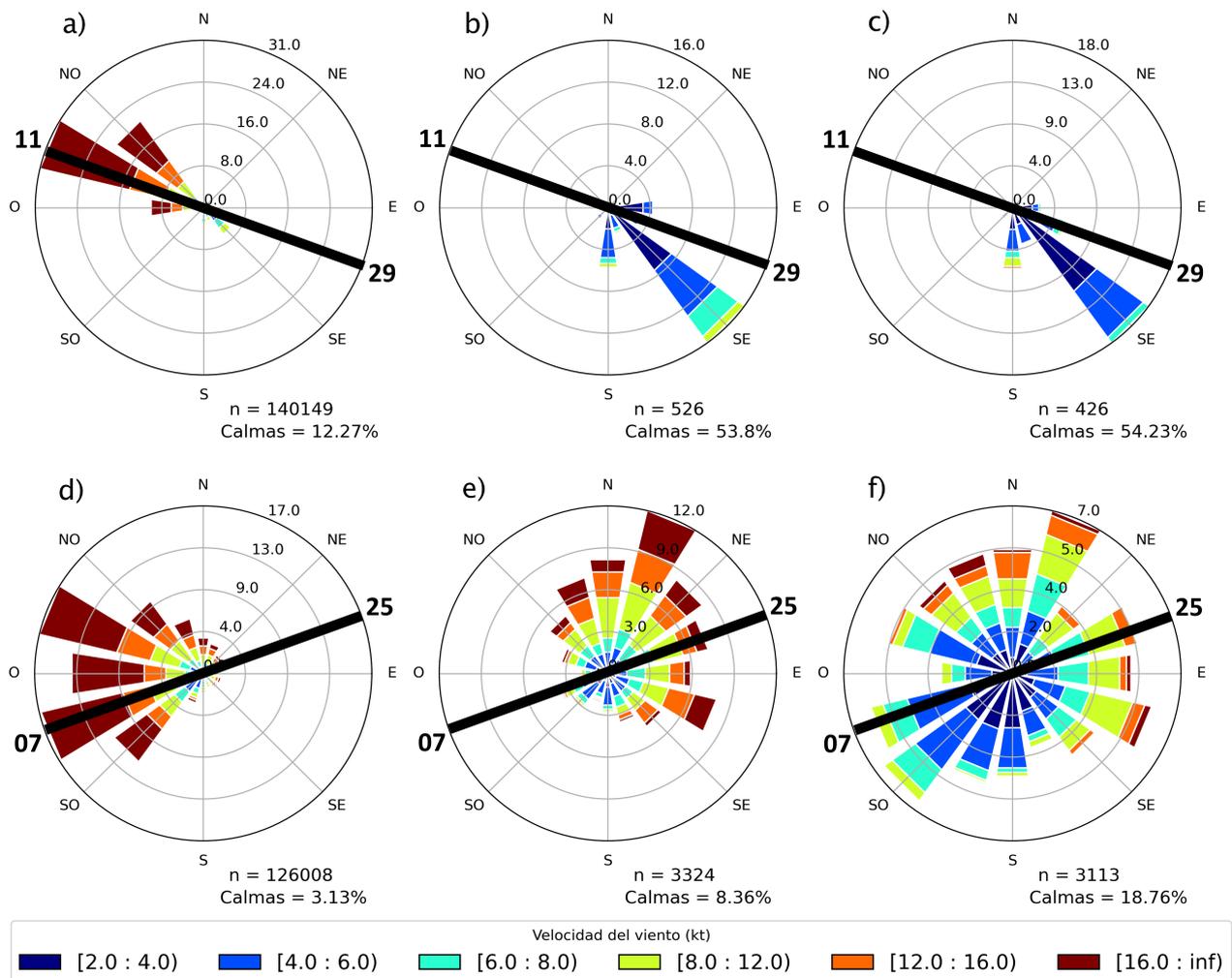


Figura 8: Rosa de los vientos (% , velocidad del viento en kt) para el período 2000-2019 en el aeropuerto de Bariloche (a,b,c) y Río Grande (d,e,f), considerando: todos los reportes (a,d), los reportes con neblina (b,e) y los reportes con niebla (c,f). Debajo de cada diagrama, se indica en texto el porcentaje de vientos calmos y la cantidad de reportes utilizados para cada gráfico (n). La línea negra sólida que atraviesa el diagrama corresponde a la orientación de la pista de aterrizaje del aeropuerto y sus correspondientes números de cabecera.

utiliza la cabecera 29 y se requiere de 800 m de visibilidad para poder aterrizar. La elección de esta orientación se encontraría beneficiada por la dirección climatológica de los vientos ya que predominan los vientos del ONO (Fig. 8), es decir, de frente al avión para los despegues. No obstante, el comportamiento del viento durante las horas de visibilidad reducida es contrario, con dirección dominante del ESE (Fig. 8), y esto podría derivar un cambio de cabecera, pasando a ser la 11 la utilizada para los aterrizajes.

