

Las nieblas en los aeropuertos argentinos: revisión de literatura y perspectiva de los pronosticadores

Nota Técnica SMN 2021-89

Melina Sol Yabra¹, Ramón de Elia¹, Luciano Vidal¹, Matilde Nicolini^{2,3}, Roxana Vasques Ferro¹, Claudia Ribero¹, Luciano Chiaparri¹, Eduardo Fernández⁴, Claudia Campetella^{1,2}, Oscar Bonfili¹, Marcelo Ceballos¹, Gerardo Barrera¹, Noemí Troche¹, Viviana López¹, Mónica Schizzano¹, Natalí Bentancor⁵, Lucas Berengua¹, Mary Steven¹

¹ *Servicio Meteorológico Nacional*

² *Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires*

³ *Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera, CONICET-UBA.*

⁴ *Aerolíneas Argentinas*

⁵ *Instituto Nacional Uruguayo de Meteorología*

Abril 2021

Información sobre Copyright

Este reporte ha sido producido por empleados del Servicio Meteorológico Nacional con el fin de documentar sus actividades de investigación y desarrollo. El presente trabajo ha tenido cierto nivel de revisión por otros miembros de la institución, pero ninguno de los resultados o juicios expresados aquí presuponen un aval implícito o explícito del Servicio Meteorológico Nacional.

La información aquí presentada puede ser reproducida a condición que la fuente sea adecuadamente citada.

Resumen

La meteorología tiene un rol fundamental dentro de la industria aeronáutica, ya que constituye uno de los principales factores que causan o contribuyen a incidentes y accidentes en la aviación. Una de las condiciones más perjudiciales para esta actividad es la formación de nieblas o neblinas sobre la pista, ya que la consecuente reducción de visibilidad por debajo de sus correspondientes umbrales es condición suficiente para la interrupción de las operaciones de un aeropuerto. Numerosos estudios se han dedicado a analizar este fenómeno alrededor del mundo, pero su investigación en Argentina es limitada a pesar de las grandes complicaciones que trae desde hace décadas. Sin embargo, se ha considerado como una importante fuente de información el aporte de los conocimientos adquiridos a través de la experiencia de aquellas personas que se dedican o dedicaron a la observación y el pronóstico de las nieblas en los aeropuertos argentinos. En esta Nota Técnica, se recopilan los resúmenes de los trabajos nacionales realizados previamente sobre la formación de nieblas en los aeropuertos, y se añaden los mencionados aportes obtenidos a partir de entrevistas individuales. Se entrevistó a quince expertos, lo cual permitió profundizar en las características observacionales y en los hipotéticos mecanismos que dan lugar a la reducción de visibilidad por nieblas en cada uno de los aeropuertos argentinos más afectados: Ezeiza, Aeroparque, Mar del Plata, Rosario, Resistencia, Iguazú, Córdoba, Neuquén, Bariloche, Rio Gallegos, Rio Grande, Ushuaia y Base Antártica Marambio. Además, se realizó una revisión de los métodos y herramientas más utilizados por los pronosticadores a la hora de predecir la formación, evolución y finalización de un evento de niebla. De esta forma, este trabajo permitió asentar las bases y perspectivas generales para futuras investigaciones sobre este fenómeno a nivel nacional.

Abstract

Atmospheric conditions play a crucial role in the aviation industry, due to its responsibility in delays and accidents. Particularly, fogs and mists over the runway are two of the most damaging phenomena for this economic activity, since the reduced visibility is a sufficient condition to stop airport operations. Worldwide efforts continue to move forward on fog and mist event characterization, but development in this area is very limited in Argentina regardless of the historical complications that it has brought to the operational activity. An unusual source of information was considered for this technical note: knowledge acquired through experience in aeronautical observations and forecasts. This review paper summarizes past national achievements related to understanding the behavior of reduced visibility produced by fog or mist, and compliments them with the oral legend obtained in personal interviews. Fifteen interviews with experts were made, which allowed to go deeper into the observational characterization and hypothetical mechanisms that leads to the formation or dissipation of fog over each of the most affected airports: Ezeiza, Aeroparque, Mar del Plata, Rosario, Resistencia, Iguazu, Cordoba, Neuquen, Bariloche, Rio Gallegos, Rio Grande, Ushuaia, Marambio Antarctic Base. In addition, this review summarizes the methods and tools most used for forecasting formation, evolution and dissipation of fog events. The present technical note allows to set the basis and general perspectives for future research about this phenomenon in Argentina.

Palabras clave: nieblas, visibilidad, aeronáutica

Citar como:

Yabra, M. S., R. de Elia, L. Vidal, M. Nicolini, R. Vasques Ferro, C. Ribero, L. Chiaparrí, E. Fernández, C. Campetella, O. Bonfili, M. Ceballos, G. Barrera, N. Troche, V. López, M. Schizzano, N. Bentancor, L. Berengua y M. Steven, 2021: Las nieblas en los aeropuertos argentinos: revisión de literatura y perspectiva de los pronosticadores. Nota Técnica SMN 2021-89

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Impacto de la meteorología en la industria aeronáutica

La realidad cotidiana en los aeropuertos de todo el mundo presenta una buena ilustración del gran impacto que pueden tener las condiciones meteorológicas en la industria aeronáutica. 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 (ver por ejemplo Dines, 1917) y continua en la actualidad con creciente atención (Cook y otros 2009, Rudra y otros 2015; Gultepe y otros 2014a, b, 2017; entre otros). El trabajo realizado por Gultepe y coautores (2019) afirma que desde 2003 hasta 2007 se registraron 8657 accidentes de aviación en Estados Unidos, donde en 1740 de ellos (20% del total) la meteorología resultó ser un factor determinante. Las condiciones que causan o contribuyen a los incidentes y accidentes en la aviación se relacionan con el viento, baja visibilidad / techo de nubes, turbulencia, engelamiento de la aeronave, corrientes ascendentes/descendentes, precipitación, tormentas, cortantes de viento, ascendentes en térmicas, temperaturas extremas y rayos (NTSB, 2010). En lo que sigue nos centraremos en el factor meteorológico, y particularmente, en la reducción de visibilidad.

1.2 Impacto de la reducción de visibilidad en la industria aeronáutica

La reducción de visibilidad 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. La existencia de la niebla es reconocida desde la antigüedad (Neumann, 1989), pero su impacto en la vida humana ha aumentado significativamente durante las últimas décadas debido al aumento del tráfico aéreo, marino y terrestre en todo el mundo (Croft, 2003). De hecho, las pérdidas financieras y humanas relacionadas con la niebla y la baja visibilidad se volvieron comparable a las pérdidas por otros eventos meteorológicos como tornados e incluso huracanes (Gultepe y otros 2007). Valdez (2000) concluye que un pronóstico más preciso en el techo de nubes o la visibilidad con una antelación de 30 minutos podría reducir el número de retrasos por condiciones meteorológicas entre un 20% y un 35% que, en Estados Unidos, representa un ahorro de entre 500 y 875 millones de dólares anuales para la industria aeronáutica.

1.3 Introducción a las nieblas

De acuerdo a la definición internacional, la niebla consiste en una colección de gotas de agua o cristales de hielo suspendidos cerca de la superficie de la Tierra que conduce a la reducción de la visibilidad horizontal por debajo de 1 km (WMO, 1966). Si la visibilidad es mayor a 1 km pero menor a 5 km se denomina neblina (OACI, 2016). Las gotas de agua o los cristales de hielo se forman como resultado de la sobresaturación generada por el enfriamiento, humedecimiento y/o mezcla de las parcelas de aire con temperaturas contrastantes cerca de superficie. La presencia de gotas y/o cristales suspendidos puede hacer que un objeto sea indistinguible para un observador a cierta distancia y, por lo tanto, cause condiciones de poca visibilidad. La formación de nieblas y su extensión en la superficie no son fáciles de predecir. Si bien originalmente se estableció una relación entre la niebla y el buen tiempo (Neumann, 1989), su formación no siempre ocurre bajo condiciones de vientos calmos. Por ejemplo, a fines del siglo XIX Scott (1894, 1896) mostró que la ocurrencia de niebla en las Islas Británicas se correlacionaba con vientos fuertes generalmente acompañados por una lluvia intensa pero no encontró una clara relación entre la formación de niebla y los patrones sinópticos (ciclones y anticiclones, entre otros). Los aerosoles también tienen un rol muy importante en el proceso de formación ya reconocido por Mensbrugghe (1892) y estudiado por Willet (1928). Este último, enfatizó la importancia de los aerosoles como núcleos de condensación y encontró que las partículas de polvo con un

grado de curvatura en su superficie, partículas con carga eléctrica o iones y las partículas higroscópicas son agentes facilitadores en la formación de gotas.

En numerosos trabajos se han utilizado distintos enfoques en la clasificación de la niebla basados en propiedades físicas, termodinámicas, procesos dinámicos, composición química de partículas, características fisiográficas de la superficie y características meteorológicas en la escala sinóptica o en la mesoescala. El trabajo de Willett (1928) y la posterior modificación hecha por Byers (1959), establecieron una clasificación de once tipos de niebla, cada uno definido por el principal mecanismo básico responsable de la formación y también por las circunstancias en las que dicho proceso ocurre: por brisas de mar-tierra, marinas, de aire tropical, de vapor, de superficie, de inversiones en altura, advectivas-radiativas, de pendiente, prefrontales, posfrontales, por pasaje frontal. Los tipos de nieblas más estudiados y, por ende, mejor descriptos son aquellos asociados al enfriamiento radiativo del suelo. Estos pueden subdividirse en las nieblas radiativas, las nieblas de inversión en altura y las nieblas advectivas-radiativas. Las nieblas radiativas o de radiación generalmente se forman encima de la superficie a medida que avanza la noche y suelen ser más profundas en las horas alrededor del amanecer, tal como fue ilustrado por Toth y otros (2010) en la Figura 1. Numerosos investigadores han dedicado esfuerzos a comprender la relación entre la aparición de este tipo de niebla con los diversos mecanismos que se sabe influyen en la evolución de la capa límite nocturna. El mecanismo principal es el enfriamiento radiativo, pero las influencias opuestas del flujo de calor hacia arriba desde el suelo, así como los efectos de calentamiento diabático en el cambio de estado y las pérdidas de humedad a través del depósito de rocío producto de la mezcla turbulenta en la capa límite estable determinan en gran medida la probabilidad y el momento de la formación de niebla radiativa (Taylor, 1917; Lala y otros, 1975; Roach, 1976; Roach y otros, 1976; Brown y Roach, 1976; Pilié y otros, 1975; Findlater, 1985; Turton y Brown, 1987; Fitzjarrald y Lala, 1989; Bergot y Guedalia, 1994; Roach, 1995; Duynkerke, 1999). La formación de este tipo de nieblas suele verse beneficiada por cielos despejados en aire en calma asociado con condiciones anticiclónicas (Byers, 1959). Las nieblas radiativas-advectivas son un fenómeno costero y resultado del enfriamiento radiativo del aire húmedo que fue advectado sobre la tierra desde el océano o desde cualquier cuerpo grande de agua durante las horas diurnas anteriores (Ryznar, 1977). Las nieblas de inversión en altura generalmente se forman en valles dentro de una masa de aire húmeda profunda cubierta por una fuerte inversión. Esta inversión resulta de un enfriamiento radiativo prolongado desde superficie y también suele ser resultado de una estabilización de la masa de aire por subsidencias asociadas con un anticiclón persistente (Holets y Swanson, 1981).