Esta cabecera, al no contar con ILS, requiere de al menos 1800 m de visibilidad para que los aviones puedan aterrizar en esta orientación. Esto sugiere, que con respecto a las condiciones de falta de visibilidad debido a niebla, el ILS presente en la pista no sería de utilidad en ciertas circunstancias.

El caso del aeropuerto de Río Grande es análogo al de Bariloche, con ILS instalado para permitir operaciones instrumentales por la cabecera 25 de

forma solidaria a los vientos climatológicos. Por el contrario, en horas de visibilidad reducida, en este aeropuerto se encontraron vientos fuertes provenientes desde la dirección opuesta (entre N y E, Fig. 8e y f). Estos vientos sí podrían conducir a la necesidad de utilizar la cabecera 07 tanto para despegues como para aterrizajes y este cambio requeriría que la visibilidad reducida supere el valor de 2700 m sobre la pista.

3.5. SIMULTANEIDAD Y PROBLEMÁTICA OPERATIVA

Para los pronosticadores responsables de actividades aeronáuticas, el problema más grave respecto de la ocurrencia de visibilidad reducida recaería en la niebla persistente en el tiempo (días enteros) y en la niebla generalizada que afecta tanto al aeropuerto principal como también a todos los aeropuertos alternativos o cercanos (Yabra y otros, 2021a). En esta instancia, este trabajo se concentra en el segundo caso. En el plan operacional de vuelo y en el plan de vuelo ATS (Servicio de Tránsito Aéreo, por sus siglas en inglés) se seleccionan y especifican al menos dos aeródromos de alternativa de destino cuando las condiciones meteorológicas de visibilidad, a la hora prevista de su utilización, estarán por debajo de los valores mínimos de operación del aeropuerto (llamado “condiciones de bajo mínimos”) o no se dispone de información meteorológica en el aeródromo de destino (OACI, Anexo 6). Dichos planes son establecidos por cada aerolínea según los convenios acordados con los distintos aeropuertos. Por lo tanto, cada vuelo tiene predefinidos sus aeropuertos alternativos para el caso en que el aeropuerto de destino se encuentre cerrado o saturado.

La exploración de la simultaneidad de eventos de niebla o neblina en diferentes aeropuertos ofrece centenares de combinaciones posibles que podrían ser de sumo interés para casos particulares. El presente trabajo se concentra, dentro del conjunto de aeropuertos analizados, en aquellos con mayor cantidad de movimientos diarios y sus alternativos: Ezeiza, Aeroparque,

Montevideo y Córdoba. Considerando la mayor cantidad de movimientos anuales (ANAC, 2019b), la situación más problemática sería el cese de operaciones por condiciones de bajo mínimos en Aeroparque. Como la categoría de este aeropuerto con respecto al tamaño de aeronaves que puede recibir (ver Apéndice B) es la menor con respecto a los otros tres aeropuertos mencionados, los vuelos con este destino podrían operar en cualquiera de los restantes siempre que éstos no estuvieran también en condiciones de bajo mínimos. Notar que para este análisis no se consideran los mínimos meteorológicos de cada aeropuerto sino que sólo se considera la presencia de niebla (visibilidad menor a 1000 m por niebla o neblina) en cada uno. Las probabilidades de que esta última condición ocurra se detallan en la Tabla III. Por ejemplo, dadas las condiciones en las que Aeroparque se encuentra afectado por niebla, los aeropuertos que tienen mayor probabilidad de también estarlo son Ezeiza (caso 1) y Montevideo (caso 2), con valores alrededor de 45 % y 37 %, respectivamente. La Tabla III también nos muestra casos en que se den tres y cuatro aeropuertos con niebla simultáneamente. Por ejemplo, la probabilidad de que haya niebla simultáneamente en Ezeiza y Montevideo dado que hay niebla en Aeroparque (caso 4, alrededor de 23 %) es mayor que la probabilidad de que haya niebla en el aeropuerto de Córdoba con la misma condición (caso 3, en torno al 6,7 %).

Si se considera la mayor frecuencia de ocurrencia de niebla (Tabla II), la situación más problemática sería el cese de operaciones en Ezeiza. Como su categoría es la mayor (ver Apéndice B), no todos los vuelos van a poder ser desviados a los aeropuertos restantes, particularmente a Aeroparque. Por otro lado, la problemática en el aeropuerto de Ezeiza ocurre en condiciones extremas de baja visibilidad, ya que su mínimo es el menor de todos los aeropuertos (200 m), por lo tanto, si se trata de una niebla generalizada espacialmente, es probable que los aeropuertos cercanos (Aeroparque y Montevideo) también se encuentren bajo mínimos y, por ende,

Caso	SAEZ	SUMU	SACO	a. Probabilidad condicional	b. Probabilidad sin condicionar
1	x			38% (35% - 43%) (191/492)	1,90% (1,85% - 1,96%) (3185/167256)
2		x		35% (31% - 39%) (169/484)	1,57% (1,52% - 1,62%) (2609/166357)
3			x	5,1% (3,6% - 7,2%) (25/487)	0,55% (0,52% - 0,58%) (907/164986)
4	x	x		20% (16% - 23%) (94/474)	0,38% (0,36% - 0,41%) (618/162607)
5		x	x	1,5% (0,7% - 2,9%) (7/471)	0,036% (0,03% - 0,04%) (57/160429)
6	x		x	1,1% (0,4% - 2,3%) (5/477)	0,054% (0,05% - 0,07%) (88/161924)
7	x	x	x	0,43% (0,09% - 1,47%) (2/461)	0,01% (0,006% - 0,015%) (15/157565)

Tabla III: a) Probabilidad de que haya niebla simultáneamente en los aeropuertos marcados con una 'x' dada la condición de que hay niebla en Aeroparque y b) probabilidad de que haya niebla simultáneamente en los aeropuertos marcados con una 'x', en cada caso (casos 1-3 no incluyen simultaneidad con ningún otro aeropuerto). Entre paréntesis se muestra el intervalo de confianza al 90 % y la relación que condujo a la elaboración de las probabilidades: a) cantidad de reportes con niebla simultáneamente en los aeropuertos marcados con 'x' sobre, la cantidad de reportes con niebla en Aeroparque acotada a aquellas horas en que coincidentemente haya reportes en los aeropuertos marcados, b) cantidad de reportes con niebla simultáneamente en los aeropuertos marcados con 'x' sobre, la cantidad total de reportes simultáneos en dichos aeropuertos. Los intervalos de confianza se calcularon de acuerdo a la metodología mencionada en la Sección 2.3.

cerrado para todo tipo de operaciones. Las probabilidades de que otros aeropuertos se encuentren afectados por niebla dado que el aeropuerto de Ezeiza lo está se detallan en la Tabla IV, junto con las probabilidades absolutas de que dichos aeropuertos sean afectados por niebla. Se puede observar que los valores de las probabilidades condicionales son notablemente inferiores a los correspondientes a la condición de niebla en Aeroparque (Tabla III). Por ejemplo, la probabilidad de que haya niebla en el aeropuerto de Ezeiza dado que hay niebla en Aeroparque es 45 % pero, por el contrario, la probabilidad de que haya niebla

en Aeroparque dado que hay niebla en el aeropuerto de Ezeiza es 8 %. Si bien refieren a horas simultáneas de niebla (son 298 reportes en ambos casos), esta diferencia entre ambas probabilidades condicionales se relaciona con la diferencia en la probabilidad absoluta de ocurrencia, 6 veces más grande en Ezeiza respecto de Aeroparque. El aeropuerto que tiene mayor probabilidad de estar afectado por niebla dado que el aeropuerto de Ezeiza lo está, es el de Montevideo (alrededor del 22 %) seguido de Aeroparque y Córdoba con menos de la mitad de probabilidades (8 % y 3,7 %, respectivamente). La ocurrencia de niebla en Ezeiza y Montevideo

resulta problemática, ya que en ocasiones no todas las aeronaves que allí operan pueden aterrizar en Aeroparque por el tamaño de las mismas o no pueden aterrizar en Córdoba por no tener convenio comercial.

4. CONCLUSIONES

Este trabajo aborda la problemática de la visibilidad reducida por niebla en 13 aeropuertos argentinos y 1 uruguayo desde un punto de vista climatológico. Para llevarlo a cabo se analizaron 20 años (2000-2019) de reportes aeronáuticos horarios METAR, generados por la red de observaciones en superficie del SMN en el caso de Argentina y del INUMET en el caso de Uruguay, y almacenados en la base de datos ISD de la NOAA. Si bien se encontraron otras bases de datos que contenían esta información, se eligió dicha base ya que presentó el período más largo de reportes en el total de los aeropuertos seleccionados. La manipulación de este tipo de datos observacionales y su análisis junto con las normativas de la OACI, ANAC, el conocimiento de la lógica de los Planes de Labor de los observadores meteorológicos del SMN, junto a los usos y costumbres (desvíos establecidos a lo largo del tiempo de las sugerencias de OACI), permitió establecer una serie de consideraciones que deben tenerse en cuenta a la hora de analizar los resultados, ya que la lectura literal de éstos puede conducir a conclusiones erróneas. El criterio de selección de reportes METAR con nieblas y con neblinas permitió caracterizar la ocurrencia de estos fenómenos en los diferentes aeropuertos. Si bien en este trabajo sólo se consideró la visibilidad y tiempo presente en el desarrollo de dicho criterio, la cuantificación de la humedad será considerada para la selección de eventos de niebla/neblina en futuros estudios.