Otro mecanismo relativamente bien estudiado en la formación de nieblas se relaciona con la advección de masas de aire húmedas con temperatura contrastante a la temperatura de la superficie que queda por debajo y por eso reciben el nombre de nieblas advectivas o de advección. Byers (1959) hace una distinción entre niebla marina, niebla por brisa de mar-tierra y nieblas de aire tropical, aunque todas están asociadas con la advección de una masa de aire cálida y húmeda sobre una superficie relativamente más fría. Las nieblas marinas ocurren típicamente como un resultado de la advección del aire marino cálido sobre una región afectada por una corriente oceánica fría y por eso, es común encontrarlas sobre el mar en regiones donde se encuentren los límites de las corrientes oceánicas frías. Una vez que la niebla ya se ha formado, su evolución es determinada por la influencia del enfriamiento radiativo en el tope de la capa de niebla, las subsidencias, la llovizna y los flujos turbulentos de calor y humedad desde la superficie (Findlater y otros, 1989). Las nieblas por brisa de mar-tierra son un fenómeno puramente costero y ocurren cuando el aire cálido y húmedo sobre el continente es transportado sobre la fría costa oceánica conduciendo a la saturación de la masa de aire desde abajo. Estas nieblas pueden subsecuentemente trasladarse tierra adentro bajo la influencia de la circulación marina en las horas de la tarde siguiente. Las nieblas advectivas también se pueden formar sobre tierra en otoño/invierno cuando aire relativamente cálido y húmedo fluye desde la superficie de un cuerpo de agua.

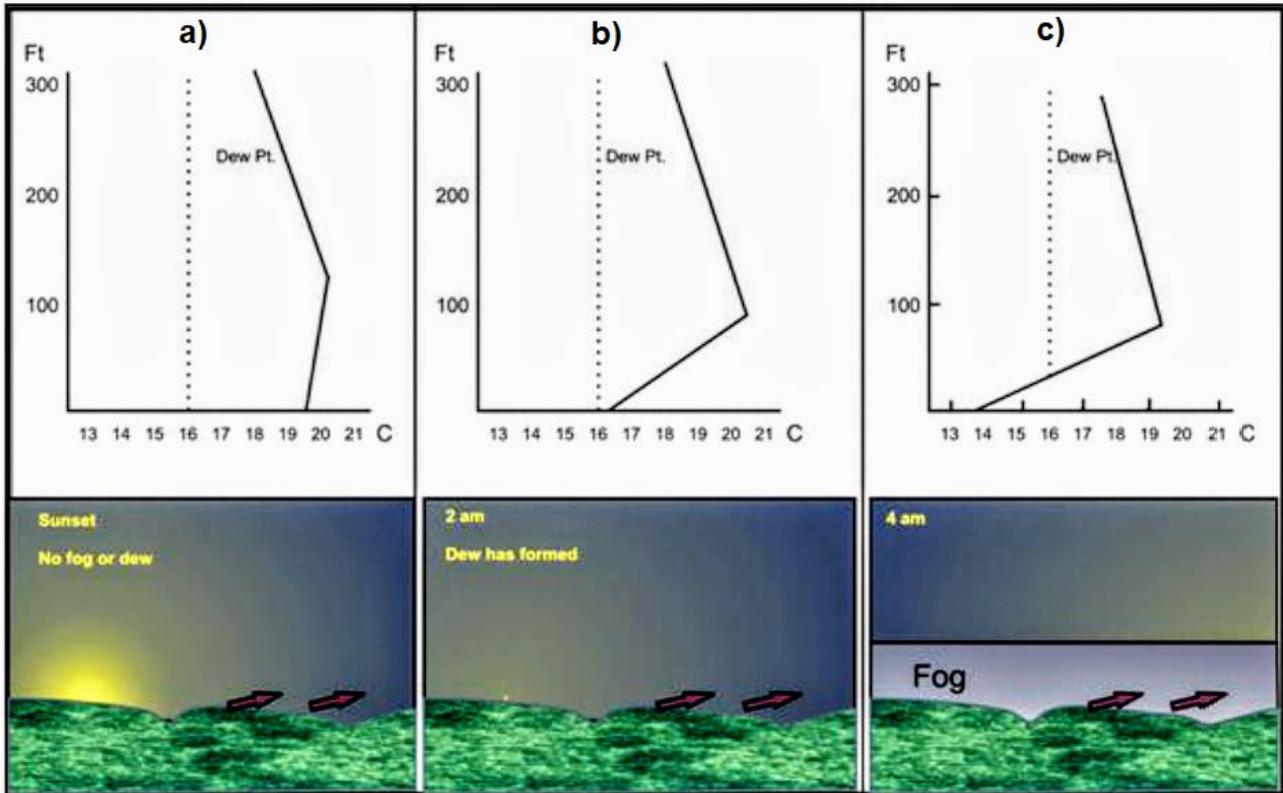


Figura 1: Evolución típica del perfil vertical de temperatura en el proceso de formación de una niebla radiativa: a) Cielos despejados a partir de la puesta del sol permiten el enfriamiento radiativo de la superficie. b) La humedad aumenta hasta alcanzar la saturación. c) Los vientos débiles y la sobresaturación del aire conducen a la formación de una capa de niebla sobre la superficie. Figura adaptada de Toth et al. (2010).

1.4 Estudios sobre nieblas realizados en Argentina

A pesar de que la reducción de visibilidad por nieblas o neblinas trae grandes complicaciones a la actividad aeronáutica en la Argentina desde hace décadas, la investigación de este fenómeno a nivel nacional es limitada. El primer estudio del que los autores tienen información fue realizado por Quinteros de Menzies y Obertello (1972) en el cual describieron una metodología simple para un pronóstico objetivo de nieblas en el Aeropuerto Internacional Ministro Pistarini (Ezeiza, Provincia de Buenos Aires). El método empleado fue numérico y gráfico, correlacionando la ocurrencia o no de niebla con distintos parámetros. Llegaron así a la conclusión de que las nieblas en dicho aeropuerto eran en su casi totalidad de tipo radiativo y que, en consecuencia, los factores de mayor influencia en su formación eran los bajos valores de la depresión del punto de rocío (diferencia entre la temperatura y la temperatura de rocío) y las calmas o los vientos leves con dirección comprendida entre E y NE.

El segundo estudio de nieblas fue realizado por Piccolo (1983) utilizando datos horarios de la estación aeronaval de Río Grande (Provincia de Tierra del Fuego, Antártida e Islas del Atlántico Sur) para el período 1974-1981. Dicho trabajo describe los resultados preliminares estadísticos concluyendo que la ocurrencia de niebla es más frecuente en invierno y su duración varía desde 1 hasta 40 horas, pero no se encontró una hora preferida para el comienzo del fenómeno. En base al estudio de las situaciones sinópticas que acompañaron a cada evento, se infirió que las nieblas en general están asociadas a procesos radiativos y advectivos.

Más recientemente, Schonholz (2014) realizó un trabajo para mejorar el pronóstico de niebla en el aeropuerto de Ezeiza donde implementó un sistema de pronóstico basado en un modelo de post procesamiento estadístico aplicado a un modelo dinámico y a datos observacionales, que le permitieron obtener pronósticos probabilísticos calibrados para diferentes umbrales de visibilidad. Para ello, en primer lugar, identificó los predictores que presentaban relación con la ocurrencia de las nieblas en la estación meteorológica de Ezeiza, siendo la humedad relativa y la intensidad del viento los que mostraron una mayor capacidad de predicción. La relación entre la visibilidad y dichos predictores se puede observar en la Figura 2: la visibilidad disminuye con el aumento de la humedad relativa y con la disminución de la velocidad del viento. El resultado obtenido mostró que la técnica implementada permite obtener pronósticos confiables de visibilidad hasta por lo menos 48 horas de plazo.

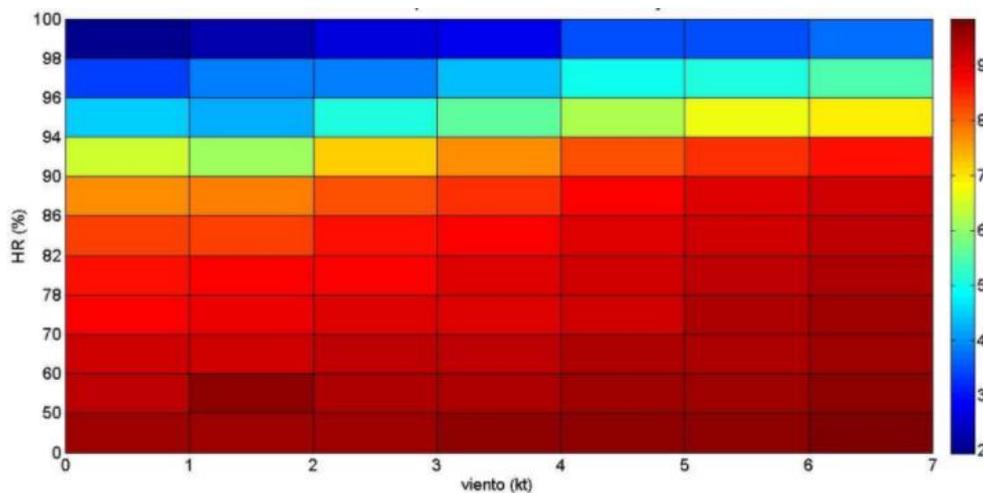


Figura 2: Visibilidad media (km) en función de la humedad relativa (%) y de la velocidad del viento (nudos) en la estación meteorológica de Ezeiza para el período 1979-2011. Figura adaptada de Schonholz (2014).

Vasques Ferro y Ribero (2015) realizaron un estudio climatológico de la ocurrencia de nieblas en el Aeroparque Jorge Newbery (Ciudad Autónoma de Buenos Aires) con el objetivo de encontrar patrones de escala sinóptica y de mesoescala asociados a la interacción de la ciudad con el estuario del Río de la Plata y la generación de nieblas en aeropuertos cercanos. Se analizaron las observaciones aeronáuticas horarias y especiales (METAR y SPECI) para el período 2004-2013 y algunos datos adicionales como la temperatura del agua del Río de la Plata, entre otros. Los resultados indicaron que la formación de la niebla más persistente está asociada a la niebla de advección, la cual puede formarse y disiparse en cualquier momento del día, dificultando la tarea a la hora de hacer el pronóstico en función de las herramientas disponibles en ese momento.

Nuevamente para el Aeropuerto de Ezeiza, Ruiz y otros (2018) presentaron un pronóstico de visibilidad basado en un modelo dinámico-estadístico que utiliza la combinación de un conjunto de pronósticos retrospectivos globales y observaciones in-situ. El modelo propuesto fue utilizado para generar pronósticos retrospectivos probabilísticos de visibilidad para diferentes umbrales en el período comprendido entre diciembre de 1984 y enero de 2011. Los resultados de la evaluación mostraron que la combinación de los datos observados junto con las variables pronosticadas por el modelo dinámico produce pronósticos que

tienen mejor desempeño que los que utilizan sólo observaciones o sólo las variables pronosticadas por el modelo dinámico.

Recientemente Lapido (2019) utilizó una base de datos de 10 años de METAR y SPECI del Aeropuerto Internacional Islas Malvinas (Rosario, Provincia de Santa Fe) y analizó la climatología de los eventos de niebla. Encontró que la mayoría de los eventos ocurren durante los meses de invierno y la visibilidad mínima se alcanza durante las horas previas al amanecer e inmediatamente después de éste, siendo generalmente menor a 400 metros en la gran mayoría de los casos. Además, la mayoría de los eventos de niebla son de origen radiativo, por lo que se aplica el “método UPS” (basado en el estudio de la “temperatura cruzada” propuesto por Baker y otros, 2002) para su pronóstico, obteniéndose una probabilidad de detección del 80% y aproximadamente 20% de falsas alarmas. Con el fin de mejorar dicho pronóstico, se aplicó el método de regresión logística y determinó nuevos umbrales para la decisión, reduciendo a un 10% las falsas alarmas.