Primero, se estudió la influencia de la niebla dentro de otros fenómenos meteorológicos que pueden causar la reducción de visibilidad y, en efecto, se le atribuye la mayor cantidad de casos, seguido de la presencia de precipitación y de litometeoros. Dados los distintos entornos geográficos que presentan los aeropuertos

seleccionados, se estudió la cantidad de días por año con niebla y neblina, y la cantidad de horas por día con dichos fenómenos. Los resultados mostraron un amplio abanico de valores entre los distintos aeropuertos. Los aeropuertos de Mar del Plata, Ezeiza, Río Grande y Montevideo fueron los que presentaron mayor cantidad de días con niebla y neblina por año, mientras que Ushuaia, Bariloche y Neuquén fueron los que menos días presentaron. Respecto de la cantidad de horas promedio en cada uno de esos días, Ushuaia, Ezeiza, Río Grande y Mar del Plata arrojaron la mayor cantidad promedio de horas por día con niebla, y Rosario, Aeroparque, San Fernando y Montevideo también lo hicieron, pero en el caso de neblina. El análisis de la distribución anual y diaria de las frecuencias de ocurrencia mostró al menos dos patrones definidos. El primero, encontrado en los aeropuertos continentales como Ezeiza, Resistencia y Bariloche, concentra las máximas frecuencias en las horas cercanas al amanecer (entre 5 y 10 de la mañana) y en los meses más fríos (entre mayo y agosto). El segundo, encontrado en los aeropuertos cercanos a la costa Atlántica o del Río de la Plata como Aeroparque, Río Grande y Río Gallegos, no presenta un determinado rango horario predominante pero sí es más frecuente en los meses invernales. Aeropuertos como Mar del Plata o Montevideo aun siendo costeros, presentaron patrones de ocurrencia más similares al de los aeropuertos continentales, y Neuquén presentó una distribución anual con un inusual máximo en mayo que sólo fue encontrado en menor medida en Bariloche.

Este trabajo se propuso enfocar el estudio climatológico de la niebla y neblina a las necesidades que requieren las operaciones aeronáuticas. En este sentido, se realizaron distintos análisis que relacionan los factores meteorológicos con la infraestructura de los aeropuertos. Por un lado, se estudió el comportamiento del viento que acompaña a la visibilidad reducida por estos fenómenos y se los comparó con el viento climatológico. En

Caso	SABE	SUMU	SACO	a. Probabilidad condicional	b. Probabilidad sin condicionar
1	x			6,3% (5,6% - 7,1%) (191/3022)	0,31% (0,29% - 0,34%) (502/160613)
2		x		20% (19% - 21%) (618/3078)	1,57% (1,52% - 2,62%) (3240/166357)
3			x	2,8% (2,3% - 3,4%) (88/3115)	0,55% (0,52% - 0,58%) (907/164986)
4	x	x		3,2% (2,7% - 3,8%) (94/2925)	0,11% (0,09% - 0,12%) (169/156306)
5		x	x	0,5% (0,3% - 0,8%) (15/3014)	0,036% (0,03% - 0,04%) (57/160429)
6	x		x	0,17% (0,07% - 0,37%) (5/2969)	0,016% (0,01% - 0,02%) (25/156426)
7	x	x	x	0,07% (0,01% - 0,24%) (2/2875)	0,004% (0,002% - 0,009%) (7/152338)

Tabla IV: Ídem Tabla III pero dada la condición de que haya niebla en el aeropuerto de Ezeiza.

aeropuertos como Bariloche, Río Gallegos y Río Grande, la dirección del viento durante la reducción de visibilidad es distinta, y hasta opuesta a la climatológica. Por otro lado, se relacionaron las posiciones de los ILS, que permiten el aterrizaje de aeronaves en condiciones de baja visibilidad, junto con las componentes de viento en cada caso y se encontró que estos instrumentos se encuentran instalados en las cabeceras de las pistas más utilizadas considerando los vientos climatológicos. El viento presente en las horas de visibilidad reducida, principalmente en el aeropuerto de Río Grande, indicaría utilizar la cabecera opuesta para los aterrizajes, la cual no cuenta con instrumental y requiere de mayor visibilidad para poder efectuarlo.

Por último, se trabajó con otra de las grandes problemáticas que tiene la meteorología aeronáutica, mayormente vinculada al pronóstico y la elaboración de planes de vuelo, que es la reducción de visibilidad de

forma simultánea en aeropuertos cercanos o alternativos entre sí. Para el análisis se seleccionaron los aeropuertos con mayores movimientos y sus destinos alternativos: Aeroparque, Ezeiza, Montevideo y Córdoba. El aeropuerto con más probabilidades de estar afectado por niebla cuando Aeroparque lo está es Ezeiza, mientras que el aeropuerto con más probabilidades de estar afectado por niebla cuando Ezeiza lo está es Montevideo. La inclusión de Córdoba disminuye las probabilidades de ocurrencia simultánea de niebla respecto de los restantes aeropuertos, convirtiendo a este aeropuerto en un destino alternativo factible en este aspecto. Estos resultados ilustran la complejidad a la hora de determinar qué aeropuertos pueden ser los destinos alternativos de cada vuelo, en caso de que a la hora del aterrizaje dicho aeropuerto se encuentre en condiciones de bajo mínimos meteorológicos.