La reseña aquí mencionada ilustra la escasa producción de estudios sobre nieblas a lo largo de todo el territorio nacional. Sin embargo, esta escasez de artículos, tesis o presentaciones en conferencias y congresos no implica que no existan otras fuentes de conocimiento disponibles en Argentina. Por esta razón, se ha considerado importante explotar el aporte de los conocimientos adquiridos en la experiencia de aquellas personas que se dedican o dedicaron a la observación y el pronóstico de las nieblas en los aeropuertos argentinos.

1.5 Rol del Servicio Meteorológico Nacional en la actividad aeronáutica argentina

En el marco de la Ley 27161 (aprobada en 2015), la Empresa Argentina de Navegación Aérea Sociedad del Estado (EANA S.E) es la responsable de los Servicios Meteorológicos para la Navegación Aérea (MET). Por el Art. 15 de dicha Ley el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) es el prestador de estos servicios a EANA S.E. Según la Publicación de Información Aeronáutica GEN-3.5 (ANAC, 2020), la autoridad meteorológica es responsable de suministrar servicio meteorológico para contribuir con la seguridad, regularidad y eficiencia de la navegación aérea, nacional e internacional. Por lo tanto, proporciona información meteorológica a los usuarios aeronáuticos en general a través de una Red de Oficinas de Vigilancia Meteorológica (OVM; Aeroparque, Córdoba, Comodoro Rivadavia, Mendoza y Resistencia), Oficinas Meteorológicas de Aeródromo (OMA; Aeroparque, Córdoba, Comodoro Rivadavia, Ezeiza, Mar del Plata, Mendoza, Resistencia, Río Gallegos, San Fernando y Marambio) y Oficinas de Información Meteorológica (OIM; Neuquén, Palomar, Paraná, Reconquista) como se muestra en la Figura 3. La vigilancia meteorológica tiene el objetivo de mantener actualizada la evolución probable de las condiciones meteorológicas dentro de las cinco Regiones de Información de Vuelo (FIR; Ezeiza, Córdoba, Resistencia, Comodoro Rivadavia y Mendoza) de la Argentina y será proporcionada por las respectivas OVM (Aeroparque realiza la vigilancia meteorológica de la FIR Ezeiza) (ANAC, 2020).



Figura 3: Red de Oficinas de Vigilancia Meteorológica (OVM, círculo rojo), Oficinas Meteorológicas de Aeródromo (OMA, círculo verde) y Oficinas de Información Meteorológica (OIM, círculo violeta) del Servicio Meteorológico Nacional de Argentina. Además, se muestran las coberturas de las diferentes FIR (líneas azules) y los aeropuertos para los cuales las OVMs confeccionan pronósticos en clave TAF (círculos negros).

1.6 Objetivo del trabajo

El propósito de esta revisión es complementar el resumen de los trabajos nacionales realizados previamente sobre la formación de nieblas en los aeropuertos, con los conocimientos adquiridos en la experiencia de la vigilancia y el pronóstico operativo aeronáutico. Esta combinación de información tiene el fin de profundizar en las características y en los mecanismos que dan lugar a la reducción de visibilidad por nieblas en los aeropuertos argentinos más afectados y a su vez, sentar las bases y perspectivas generales para futuras investigaciones sobre niebla.

2. METODOLOGÍA

A los efectos de poder cumplir con el objetivo de este trabajo, entre Mayo y Octubre del 2020 se llevaron a cabo una serie de entrevistas virtuales realizadas a los expertos en la temática, observadores meteorológicos y pronosticadores aeronáuticos que lidian/lidieron con la formación de nieblas y neblinas en los aeropuertos de forma operativa. Se logró acceder y entrevistar a quince personas que, a raíz de su experiencia y vinculación con la temática otorgaron aportes muy significativos para los fines planteados en este trabajo. Los mismos figuran como citas provenientes de comunicaciones personales o como coautores de la presente Nota Técnica. A fin de darle un mayor rigor climatológico, la información oral obtenida en las entrevistas será contrastada en una próxima Nota Técnica con información meteorológica provenientes de los reportes oficiales.

3. RESULTADOS

3.1 Aeropuertos frecuentemente afectados por nieblas

Como se mencionó anteriormente, la reducción de visibilidad por razones puramente meteorológicas puede deberse a la presencia de nieblas o neblinas formadas a partir de distintos procesos en la atmósfera. A su vez, cada proceso puede conducir a la formación de nieblas con distintas extensiones horizontales desde bancos de pocos kilómetros cuadrados localizados en un sólo aeropuerto hasta nieblas generalizadas que pueden afectar al mismo tiempo a varios aeropuertos de una región. Por esta razón, la hipótesis de partida es que la operación de todos los aeropuertos de nuestro país es afectada por nieblas o neblinas en mayor o menor medida. Entonces, el interés radica en aquellos que sufren mayor cantidad de incidentes, demoras o cierres de operaciones, lógicamente relacionados con una mayor cantidad de movimientos.

Cook y otros (2009) cuantificaron el impacto de los factores climáticos en los retrasos de los vuelos y descubrieron que los factores contribuyentes dependen en gran medida del tipo de aeropuerto. La gravedad del efecto 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. La categoría de operación de una aeronave en un determinado aeropuerto depende de las condiciones de vuelo de la misma. 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. 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 los mínimos meteorológicos que se deben cumplir son 5 km para la visibilidad y 1000 pies (aproximadamente 305 m) para el techo de nubes. Los vuelos instrumentales (IFR, por sus siglas en inglés) son aquellos que se pueden llevar a cabo en los aeropuertos y por aviones que

disponen de infraestructura instrumental, cuando los techos de nubes se encuentran por debajo de los 1000 pies y la visibilidad, debajo de 5 km (ANAC, 2016).

Los procedimientos y mínimos 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). Las diferentes categorías meteorológicas de operaciones en aeródromos son las siguientes (ANAC, 2019a):

- Operación de ILS Categoría I (CAT I): Aproximación y aterrizaje de precisión por instrumentos con una altura de decisión no inferior a 60 m (200 ft) y con una visibilidad no inferior a 800 m o un RVR no inferior a 550 m.
- Operación de ILS Categoría II (CAT II): Aproximación y aterrizaje de precisión por instrumentos con una altura de decisión no inferior a 30 m (100 ft) y visibilidad no inferior a 800 m y un RVR no inferior a 350 m
- Operación de ILS Categoría III (CAT III): Se subdivide en:
 - Categoría III A (CAT III A): (i) Hasta una altura de decisión inferior a 30 m (100 ft) o sin limitación de altura de decisión y; (ii) Con un RVR no inferior a 200 m.
 - Categoría III B (CAT III B): (i) Hasta una altura de decisión inferior a 15 m (50 ft) o sin limitación de altura de decisión y; (ii) con un RVR inferior a 200 m pero no inferior a 50 m
 - Categoría III C (CAT III C): Sin altura de decisión ni limitaciones en cuanto al RVR.

A partir de las climatologías de visibilidad elaboradas por el SMN (SMN, 2008), la cantidad de movimientos mensuales reportados por ANAC (ANAC, 2019b) y la información recolectada en las entrevistas, se seleccionaron los aeropuertos que mejor califican como los más afectados por la visibilidad reducida por nieblas. Los mismos se encuentran detallados en la Tabla 1. Cada uno de ellos posee un rol particular que justifica la importancia de abordar estudios acerca de la disminución de visibilidad que interrumpa las operaciones planificadas. Todos excepto la Base Marambio son aeropuertos internacionales y operan las 24 horas del día, aunque en la mayoría predominan los vuelos comerciales que despegan o aterrizan en horas diurnas. Sucede en aeropuertos como Rosario, Río Grande, Río Gallegos y principalmente Ezeiza, que se utilizan las horas nocturnas o de madrugada para la operación de vuelos de carga. También sucede en este último (o sus alternativas cuando éste se encuentra cerrado) entre las 3 y 10 de la mañana el aterrizaje de los vuelos internacionales de larga duración. Aerolíneas Argentinas (ARG en adelante) planifica una programación trimestral de vuelos en base a la demanda y, desde hace unos años, también en base a las condiciones climáticas meteorológicas (comunicación personal con Raul Rodano, meteorólogo de ARG). Los meteorólogos de la aerolínea disponen de unas estadísticas de horas bajo mínimos (aeropuerto cerrado por condiciones de baja visibilidad) que son utilizadas para que los vuelos programados tengan la menor cantidad de modificaciones o demoras por la reducción de visibilidad. 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, a la hora prevista de su utilización, estarán por debajo de los mínimos de utilización de aeródromo o no se dispone de información meteorológica en el aeródromo de destino (OACI, Anexo 6). Dichos planes son establecidos por cada aerolínea. Por lo tanto, cada vuelo tiene predefinidos sus aeropuertos alternativos para el caso en que el aeropuerto de destino se encuentre cerrado o saturado.

Tabla 1: Detalle de los aeropuertos nacionales seleccionados.

Código OACI	Nombre	Ciudad, Provincia	Latitud	Longitud	Categoría
SABE	Aeroparque Metropolitano Jorge Newbery	Ciudad Autónoma de Buenos Aires	34°33.53'S	58°24.98'O	CAT III A
SAEZ	Aeropuerto Internacional Ministro Pistarini	Ezeiza, Buenos Aires	34°49.33'S	58°32.15'O	CAT III A
SACO	Aeropuerto Internacional Ing. Aero. Ambrosio Taravella	Córdoba, Córdoba	31°18.60'S	64°12.50'O	CAT III A
SAAR	Aeropuerto Internacional Rosario Islas Malvinas	Rosario, Santa Fe	32°54.22'S	60°47.07'O	CAT I
SAZM	Aeropuerto Internacional Astor Piazzolla	Mar del Plata, Buenos Aires	37°56.05'S	57°34.40'O	CAT I
SAWH	Aeropuerto Internacional de Malvinas Argentinas	Ushuaia, Tierra del Fuego	54°50.60'S	68°17.73'O	CAT I
SAWE	Aeropuerto Internacional Gob. Ramón Trejo Noel	Río Grande, Tierra del Fuego	53°46.65'S	67°45.00'O	CAT I
SAWG	Aeropuerto Internacional Piloto Civil Norberto Fernández	Río Gallegos, Santa Cruz	51°36.53'S	69°18.77'O	CAT I
SAZS	Aeropuerto Internacional Tte. Luis Candelaria	San Carlos de Bariloche, Rio Negro	41°9.07'S	71°9.47'O	CAT I
SAZN	Aeropuerto Internacional Pte. Perón	Neuquén, Neuquén	38°56.93'S	68°9.35'O	CAT I
SARE	Aeropuerto Internacional de Resistencia	Resistencia, Chaco	27°27.00'S	59°3.37'O	CAT I
SARI	Aeropuerto Internacional de Puerto Iguazú Mayor D. Carlos Eduardo Krause	Iguazú, Misiones	25°44.23'S	54°28.40'O	CAT I
SAWB	Aeródromo Marambio	Base Marambio, Antártida Argentina	64°14.35'S	56°37.85'O	Visual

Por ejemplo, Córdoba, Mar del Plata y Montevideo suelen ser los aeropuertos alternativos de Ezeiza, y Rosario de Aeroparque. Por esta razón y por su cercanía con todos los aeropuertos de Buenos Aires, también se incluyó en esta recolección de información al Aeropuerto Internacional de Carrasco (Montevideo, Uruguay). Por otro lado, el aeropuerto de Córdoba tiene mayor importancia, similar a la de Aeroparque, ya que ambos funcionan como hub de ARG para los vuelos internos de cabotaje, lo cual permite a los pasajeros realizar conexiones eficientes y rápidas para una gran cantidad de destinos sin pasar por Buenos Aires (Ciudades como Salta y El Calafate quedan interconectadas a partir de aviones y tripulaciones que salen y vuelven a y desde Córdoba). Aeropuertos como Bariloche, Iguazú, Mar del Plata y Ushuaia son utilizados todo el año y son centrales para la actividad turística de sus respectivas ciudades, mientras que el aeropuerto de Neuquén adquirió un rol importante en el último tiempo debido a la actividad industrial alrededor de la explotación petrolera de Vaca Muerta. Por su parte, Río Grande es un fuerte polo económico que resulta trascendente dentro de la economía de Argentina ya que se llevan a cabo una gran cantidad de procesos industriales y tiene arraigadas numerosas fábricas tanto nacionales como internacionales por lo que su aeropuerto resulta fundamental para el intercambio de materia prima y productos ensamblados.

Dado que este estudio abarca los aeropuertos/aeródromos nacionales principales que son afectados por la formación de nieblas y neblinas, sería inconsistente excluir las bases antárticas argentinas en las cuales la actividad aeronáutica es fundamental y la visibilidad reducida es un problema recurrente. La Base Marambio tiene el aeródromo principal de todas las bases argentinas en la Antártida ya que es el único que tiene pista de permafrost que permite operar a aviones tales como los Hércules C-130 (perteneciente a la Fuerza Aérea Argentina que realiza el transporte táctico medio-pesado), mientras que en las demás bases sólo pueden aterrizar sobre los glaciares aviones como los DHC-6 Twin Otter. La actividad aeronáutica es central para todas las bases ya que es la principal y, en invierno, la única ruta de acceso tanto para el intercambio de personas como para el abastecimiento de alimentos frescos. Es importante mencionar que, en su mayoría, los vuelos con destino a Marambio parten y vuelven al aeropuerto de Río Gallegos, adjudicando a dicho aeropuerto una mayor necesidad e importancia a la eficiencia del pronóstico meteorológico para las horas de despegue y aterrizaje.

3.2 Tipo de nieblas en cada aeropuerto

3.2.1 Ezeiza (SAEZ)

Según los pronosticadores del SMN y de ARG, y de acuerdo con las conclusiones de Schonholz (2014) y Ruiz y otros (2018), en este aeropuerto las nieblas de origen radiativo son las más frecuentes. En dicho trabajo los autores encontraron que durante el año la visibilidad se ve reducida con mayor frecuencia en los meses más fríos, entre Abril y Agosto, con baja ocurrencia en los meses cálidos, y también que entre un 60% y 70% de los días durante los meses fríos, se produce una reducción de visibilidad en algún momento del día particularmente en horas de la madrugada previo a la salida del sol, donde el enfriamiento radiativo es máximo. La geografía que rodea al aeropuerto se muestra en la Figura 4. En ocasiones, según lo relevado, la formación de nieblas bajas es tan localizada que no alcanza a cubrir por completo la pista, pero la fuerte reducción de visibilidad acotada en alguna de las cabeceras frena la operatividad del aeropuerto por completo. Estos episodios son muy frecuentes en la cabecera de la pista 11 y algunos pronosticadores estiman que podrían estar relacionados con su cercanía al Río Matanza al oeste-noroeste (Figura 4). Además, la presencia de industrias alrededor y su frecuente actividad en las horas nocturnas contribuirían a aumentar la disponibilidad de núcleos de condensación derivando en la formación de nieblas más densas aún. Los meteorólogos de ARG, de acuerdo a su experiencia, encontraron un tipo de nieblas que no “cumple” con las condiciones de calma y horarios de disipación de las nieblas radiativas (posterior a la salida del sol), y las

denominaron “nieblas de traslación” ya que refiere a nieblas de origen radiativo que se formaron en otra localidad (no costera) al noroeste y fueron trasladadas en forma de banco hasta la zona del aeropuerto.

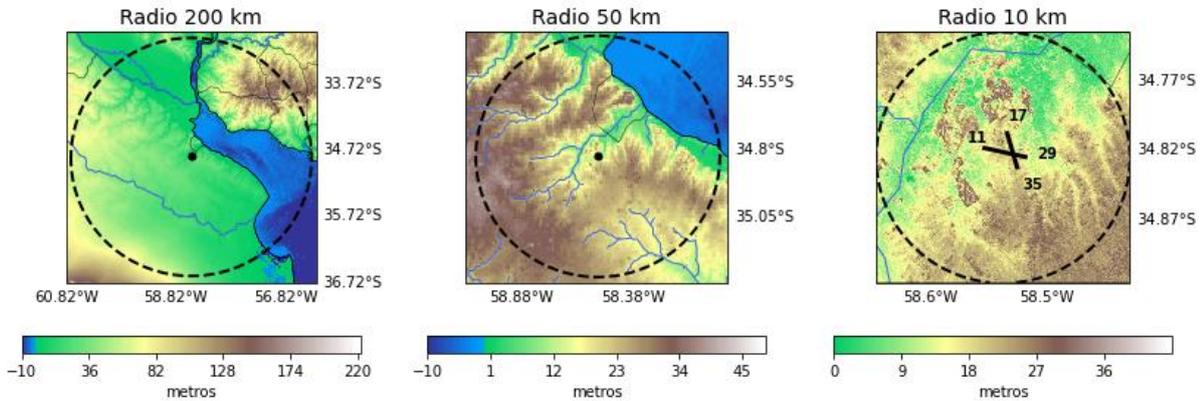


Figura 4: Mapa geográfico del área que rodea al aeropuerto SAEZ, generado con información del Modelo de Elevación Digital (DEM, por sus siglas en inglés) y de HydroSHEDS a partir de la misión SRTM (NASA Shuttle Radar Topography Mission) (Rodríguez y otros 2005) con resolución horizontal de 90 m (mapas con radios de 200 y 50 km) y 30 m (mapa con radio de 10 km). En el mapa de radio 10 km se muestran las pistas con sus respectivas numeraciones.

3.2.2. Aeroparque (SABE)

En Aeroparque, que se encuentra aproximadamente a 30 km al noreste de Ezeiza, el trabajo realizado por Vasques Ferro y Ribero (2015) muestra que la mayor persistencia y mayor dificultad para pronosticar la ocurrencia de las nieblas se asocia con el proceso de advección. Como se observa en la Figura 5, este aeropuerto está ubicado sobre la costa del Río de la Plata orientada en dirección noroeste-sudeste e ingresando a tierra se encuentra la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (CABA). Al encontrarse sobre la costa, el viento con dirección prevalente del río o las posibles brisas costeras favorecerían el desarrollo de nieblas de origen advectivo. Según los pronosticadores, es frecuente que la niebla ya formada sobre superficies marítimas o la masa de aire húmeda sea advectada hacia tierra y se complemente con el enfriamiento radiativo, dando origen a las nieblas advectivas-radiativas. En algunos casos de nieblas persistentes, éstas tendrían su origen en bancos de niebla extensos formados sobre el río y desplazados por una persistente circulación NE de escala sinóptica. Las condiciones de brisa se revierten hacia la puesta del sol lográndose un retroceso del área de niebla hacia el río, dando lugar a la mejora de condiciones en Aeroparque en horas nocturnas, contrariamente a lo que sucedería en el caso de las nieblas advectivas-radiativas. En casos extremos y poco frecuentes nieblas de radiación formadas sobre zonas costeras de Uruguay serían trasladadas hacia el sudoeste, cruzando el río y afectando a este aeropuerto. Espacialmente las nieblas más frecuentes quedarían acotadas a los primeros cientos de metros desde la costa, incluyendo el aeropuerto, y esto podría deberse a la turbulencia mecánica como mecanismo disipador asociada al aumento de rugosidad por la presencia de grandes edificios (Figura 5).

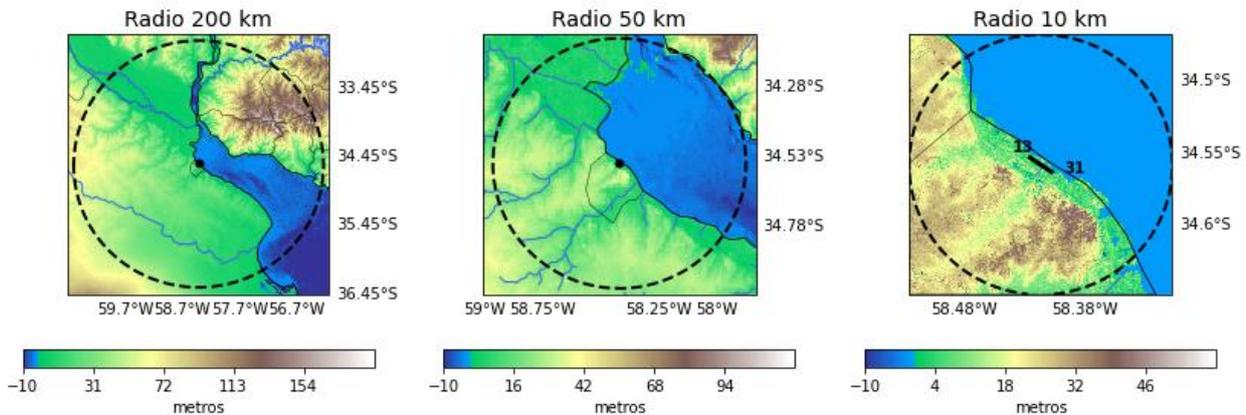


Figura 5: Mapa geográfico del área que rodea al aeropuerto SABA, generado con información del DEM a partir de la misión SRTM. En el mapa de radio 10 km se muestran las pistas con sus respectivas numeraciones.

3.2.3 Montevideo (SUMU)

Con características similares a Aeroparque, pero en la costa opuesta del Río de la Plata, se encuentra el Aeropuerto Internacional Carrasco en Montevideo (Uruguay). A partir de la Figura 6, se observa que el aeropuerto se encuentra a 4 km de la costa y a mitad camino en esa dirección (no visibles en la Figura), una cadena de lagunas artificiales paralelas a la costa que aportarían de contenido de humedad a la capa límite. El aeropuerto no cuenta con ningún estudio sobre nieblas o eventos de visibilidad reducida en general, pero la experiencia de los pronosticadores y las climatologías hechas por el INUMET (INUMET, 2014) determinaron que, si bien hay nieblas durante todo el año, los meses entre Abril y Septiembre se consideran críticos para la actividad aeronáutica por la densidad y duración de los eventos. Las nieblas más frecuentes ocurren durante las horas nocturnas y previas a que comience la turbulencia convectiva diurna, por ende, serían de origen radiativo. A partir de la experiencia, normalmente vienen asociadas a las condiciones típicas tales como vientos calmos o con vientos leves del N-NE, cielos despejados y tendencia de alta presión que conducen a formar mayormente neblinas o nieblas localizadas. Las nieblas menos frecuentes, pero más problemáticas serían las advectivas asociadas a vientos del SE, ya que son más densas que las radiativas y, además, pueden durar hasta un día entero. Esta advección de masas de aire marinas, podría generar nieblas persistentes y regionales afectando a varios aeropuertos, incluidos los de Buenos Aires. Generalmente estarían asociadas a la combinación de un sistema de alta presión al sur (al este de Buenos Aires) y a un sistema de bloqueo en altura.