Este trabajo contribuye a una temática de

fundamental importancia para las tareas operativas de los aeropuertos y además constituye información básica para futuros desarrollos claves para la industria. Un detallado conocimiento del fenómeno conducirá eventualmente a mejoras en las técnicas de pronóstico y vigilancia aeronáutica, y por esta razón es necesario continuar con el estudio de los mecanismos que intervienen en la formación, evolución y disipación de las nieblas en Argentina.

Agradecimientos: Los autores agradecen a los expertos en la temática, observadores y pronosticadores meteorológicos aeronáuticos del SMN y de Aerolíneas Argentinas, por los aportes de sus conocimientos adquiridos en experiencia de la práctica operativa. Este trabajo fue realizado en el marco de una Tesis Doctoral en Ciencias de la Atmósfera y los Océanos de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires, Argentina, con sede en el SMN, y financiada por el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación de la Nación Argentina.

ANEXOS

ANEXO A – CODIFICACIÓN DE REPORTE METAR

Como ejemplo, en la Tabla V se puede ver la decodificación para el siguiente reporte con visibilidad reducida por niebla, correspondiente al lunes 10 de mayo del 2021 a las 09:00 UTC en el aeropuerto de Ezeiza: METAR SAEZ 100900Z 24003KT 1200 R11/1300N BR SCT001 BKN200 08/08 Q1021

ANEXO B – INFRAESTRUCTURA DE LOS AEROPUERTOS

Cuando se trata de operatoria, la comparación entre distintos aeropuertos debe incluir otros

aspectos que aumentan la complejidad. Es importante mencionar que, no todos los aeropuertos cuentan con la infraestructura necesaria para la operatoria de todo tipo de aeronaves. Por eso, en el Anexo 14 (OACI, 2018) se dispone otra categorización (Clave de Referencia) de los aeropuertos de acuerdo a la longitud del campo de referencia del avión (número del 1 al 4) y a la envergadura del avión (longitud entre los extremos de las alas) o en la anchura exterior entre las ruedas del tren de aterrizaje principal (lo que dé el mayor valor crítico, letra de la A a la F). Por campo de referencia del avión se refiere a longitud de campo mínima necesaria para el despegue del avión con la masa máxima certificada para esta operación al nivel del mar, en atmósfera tipo, sin viento y con pendiente de pista cero. 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 aeropuertos, a fin de suministrar una serie de instalaciones aeroportuarias que convengan a los aviones destinados a operar en ellos. La letra o número de la clave está relacionado con el mayor campo de referencia y la mayor envergadura que puede tener una aeronave para que pueda operar con dicha infraestructura aeroportuaria.

En la Sección 2 también se describe otra categorización de los aeropuertos respecto de la mayor categoría de vuelos que pueden llegar a operar haciendo referencia al instrumental y la infraestructura disponibles para el despegue, aterrizaje y traslados sobre las pistas en condiciones adversas de visibilidad (diferentes umbrales de visibilidad mínima). La Tabla VI muestra las categorías (<https://www.aa2000.com.ar/> accedido el 10/12/21) y los umbrales de visibilidad mínima de cada cabecera (<http://ais.anac.gov.ar/aip> accedido el 30/10/21) de los aeropuertos seleccionados para el análisis realizado en las Secciones 3.4 y 3.5.

REFERENCIAS

Afonso, J. M. S., Levit, V., Fedorova, N.,

Grupo dentro del mensaje	Indicación	Significado
METAR	Tipo de reporte	METAR
SAEZ	Estación meteorológica aeronáutica	Aeropuerto de Ezeiza
100900Z	Día, hora y minutos	Día 10 a las 9:00 UTC
24003KT	Dirección y velocidad del viento	240° (OSO) a 3 kt
1200	Visibilidad	1200 m
R11/1300N	Cabecera y alcance visual en pista (RVR)	En la cabecera de la pista 11 hay 1300 m
BR	Tiempo presente	Neblina
SCT001 BKN200	Nubosidad	3-4 octavos a 100 pies; 5-7 octavos a 20.000 pies (sobre el nivel de la estación)
08/08	Temperatura del aire y del punto de rocío	8°C y 8°C
Q1021	Presión al nivel del mar	1021 hPa

Tabla V: Ejemplo de decodificación de un reporte METAR.

Aeropuerto	Categoría	Pista	Visibilidad mínima
Aeroparque - SABE	CAT II 4C	13	750 m (RVR 750 m)
		31	2600 m
Ezeiza - SAEZ	CAT III A 4E	11	200 m (RVR 200 m)
		29	1400 m
		35	800 m
		17	2300 m
Córdoba - SACO	CAT III A 4E	01	3100 m
		05	1500 m
		19	550 m (RVR 550 m)
		23	1700 m
Montevideo - SUMU	CAT I 4E	01	1200 m
		24	800 m
		19	800 m (RVR 550 m)
		06	1600 m
Bariloche - SAZS	CAT I 4E	29	800 m (RVR 550 m)
		11	1899 m
Río Grande - SAWE	CAT I 4C	26	1200 m
		08	1500 m

Tabla VI: Detalle de los aeropuertos seleccionados (Anexo B).

- 2019: Estudo de baixa visibilidade no aeroporto de Porto Alegre: processos sinóticos e termodinâmicos. *Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais*, v.10, n.6, p.131-145, 2019. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2019.006.0012>
- ANAC, 2016: Regulaciones argentinas de aviación civil (RAAC), parte 91: Reglas de vuelo y operación general. 4ta edición. Fecha de efectividad de la presente: 16 de DICIEMBRE del 2016 http://www.anac.gov.ar/anac/web/uploads/normativa/raac/raac_vigentes_por_parte/parte-91-r-1131-16.pdf
- ANAC, 2019a: Publicación de Información Aeronáutica (AIP). Gen 4-Categorías de actuación operacional en aproximaciones de precisión. Fecha de efectividad de la presente: 18 de JULIO de 2019. <https://ais.anac.gov.ar/descarga/aip-5ce6f78a42c55>
- ANAC, 2019b: Anuario estadístico 2019. <https://datos.anac.gov.ar/estadisticas/article/055dd8be-984f-4c3cb2ae-ce5037902295>
- ANAC, 2019c: Manual de piloto privado de avión. <http://www.anac.gov.ar/anac/web/uploads/aviaciongeneral/2019/manual-del-piloto-privado-de-avi-n-2019-digital.pdf>
- ANAC, 2022: Publicación de Información Aeronáutica (AIP). Gen 3.5-Servicios Meteorológicos
- Byers, H. R., 1960: *General Meteorology*. New York (McGraw-Hill), 3rd Edition, 1959. Pp. x. 540; 223 Figs.; 10 Tables. 74s. Q.J.R. Meteorol. Soc., 86: 123-123. <https://doi.org/10.1002/qj.49708636716>
- Carrera, M. L., J. R. Gyakum, y C. A. Lin, 2009: Observational study of wind channeling within the St. Lawrence River valley. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 48, 2341–2361.
- Cook, L., B. Wood, A. Klein, R. Lee, and B. Memarzadeh, 2009: Analyzing the share of individual weather factors affecting NAS performance using the weather impacted traffic index. In AIAA 2009-7017. 9th AIAA aviation technology, integration, and operations conference (ATIO), Hilton Head, SC, September 2009. <https://doi.org/10.2514/6.2009-7017>
- Decreto 1689, 2016: Dispónese la transferencia del Servicio Meteorológico Nacional, al ámbito de la Secretaría de Planeamiento del Ministerio de Defensa, a partir del 1º de enero de 2007. Presidencia de la Nación Argentina. Firmado el 22/11/2006. <http://servicios.infoleg.gov.ar/infolegInternet/anexos/120000-124999/122437/norma.htm>
- Dines, W. H., 1917: *Meteorology and aviation*. *Monthly Weather Review*, 45, 401. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1917\)45\%3c401b:MAA\%3e2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1917)45\%3c401b:MAA\%3e2.0.CO;2)
- Fedorova, N., Levit, V., Silva A.O., Santos D.M.B., 2013: Low Visibility Formation and Forecasting on the Northern Coast of Brazil. *Pure and Applied Geophysics*, 170(4), 689–709.
- González-Viveros P., Caetano E., García-García F., 2018: Characterization and modeling of fog in the Mexico basin. *AEROSOL AIR QUAL RES* 18 79-90.
- Gultepe, I., G. Pearson, J.A. Milbrandt, B. Hansen, S. Platnick and P. Taylor, 2009: The fog remote sensing and modeling (FRAM) field project. *Bulletin of American Meteorological Society*, 90, 341–359. DOI: 10.1175/2008BAMS2354.1
- Gultepe, I., G. A. Isaac, P. Joe, P. Kucera, J. Thériault and T. Físico, 2014a: Roundhouse (RND) mountain top research site: Measurements and uncertainties for winter alpine weather conditions. *Journal of Pure and Applied Geophysics*. <https://doi.org/10.1007/s00024-012-0582-5>
- Gultepe, I., T. Kuhn, M. Pavolonis, C. Calvert, J. Gurka, and G.A. Isaac, 2014b: Ice fog in Arctic during FRAMIF project: Aviation and nowcasting applications. *Bulletin of American Meteorological Society*, 95, 211–226. DOI: 10.1175/BAMS-D-11-00071.1
- Gultepe, I., A. J. Heymsfield, P.R. Field and D. Axisa, 2017: Ice-phase precipitation. *Meteorological Monographs*, 58, 6.1–6.36. <https://doi.org/10.1175/AMSMONOGRAPHIS-D-16-0013.1>
- Hodges, D., and Z. Pu, 2015: The climatology, frequency, and distribution of cold season fog