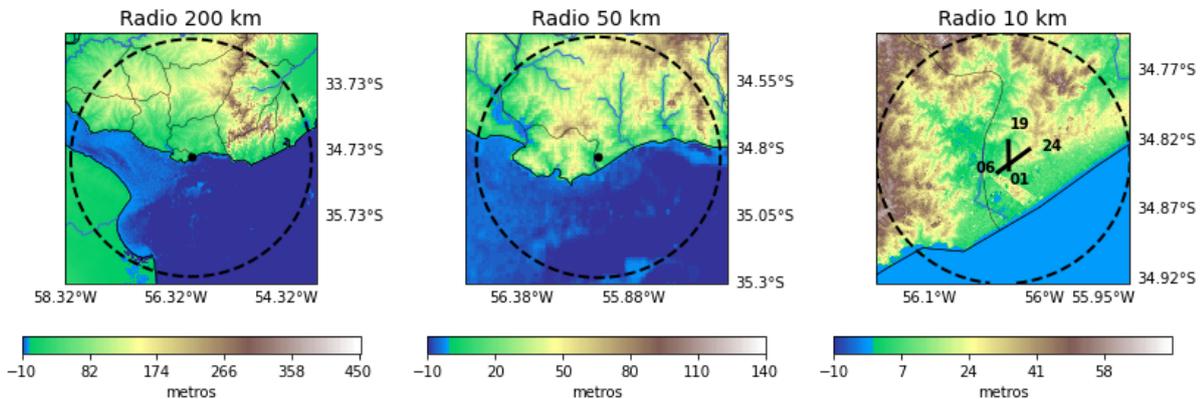


Figura 6: Mapa geográfico del área que rodea al aeropuerto SUMU, generado con información del DEM a partir de la misión SRTM. En el mapa de radio 10 km se muestran las pistas con sus respectivas numeraciones.

3.2.4 Mar del Plata (SAZM)

Este aeropuerto se encuentra en una distancia a la costa similar a la del aeropuerto de Montevideo (aprox. 3 km) y, según los entrevistados, tiene gran frecuencia de nieblas advectivas o advectivas-radiativas. De esta forma, en pocos minutos se forman bancos de niebla densa que no se disipan al ingresar tierra adentro y dejan el aeropuerto bajo mínimos por varias horas o incluso días. El hecho de que la pista esté más alejada de la costa que en el caso de Aeroparque, como se observa en la Figura 7, ha llevado a los pronosticadores a pensar que mejora la cantidad de horas con visibilidad apta para operaciones que si estuviera más cerca. De hecho, la presencia de una zona arbolada entre el aeropuerto y la costa podría tener un rol disipador en las nieblas poco profundas que fueran advectadas desde el mar. Existen determinadas situaciones sinópticas que derivarían en la formación y persistencia de nieblas en el aeropuerto, como el pasaje de frentes cálidos y anticiclones persistentes centrados en el sudeste de Buenos Aires, situaciones dominadas por la estabilidad de la atmósfera en la capa límite ya que permite un mayor enfriamiento radiativo nocturno. Contrariamente a lo esperable por su geografía, para algunos pronosticadores, las nieblas más frecuentes están asociadas a procesos radiativos e incluso se piensa que la orografía tiene un rol en su formación. El enfriamiento diferencial nocturno en la zona serrana de Tandil (al oeste de Mar del Plata) forzaría una circulación local que podría trasladar la niebla hacia el aeropuerto a la hora de la salida del sol (en comunicación personal con Raul Rodano). Generalmente son confundidas con nieblas locales de radiación, pero a través del monitoreo satelital, se encontró que provienen desde zonas como Dolores y Tandil (Figura 7).

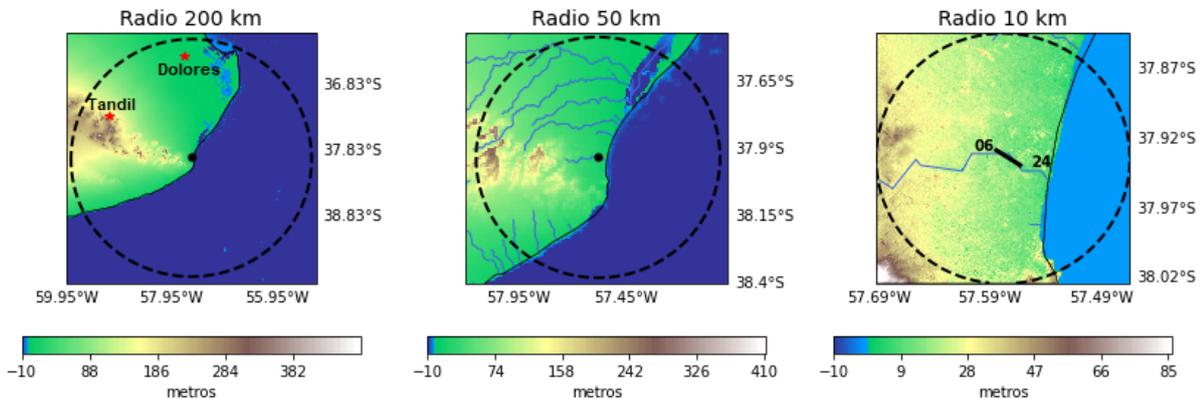


Figura 7: Mapa geográfico del área que rodea al aeropuerto SAZM, generado con información del DEM a partir de la misión SRTM. En el mapa de radio 200 km se muestra la localización de Dolores y Tandil con estrellas rojas y en el mapa de radio 10 km se muestran las pistas con sus respectivas numeraciones.

Para los pronosticadores, el problema más grave respecto de la ocurrencia de visibilidad reducida en esta región del país recaería en las nieblas persistentes en el tiempo (días enteros) y en nieblas generalizadas que afectan tanto al aeropuerto principal como también a todos los aeropuertos alternativos cercanos. Un patrón de circulación que se podría relacionar con estos fenómenos en los meses de invierno es la localización de un anticiclón persistente en la costa noreste de la Patagonia argentina. Bajo esta hipótesis, el constante flujo del E o SE sobre las costas de Buenos Aires advecharía masas húmedas de aire que terminarían conduciendo a la saturación a lo largo de toda la zona costera (incluye Montevideo) y en el interior de la provincia e incluso también pudiendo llegar a afectar el sur de Entre Ríos y Santa Fe.

3.2.5 Rosario (SAAR)

Si bien, según los entrevistados, Rosario queda incluido dentro de los aeropuertos afectados por los eventos de nieblas advectivas-radiativas generalizadas sobre la región centro-este del país, los estudios mostraron que la mayoría de los eventos de visibilidad reducida no se deben a este tipo de nieblas. A partir de Lapido (2019), se encontró que la mayoría de estos eventos de nieblas y neblinas se concentran y duran más en los meses de menor insolación diaria (invierno), mientras que la menor frecuencia y menor duración se presenta en los meses de verano. Por otro lado, si se analiza la influencia de la dirección del viento a la hora del inicio de un evento de niebla, se obtiene que el 45% de los casos comienzan con el viento en calma. Entre los eventos restantes, se destaca una dirección predominante del S mientras que, en segundo lugar, se observa una dirección preponderantemente del sector E. Como se observa en la Figura 8, tanto al sur como al este del aeropuerto se tiene a 10 km la presencia del río Paraná y sus humedales asociados, que podrían ser responsables de proveer la humedad necesaria para la ocurrencia de los eventos de niebla analizados. En cuanto a la distribución de la visibilidad a lo largo del día se observó, en el mencionado trabajo, que las horas con visibilidad reducida son principalmente las horas nocturnas, registrándose un mínimo de visibilidad durante los meses fríos, así como también entre las 2 y las 9 de la mañana. De un total de 185 eventos analizados y utilizando el criterio de clasificación definido en Tardif y Rassmussen (2007), 139 representan eventos de niebla radiativa (75%), 16 de niebla por evaporación de la precipitación (9%), 13 de niebla advectiva (7%), 9 de niebla por descenso del techo de nube (5%) y 8 corresponden a otros procesos/mecanismos (4%).

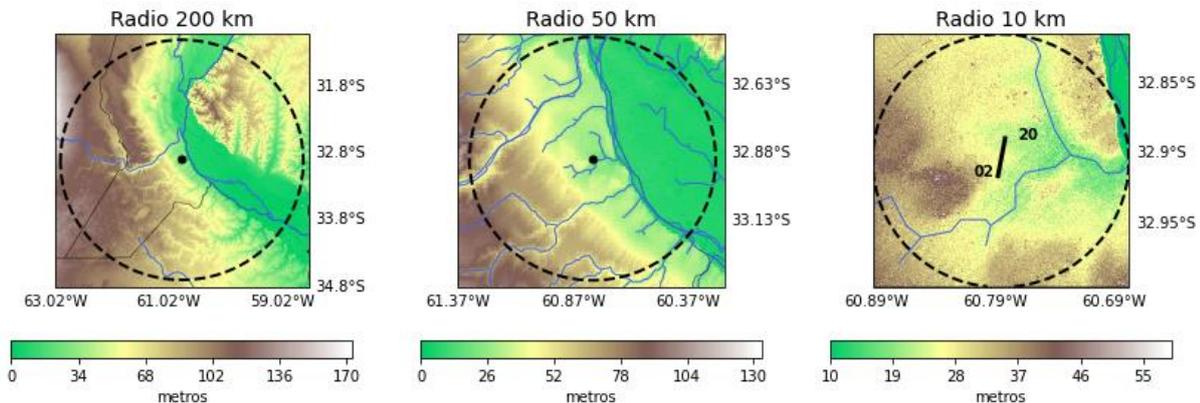


Figura 8: Mapa geográfico del área que rodea al aeropuerto SAAR, generado con información del DEM a partir de la misión SRTM. En el mapa de radio 10 km se muestran las pistas con sus respectivas numeraciones.

3.2.6 Córdoba (SACO)

A partir de la Figura 9 se observa que el aeropuerto de Córdoba está rodeado de una topografía compleja pocos kilómetros al oeste, la cual frecuentemente actúa como forzante mecánico y térmico para la formación de convección húmeda profunda (Repinaldo y otros, 2017). Según la experiencia de los pronosticadores, en este aeropuerto la mayor ocurrencia corresponde a nieblas radiativas y en segundo lugar advectivas asociadas a pasajes frontales. La climatología de nieblas a partir de datos SYNOP para el período 2000-2007 realizada por alumnos dentro del marco de los trabajos prácticos de la materia Meteorología Aeronáutica dictada en 2010 (Cerrudo, Chiavetta, Hobouchian, Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Argentina), mostró que en el 53% de las horas con ocurrencia de niebla, la visibilidad no superó los 300 metros. Los porcentajes disminuyen a medida que aumentan los umbrales de visibilidad y se concluyó que la formación de niebla no es sumamente frecuente, pero cuando ocurre es muy densa (visibilidad menor a 300 metros). La mayor frecuencia de eventos de niebla se observó durante el otoño y el invierno, teniendo su máximo en el mes de Julio, y muy pocos casos en primavera y verano. Los eventos de niebla se inician, en su mayoría, en horas de la madrugada y primeras horas de la mañana (entre las 5 y las 7 hs), prácticamente no habiendo casos que comienzan por la tarde. Son infrecuentes los casos en que los eventos terminan en horas de la madrugada o por la noche, de hecho, en gran parte de ellos, la niebla se disipa entre las 7 y las 9 de la mañana. Al considerar las horas de niebla, domina la dirección del viento N y NE, siendo más frecuente el viento débil, entre 2 y 4 nudos. Por estas razones, los alumnos concluyeron que la formación de nieblas en esta localidad se debe, en su mayoría, a procesos radiativos. Esto coincide con las experiencias de los pronosticadores locales, quienes relacionan las nieblas intensas y persistentes por varios días con la localización de un anticiclón migratorio entre Bahía Blanca y Península Valdés, generando viento del E y altas presiones en la ciudad, generalmente asociado a un frente estacionario cuando el aeropuerto queda del lado frío. Es una situación muy difícil de pronosticar ya que un pequeño desplazamiento del frente implica grandes cambios en las condiciones de visibilidad.

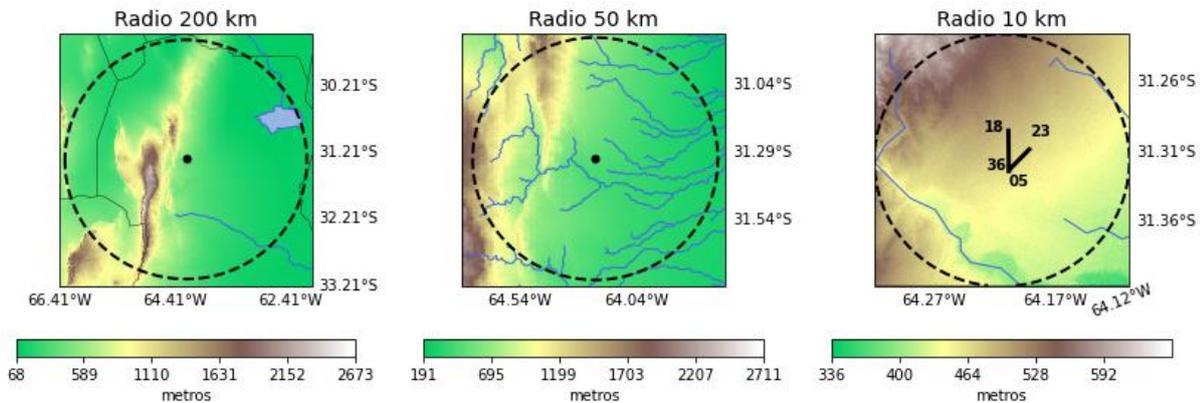


Figura 9: Mapa geográfico del área que rodea al aeropuerto SACO, generado con información del DEM a partir de la misión SRTM. En el mapa de radio 10 km se muestran las pistas con sus respectivas numeraciones.

3.2.7 Bariloche (SAZS)

Dada la fuerte interacción entre las nieblas y la orografía, el aeropuerto de Bariloche inmerso en un entorno caracterizado por lagos, bosques y la orografía de la Cordillera de los Andes, mostrado en la Figura 10, presentaría un patrón de ocurrencia de nieblas no vinculado al ciclo radiativo. Si bien las nieblas no serían frecuentes, los pronosticadores aseguran que cuando efectivamente se forman, lo hacen de forma muy sorpresiva y muy localizada lo cual dificulta el pronóstico de su disipación. En este aeropuerto pueden estar definidos dos posibles efectos (en comunicación personal con Raul Rodano). Por un lado, la advección desde el Lago Nahuel Huapi asociado a vientos con componente NO y por el otro, la advección de masas de aire más frías provenientes de la orografía asociada a la dirección SE. Respecto a la primera hipótesis, cuando el viento frío fluye del NO, lo hace sobre la superficie del lago relativamente más cálida lo que podría favorecer la formación de nieblas. El intenso gradiente de tensión de vapor entre la masa de aire inmediatamente por encima de la superficie del agua y la masa de aire fría genera una mezcla turbulenta que conduce a la saturación y formación de niebla (Byers, 1959). Si el viento no es lo suficientemente intenso como para disiparlas, estas nieblas podrían ser advectadas hacia la tierra en dirección al aeropuerto. El segundo posible efecto está vinculado con la topografía, ya que hacia el sudeste existe una pendiente pronunciada (Figura 10, panel central) que generaría un ciclo diario de brisas de montaña. De esta forma, el flujo de esa dirección podría deberse a una circulación catabática que advecta masas de aire frío y húmedo, las cuales se depositarían sobre el aeropuerto y permanecerían allí estancadas gracias a un pequeño relieve al NO que funciona como barrera paralela a la costa del lago (Figura 10, panel derecho). Por esta misma razón podrían ser tan persistentes: la radiación solar entrante en los meses de invierno no es suficiente para atravesar la capa de niebla, calentar la superficie, permitiendo su posterior disipación. Según los pronosticadores, existen condiciones sinópticas que serían propicias para la formación de nieblas densas, persistentes y generalmente de larga extensión, tales como anticiclones migratorios con su capa estable profunda. Estos sistemas generarían condiciones de baja visibilidad en todos los aeropuertos de la región dificultando las operaciones incluso en los aeropuertos alternativos como el de Neuquén o San Martín de los Andes.

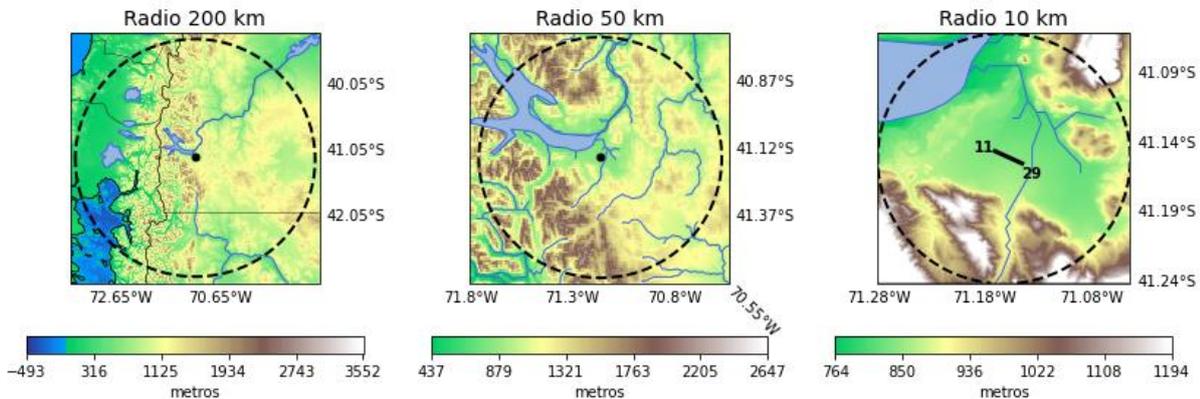


Figura 10: Mapa geográfico del área que rodea al aeropuerto SAZS, generado con información del DEM a partir de la misión SRTM. En el mapa de radio 10 km se muestran las pistas con sus respectivas numeraciones.

3.2.8 Neuquén (SAZN)

Las condiciones que afectan al aeropuerto de Neuquén son similares a las que afectan al aeropuerto de Bariloche cuando se trata de nieblas persistentes, aunque es poco frecuente que un mismo evento generalizado de niebla afecte a ambos aeropuertos. La topografía cercana que se muestra en la Figura 11, asociada con el clima seco continental conduce a una baja frecuencia de nieblas en comparación con otros aeropuertos, según los pronosticadores. Estos observaron a partir de la experiencia, que su ocurrencia aumenta considerablemente en condiciones de alta presión posteriores a una precipitación (pase frontal) o de una persistencia de viento del E. Un posible aporte de humedad a la capa límite estaría dado por un canal de riego ubicado al norte a lo largo de toda la pista, el cual también contribuiría, en los días más fríos y vientos leves desde esa dirección, a formar nieblas por evaporación que posteriormente serían trasladadas hacia la pista. También en relación a la traslación, según los pronosticadores, son frecuentes las nieblas ya formadas provenientes desde chacras y campos de cultivo a partir de la mayor humedad disponible en las capas de aire más cercanas al suelo.

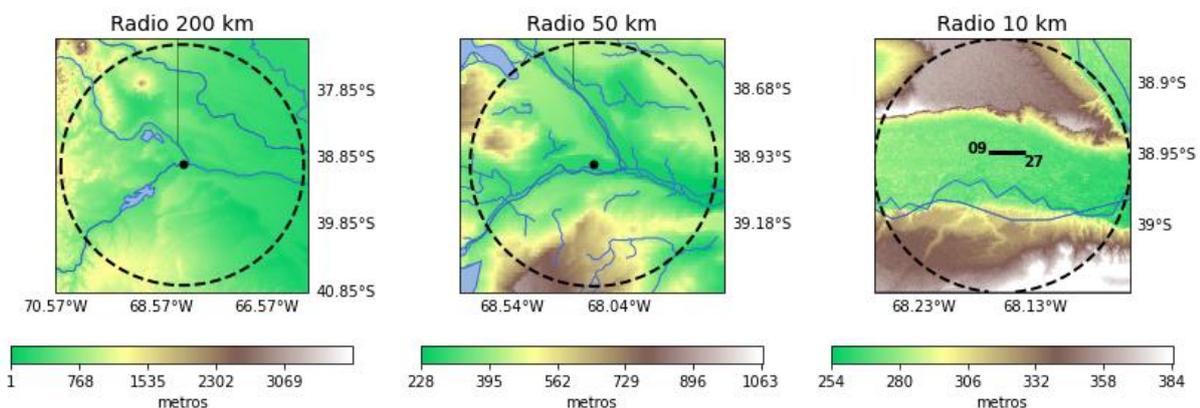


Figura 11: Mapa geográfico del área que rodea al aeropuerto SAZN, generado con información del DEM a partir de la misión SRTM. En el mapa de radio 10 km se muestran las pistas con sus respectivas numeraciones.

3.2.9 Ushuaia (SAWH)

La topografía que rodea al aeropuerto de Ushuaia no es comparable con ninguna otra en el país y se muestra en la Figura 12. Está rodeada de agua por estar en una península y la Cordillera de los Andes como barrera hacia el norte. Según los pronosticadores, la mayoría de casos de niebla suceden con vientos muy leves y direcciones casi siempre de componente E (mayormente ESE). Las circulaciones del S-SO, tenderían a generar un estancamiento del aire frío debido a la barrera montañosa facilitando la reducción de visibilidad por techos bajos y lloviznas/ventisca. Una de sus hipótesis se basa en el hecho de que sea una zona con intensos vientos lo cual reduciría la frecuencia de ocurrencia de nieblas y favorecería más la producción de estratos bajos.

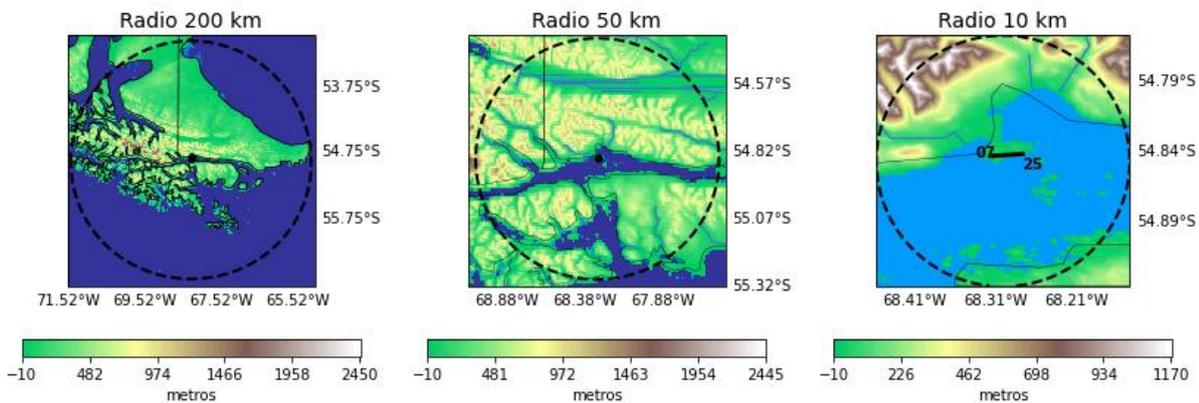


Figura 12: Mapa geográfico del área que rodea al aeropuerto SAWH, generado con información del DEM a partir de la misión SRTM. En el mapa de radio 10 km se muestran las pistas con sus respectivas numeraciones.