- events in northern Utah. *Pure and Applied Geophysics*, 173, 3197–3211. <https://doi.org/10.1007/s00024-015-1187-6>
- Haeffelin, M., T. Bergot, T. Elias, R. Tardif, D. Carrer, P. Chazette, M. Colomb, P. Drobinski, E. Dupont, J. Dupont, L. Gomes, L. Musson-Genon, C. Pietras, A. Plana-Fattori, A. Protat, J. Rangognio, J. Raut, S. Rémy, D. Richard, J. Sciare, and X. Zhang, 2010: Paris Fog. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 91, 767–783, <https://doi.org/10.1175/2009BAMS2671.1>
- Kulkarni, R., Jenamani, R. K., Pithani, P., Konwar, M., Nigam, N., Ghude, S. D., 2019: Loss to Aviation Economy Due to Winter Fog in New Delhi during the Winter of 2011-2016. *Atmosphere*, vol. 10, issue 4, p. 19.
- Isaac, G. A., Bullock, T., Beale, J., Beale, S., 2020: Characterizing and Predicting Marine Fog Offshore Newfoundland and Labrador, *Weather and Forecasting*, 35(2), 347-365. Retrieved Jun 2, 2022. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-19-0085.1>
- Lapido, B., 2019: Estudio preliminar de niebla en el aeropuerto de la ciudad de Rosario. Tesis de Licenciatura, Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires.
- Milke J. A., 2000: Evaluating the smoke hazard from fires in large spaces. *International Journal on Engineering Performance-Based Fire Codes*, Volume 2, Number 3, págs.94-103.
- Nabavi, S. O., 2016: Global Assessment of Sand and Dust Storms (Dust Storms in the West Asia Region). 8. Appendix: Case Studies
- OACI, 2004: European guidance material on integrity demonstration in support of certification of ILS and MLS systems. 1st edition.
- OACI, 2010: Catálogo de datos OPMET disponibles en el Banco Internacional de datos OPMET de Brasilia. 4ta edición.
- OACI, 2016a: Anexo 3: Servicio Meteorológico para la navegación aérea internacional. 20a edición.
- OACI, 2016b: Anexo 6: Operación de Aeronaves.
- Parte II: Aviación general internacional - Aviones. 9na edición.
- OACI, 2018: Anexo 14: Aeródromos. Vol I: Diseño y operaciones de aeródromos. 8va edición.
- OMM, 1966: Reglamento Técnico N° 49. Anexo I: Atlas Internacional de Nubes (N° 407), Manual de observación de nubes y otros meteoros.
- OMM, 2008: Guía de instrumentos meteorológicos y métodos de observación..
- OMM, 2014: Guía de sistemas meteorológicos de observación y distribución de información para los servicios meteorológicos aeronáuticos.
- OMM, 2015: Manual del Sistema Mundial de Telecomunicación. Anexo III al Reglamento Técnico de la OMM. Actualización de 2020.
- OGIMET, 2021: Información profesional de las condiciones meteorológicas en todo el mundo. <https://www.ogimet.com/>, accedido el 30 octubre 2021.
- Piccolo, M. C., 1983: Resultados preliminares de un estudio de niebla en Río Grande. *Meteorológica*. Vol. XIV. N° 1 y 2. Págs. 213 a 224.
- Pilie, R.J., E.J. Mack, W.C. Kocmond, C.W. Rogers and W.J. Eadie, 1975: The life cycle of valley fog. Part I: Micrometeorological characteristics, *J. Appl. Meteor.* 14, 347–363. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1975\)014\(0347:TLCOVF\)2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1975)014(0347:TLCOVF)2.0.CO;2)
- Quinteros de Menzies, C. Y., Obertello, I., 1972: Pronóstico objetivo de niebla en Ezeiza. Publicación de la Fuerza Aérea Argentina, Comando de regiones aéreas, Servicio Meteorológico Nacional, Serie C, 12, 32 páginas.
- Roach, W.T., 1995: Back to basics: Fog: Part 3 - The formation and dissipation of sea fog. *Weather*, 50, 80-84.
- Rodriguez, E., C.S. Morris, J.E. Belz, E. Chapin, J. Martin, W. Daffer and S. Hensley, 2005: An assessment of the SRTM topographic products. Technical Report JPL D-31639. Rolph G., Stein A., Stunder B., 2017: Realtime Environmental Applications and Display sYstem: READY,