3.2.10 Río Grande (SAWE)

Existe una gran diferencia climatológica entre el aeropuerto de Ushuaia y el aeropuerto de Río Grande que se encuentra relativamente a poca distancia (125 km aproximadamente) al norte. En Río Grande, cuya topografía se muestra en la Figura 13, mayormente ocurren nieblas radiativas, advectivas o la combinación de ambas, según los pronosticadores. La ocurrencia de nieblas estaría asociada a la persistencia de flujos con componente N y también O. La costa oceánica, funcionaría como reservorio de agua y fuente de humedad para las masas de aire. Los pronosticadores han observado, a partir del registro horario de reportes METAR/SPECI, que existe un defasaje temporal entre el inicio del viento predominante desde esa dirección y la formación de nieblas de aproximadamente 24 horas. El trabajo climatológico hecho por Piccolo (1983), muestra que las máximas frecuencias ocurren en invierno con una duración de hasta 7 hs en general, aunque existen algunos casos extremos de nieblas de hasta cuarenta horas de duración que están asociados a situaciones de oclusión y bloqueo también en los mismos meses. Analizando las frecuencias de distintas direcciones del viento durante la ocurrencia de nieblas se encontró que el 75% responde a condiciones de calma y el 25% restante responde a viento del NNO y E lo cual indica una importante influencia oceánica (Fig. 13). A partir de estudiar los mapas sinópticos de altura y superficie precedentes y durante las horas de niebla, en dicho trabajo se encontró que en su mayoría las nieblas son de tipo advectivo aunque algunas veces están combinadas con las de tipo radiativo. En algunos casos también se comprobó que las nieblas están asociadas a pasajes frontales.

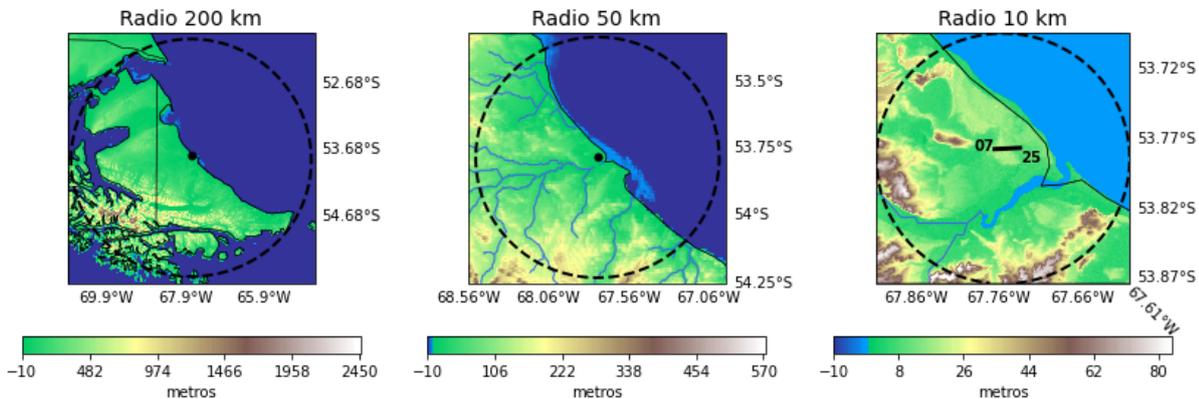


Figura 13: Mapa geográfico del área que rodea al aeropuerto SAWE, generado con información del DEM a partir de la misión SRTM. En el mapa de radio 10 km se muestran las pistas con sus respectivas numeraciones.

3.2.11 Río Gallegos (SAWG)

En Río Gallegos, serían más frecuentes los casos de niebla radiativa cuando el viento disminuye su velocidad a casi calmas y el descenso de temperatura es muy brusco, sobre todo después de un pasaje frontal (condiciones anticiclónicas) o después de una precipitación, de acuerdo a la experiencia de los pronosticadores. En esta hipótesis, los meses de mayor frecuencia serían los invernales, entre Mayo y Agosto, y al ser puramente radiativas, se disiparían horas después del amanecer y antes del mediodía, como lo han observado. Para los pronosticadores el problema radica en las nieblas posiblemente asociadas a procesos advectivos ya que son más complejas de pronosticar. Estos fenómenos pueden suceder en cualquier época del año, aunque se piensa que se producen en mayor cantidad en los meses fríos cuando se le suma a la advección, un largo período de enfriamiento radiativo nocturno. Estas posibles nieblas advectivas surgirían como producto de la circulación desde el N y NE ya que en esa dirección se encuentra el estuario que conecta el Río Gallegos con la Costa Atlántica, como se muestra en la Figura 14. Sorprendentemente, los pronosticadores han experimentado casos de formación de nieblas incluso con vientos muy intensos, aunque el factor más determinante sería la presencia o ausencia de nubosidad que favorezca el calentamiento o el enfriamiento de la superficie. Similar a lo que sucede con el aeropuerto de Bariloche, al norte del aeropuerto de Río Gallegos se encuentra un estuario que funciona como fuente de humedad y al norte de dicho estuario, una elevación de gran altura orientada zonalmente (Figura 14). Una de las hipótesis se basa en las masas de aire sobre dicha elevación que serían trasladadas hacia el sur y al fluir a través del estuario (superficie de agua relativamente más cálida) generarían evaporación por el contraste de temperaturas. Esto daría lugar a que la masa de aire que ingresa al aeropuerto tenga suficiente contenido de humedad de forma tal que alcance la saturación cuando avanza sobre la tierra fría nuevamente. La climatología hecha por alumnos de la materia Meteorología Aeronáutica en 2010 (Boverini, Rivaben, Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Argentina) coincide con que los meses de máxima frecuencia de ocurrencia de nieblas son los comprendidos entre Mayo y Agosto aunque en Mayo y Junio se forman las nieblas más densas que generan una visibilidad de menos de 300 m. La máxima frecuencia de ocurrencia de nieblas se concentra entre las 0 y 10 de la mañana, lo cual conduce a pensar en una estrecha relación con el ciclo de calentamiento radiativo diario.

Para los pronosticadores, una situación que genera muchos problemas en todos los aeropuertos del sur de la Patagonia es la posición de los anticiclones de bloqueo. Si dichos sistemas se asientan sobre el Estrecho de Drake se genera una circulación marítima persistente que trae nieblas a todos los aeropuertos de la costa. Si se asientan sobre Tierra del Fuego/sur de Santa Cruz generan condiciones de buen tiempo y se pueden producir nieblas radiativas.

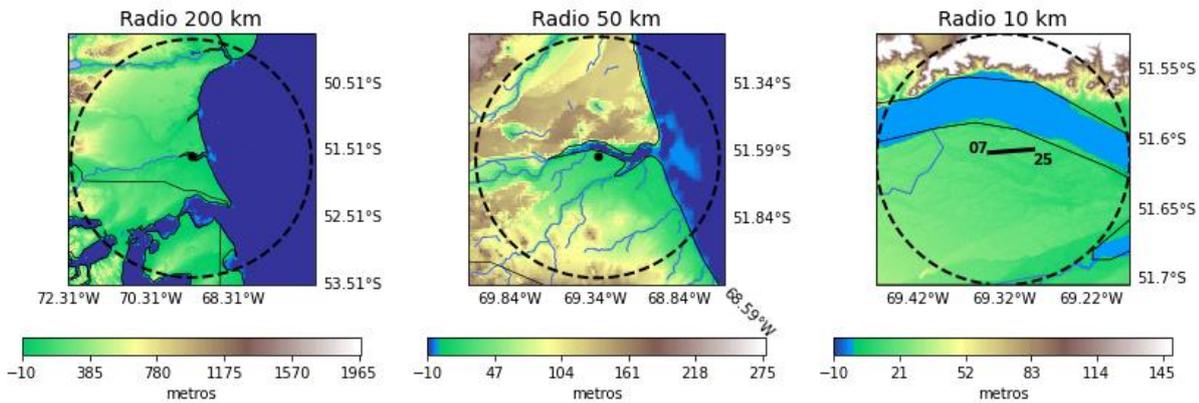


Figura 14: Mapa geográfico del área que rodea al aeropuerto SAWG, generado con información del DEM a partir de la misión SRTM. En el mapa de radio 10 km se muestran las pistas con sus respectivas numeraciones.

3.2.12 Resistencia e Iguazú (SARE, SARI)

En el noreste del país (FIR Resistencia), los humedales, la cantidad de cuerpos de agua y las abundantes precipitaciones, hacen de esta parte de Argentina una región muy húmeda (Prohaska, 1976). Si bien algunos pronosticadores aseguran que predominan las nieblas radiativas por las horas de formación y disipación, otros no descartan que el origen de las masas de aire que conducen a la formación de nieblas provenga de cuerpos de agua. Dentro de los aeropuertos más importantes de la FIR se encuentran Iguazú, Resistencia, Corrientes, Posadas, Reconquista, Goya, Formosa y Paso de los Libres. La mayoría de ellos está cerca de algún río o humedal como se puede ver que sucede para Resistencia e Iguazú en las Figuras 15 y 16, respectivamente. Esto sugiere que las nieblas en estos aeropuertos serían una combinación de los procesos advectivos y radiativos, es decir, habría una advección de aire húmedo (o de niebla que ya se haya formado) desde una superficie de agua hacia la tierra que se intensifica con el enfriamiento radiativo. La advección de bancos de niebla ya formados representa un gran problema para la actividad aeronáutica ya que las condiciones de visibilidad cambian en un corto período de tiempo y no siempre lo hacen sobre toda la pista. Nuevamente, la operación del aeropuerto en condiciones de visibilidad reducida depende del funcionamiento y la infraestructura instrumental de cada pista. De todas formas, según los pronosticadores, frecuentemente este tipo de nieblas conducen a formar estratos bajos cuando ingresan al aeródromo y, si es de noche, al generar una disminución en la tasa de enfriamiento radiativo del suelo inhiben la formación de nieblas radiativas en superficie. En esta región, es poco usual que varios aeropuertos estén afectados por las mismas condiciones de niebla o neblina. Si suceden eventos de nieblas generalizadas se podrían deber al mecanismo radiativo en situaciones tales como un anticiclón postfrontal cuyo centro se encuentra ubicado en Uruguay o sur de Brasil, de forma tal que la circulación sea del E (o levemente NE) con vientos debiles.

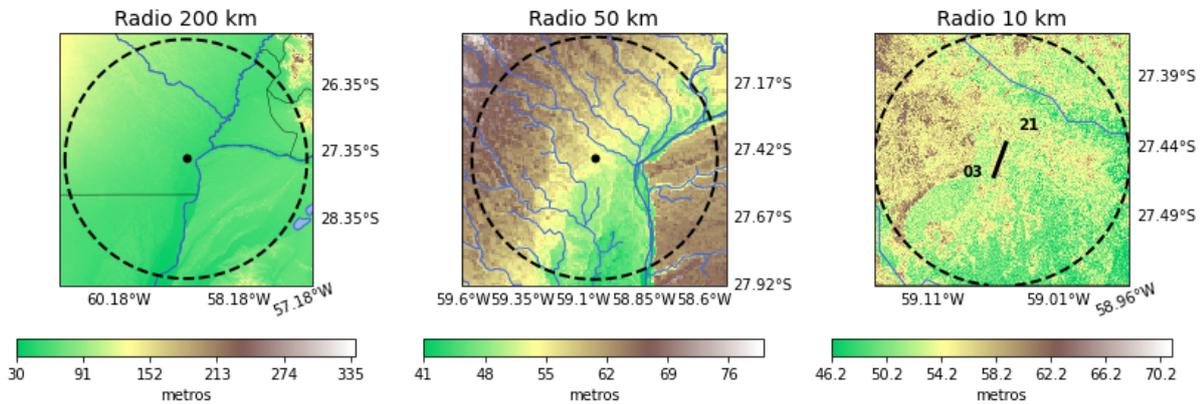


Figura 15: Mapa geográfico del área que rodea al aeropuerto SARE, generado con información del DEM a partir de la misión SRTM. En el mapa de radio 10 km se muestran las pistas con sus respectivas numeraciones.