- Environmental Modelling Software, Volume 95, 2017, Pages 210-228, ISSN 1364-8152, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.06.025>.
- Rudra, R., W.T. Dickinson, S. I. Ahmed, P. Patel, J. Zhou, and B. Gharabaghi, 2015: Changes in rainfall extremes in Ontario. *International Journal of Environment Research*, 9(4), 1117–1372.
- Ruiz, J., T. Schonholz y C. Saulo, 2018: Generación de pronósticos probabilísticos de visibilidad a partir de pronósticos numéricos retrospectivos y observaciones. *Meteorologica Vol 43 N°1* (2018), 73-96. http://www.meteorologica.org.ar/wp-content/uploads/2018/07/Ruiz_y-otros_Vol43N1.pdf
- Schonholz, T., 2014: Desarrollo de una técnica objetiva para la generación de pronósticos probabilísticos de umbrales de visibilidad empleando pronósticos retrospectivos en la estación Ezeiza. Tesis de Licenciatura, Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires.
- Smith, A., N. Lott, y R. Vose, 2011: The Integrated Surface Database: Recent Developments and Partnerships. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 92, 704–708, doi:10.1175/2011BAMS3015.1
- Stolaki, S.N., Kazadzis, A.S., Foris, D.V., Karacostas, T.S., 2009: Fog characteristics at the airport of Thessaloniki, Greece, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 9, 1541-1549
- Tardif, R., 2017: Precipitation and Fog. Book chapter in Koracin, D., and C. E. Dorman, eds. *Marine Fog: Challenges and Advancements in Observations and Forecasting*. Springer Publ.
- Tardif, R., and R. M. Rasmussen, 2007: Event-based climatology and typology of fog in the New York City region. *Journal of Applied Meteorology Climatology*, 46, 1141–1168. <https://doi.org/10.1175/JAM2516.1>
- Tardif, R., and Rasmussen, R. M., 2008: Process-oriented analysis of environmental conditions associated with precipitation fog events in the New York City region. *Journal of Applied Meteorology And Climatology*, 47, 1681-1703. doi:10.1175/2007JAMC1734.1
- Teixeira, J. and Miranda, P. M. A., 2001: Fog prediction at Lisbon Airport using a one-dimensional boundary layer model. *Meteorol. Appl.* 8, 497–505.
- Todey, D.P., D.E. Herzmann, and G.S. Takle, 2002: The Iowa Environmental Mesonet – combining networks into a single network. Preprints 6th Symposium on Integrated Observing Systems, Orlando, FL, Amer. Meteor.Soc.
- Tuncay Özdemir, E., Deniz, A., Sezen, İ., Mentş, Ş. S., Yavuz, V., 2016: Fog analysis at Istanbul Ataturk International Airport. *Weather*, 71(11), 279–284. doi:10.1002/wea.2747
- Vasques Ferro, R. y C. Ribero, 2015: Formación de niebla en Aeroparque Jorge Newbery. XII CONGREGMET, Mar del Plata, Argentina.
- Wallis S., 2013: Binomial Confidence Intervals and Contingency Tests: Mathematical Fundamentals and the Evaluation of Alternative Methods, *Journal of Quantitative Linguistics*, 20:3, 178-208, DOI: 10.1080/09296174.2013.799918
- White, W.H. and P.T. Roberts, 1967: On the nature and origins of visibility-reducing aerosols in the Los Angeles air basin. *Atmospheric Environment*, 11(9), 0–812. doi:10.1016/0004-6981(77)90042-7
- Yabra, M. S., R. de Elia, L. Vidal, M. Nicolini, R. Vasques Ferro, C. Ribero, L. Chiapparri, E. Fernández, C. Campetella, O. Bonfili, M. Ceballos, G. Barrera, N. Troche, V. López, M. Schizzano, N. Bentancor, L. Berengua, M. Steven, 2021a: Las niebla en los aeropuertos argentinos: revisión de literatura y perspectiva de los pronosticadores. *Nota Técnica SMN 2021-89*. <http://hdl.handle.net/20.500.12160/1540>
- Yabra, M. S., R. de Elia, L. Vidal, M. Nicolini, 2021b: Estudio climatológico de visibilidad reducida por niebla y neblina en aeropuertos argentinos. *Nota Técnica SMN 2021-106*. <http://hdl.handle.net/20.500.12160/1698>
- Yabra, M. S., R. de Elia, L. Vidal, M. Nicolini, 2021c: Características climatológicas de

las niebla en aeropuertos argentinos.
XIX Reunión Científica de la Asociación
Argentina De Geofísicos Y Geodestas, Agosto
2021, Ciudad de Mendoza, Argentina.

Zhang, J., P. Zhao, X. Wang, J. Zhang, J.
Liu, B. Li, Y. Zhou, H. Wang, 2020: Main
Factors Influencing Winter Visibility at the
Xinjin Flight College of the Civil Aviation
Flight University of China, Advances in
Meteorology, vol. 2020, Article ID 8899750,
13 pages, 2020. [https://doi.org/10.1155/
2020/8899750](https://doi.org/10.1155/2020/8899750)