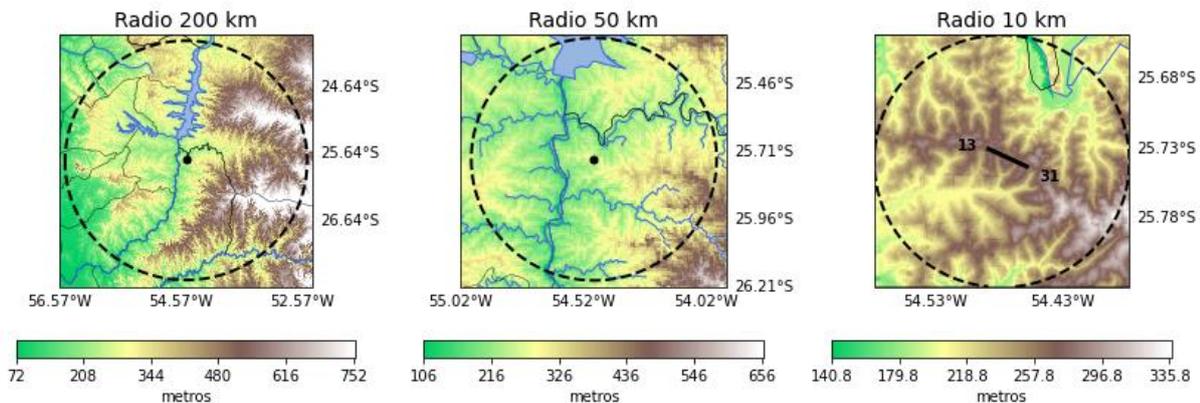


Figura 16: Mapa geográfico del área que rodea al aeropuerto SARI, generado con información del DEM a partir de la misión SRTM. En el mapa de radio 10 km se muestran las pistas con sus respectivas numeraciones.

3.2.13 Base Marambio

La meteorología en la Antártida es muy distinta a la que sucede en el continente. Según los pronosticadores, en verano la mayoría de las nieblas suceden cuando el flujo es cálido y fluye sobre el agua fría pero no congelada. Este tipo de nieblas, serían advectadas sobre la Base por un flujo del NNO-SO y se profundizarían con la turbulencia convectiva diurna. En cambio, en invierno observan que son más comunes las nieblas producto de la evaporación de la precipitación, la ventisca o los pasajes frontales. Frecuentemente sobre el océano se formarían estratos o nubes bajas que cuando son advectadas sobre la Base Marambio, isla amesetada de 196 m de altura, se reportarían como nieblas. Relacionado con este último aspecto, para los pronosticadores, otro tipo de nieblas frecuentes están asociadas a la disminución del techo de nubes justamente por tratarse de una estación en altura, es decir, una pequeña disminución en la altura de base de las nubes generaría una reducción de la visibilidad sobre la pista. En general, todos los tipos de nieblas anteriormente mencionadas se caracterizaron por ser muy repentinas y estar asociadas a fenómenos muy locales. De hecho, los pronosticadores locales definieron las nieblas o nubes “capuchón” ya que se pueden formar desde las laderas y cubrir toda la parte superior de la isla. Este tipo de fenómeno es muy difícil de pronosticar ya que comenzaría a formarse en regiones no visibles desde la estación, sin embargo, un

ingrediente fundamental para su pronóstico es la localización de una masa de aire polar entre la superficie del mar y una masa de aire templado. En esta situación, el vapor del mar se condensa dentro del aire polar y la parte superior de los estratos quedan por debajo del nivel de la isla. Otro tipo de nieblas frecuentes, especialmente en verano, son las nieblas orográficas o de pendiente. Estas se forman a partir de aire húmedo con trayectoria marítima que fluye desde el NE forzándolo a ascender cuando alcanza la meseta. El consecuente enfriamiento adiabático por el ascenso forzado es el que forma la nubosidad en el borde a barlovento de la meseta y se disipa a sotavento donde el aire desciende.

Respecto de la disipación de las nieblas o nubes bajas, principalmente dependería de las horas de luz solar y, por ende, de la época del año. Al estar situada a gran latitud, las horas de luz y la eficacia del calentamiento radiativo difieren notablemente entre los distintos meses.

3.3 Aspectos locales en general

Los pronosticadores y expertos en la temática observaron algunos mecanismos vinculados a aspectos muy locales y elaboraron hipótesis que podrían afectar a la formación de las nieblas o su evolución en la pequeña escala. Por ejemplo, en Aeroparque donde generalmente a partir del comienzo de la mayor densidad de edificios (Av. Libertador, CABA) la visibilidad crece abruptamente. Se intuye que esto está relacionado con la rugosidad del terreno y con la isla urbana de calor como mecanismos que inhiben la formación o promueven la disipación de nieblas. En Córdoba, tendría injerencia el hecho de que el aeropuerto esté a 500 m de altura, y se acercaría al nivel de condensación por ascenso cuando el aire es advechado pendiente arriba en un flujo del E. Si bien este fenómeno no está comprobado, la hipótesis surge a partir del monitoreo vía satélite de las masas de aire que empiezan a formar nubosidad sobre el terreno en pendiente. Otro escenario posible en esta región, podría ser la convergencia entre una masa de aire que desciende de la montaña o un borde frío producto de convección con una masa de aire estable cercana a la saturación que circule en dirección opuesta. Como ya se mencionó anteriormente, los pronosticadores suponen que las sierras de Tandil al oeste del aeropuerto de Mar del Plata tendrían un rol en la formación de las nieblas en dicho aeropuerto. Estas se formarían pendiente abajo y podrían ser advechadas hacia el aeropuerto como banco de niebla. En Neuquén, habría un efecto secundario que podría jugar un rol: en los meses de invierno para la prevención de heladas son encendidos los sistemas de calefacción en las fincas frutales, lo cual aportaría una cantidad de núcleos de condensación importantes, al mismo tiempo que el sistema de riego por aspersión contribuiría a saturar de humedad la masa de aire (comunicación personal con Raul Rodano). También relacionado con el aporte de la polución, en Ezeiza la cantidad de pequeñas industrias y de quemadas que hay en las zonas rurales también liberan desechos a la atmósfera que facilitarían la formación de gotitas muy pequeñas con menor grado de sobresaturación durante las nieblas por radiación.

3.4 Herramientas utilizadas para el pronóstico de las nieblas y neblinas

El SMN es responsable de suministrar la información meteorológica necesaria para garantizar la seguridad de la navegación aérea, nacional e internacional. Además, debe hacerlo con una frecuencia temporal suficiente para favorecer la regularidad y eficiencia del transporte aéreo. La industria aeronáutica y las actividades aeroportuarias exigen poder programar los vuelos con anticipación y que esos vuelos se puedan llevar a cabo tal como se programaron. Dada la cantidad de aeropuertos de los que un pronosticador debe ocuparse, no puede detenerse demasiado tiempo en el estudio de la formación o disipación de nieblas, por ende, las técnicas utilizadas actualmente, son de rápida actualización.

Para el pronóstico a corto y mediano plazo se parte del pronóstico por persistencia y se estudia la situación sinóptica. Se estudian principalmente las cartas de superficie y hasta 850 hPa ya que permiten tener una idea del contenido de humedad que hay en niveles bajos. El componente más importante o clave en el pronóstico es la experiencia y la constante autoevaluación del pronosticador. Otras observaciones meteorológicas que se utilizan son los reportes METAR/SPECI, tanto para analizar la evolución temporal del mismo aeropuerto como también para tener en cuenta las situaciones de los aeropuertos cercanos. El dato oficial aeronáutico sobre las condiciones actuales del aeropuerto se codifica dentro del reporte METAR (enviado cada una hora) o el SPECI (con mayor frecuencia en condiciones especiales) realizado por los observadores meteorológicos según lo establecido por la OACI (Anexo 3). Más recientemente, otra fuente de observaciones *in situ* sobre la pista con resolución temporal de un minuto son los Sistemas Automáticos de Observación Meteorológica (AWOS, por sus siglas en inglés). Estos sistemas de mediciones de RVR, temperatura, temperatura de punto de rocío, dirección y velocidad del viento ayudan a hacer un pronóstico a muy corto plazo, y son particularmente útiles para seguir de cerca la formación/disipación de las nieblas sobre la pista. Es importante destacar que esta información por sí misma no se utiliza de manera operacional, pero sirve de ayuda para el observador a la hora de armar el reporte METAR/SPECI. En los aeropuertos que dispongan de estos sistemas, a partir de la información minuto a minuto proveniente del AWOS se puede monitorear el comportamiento de la temperatura, la temperatura de punto de rocío, viento y visibilidad sobre la pista. Esta última fuente de información aún no dispone de estudios previos realizados en aeropuertos argentinos, por lo cual resulta útil para el monitoreo o el pronóstico a muy corto plazo pero no es todavía una herramienta que pueda darnos información para el pronóstico a plazos mayores. A partir de los radiosondeos o de los perfiles de temperatura provenientes de las mediciones a bordo de aeronaves (AMDAR, por sus siglas en inglés) se puede localizar una inversión térmica y, en base a su intensidad y altura, sacar conclusiones para poder estimar la hora de formación y la duración de la niebla (Gilson y otros 2018). La ventaja de los datos AMDAR es que proveen información de los primeros metros de altura sobre la pista mientras la aeronave despegue o aterrice, pero su desventaja es que son datos esporádicos y espontáneos ya que recaen sobre los aviones que aterricen o despeguen el aeropuerto en cuestión, es decir, en caso de que el aeropuerto se encuentre bajo mínimos no se podrá contar con estas mediciones ya que no hay tales operaciones.

Para el monitoreo y el seguimiento de la situación meteorológica se utilizan las imágenes satelitales del satélite meteorológico GOES-16 a partir del canal visible (canal 2) durante el día (Amani y otros 2020) y el producto compuesto RGB de microfísica nocturna por la noche. En las bases antárticas se utilizan las imágenes procesadas de satélites de la NOAA de órbita polar. Si bien estas imágenes tienen baja frecuencia temporal, en ocasiones son sumamente útiles para mejorar el pronóstico a muy corto plazo.

Los modelos numéricos de predicción atmosférica se utilizan como herramienta complementaria a todas las previamente mencionadas, aunque en general suelen fallar para las variables en superficie y en las cercanías a la orografía, lo cual es muy problemático para la predicción de nieblas. Los pronosticadores de ARG utilizan las salidas del modelo global GFS (Global Forecast System; Sela, 1980) de 0.25° de resolución horizontal ya que tiene muy buena precisión para los sistemas de mesoescala de acuerdo a su experiencia. Para el pronóstico de nieblas utilizan la salida de las 06 UTC (3:00 hora local) y analizan el gradiente vertical de humedad, el viento máximo dentro de la capa límite, el perfil vertical de temperatura y temperatura de punto de rocío. En ausencia de radiosondeos, se utilizan los radiosondeos modelados del READY (Real-time Environmental Applications and Display System. Rolph y otros 2017). Los pronosticadores del SMN opinan que en las regiones de topografía no compleja, el modelo regional WRF (Weather Research and Forecasting; Skamarock y otros, 2008) muestra un mejor desempeño y tiene la ventaja de su implementación con menor resolución horizontal que el GFS. En la región sur del país, los pronosticadores utilizan los pronósticos del SMN, el GFS regional, los modelos ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. Xie y

otros 2006), AROME (Applications of Research to Operations at Mesoscale. Seity y otros 2011) y el NMM (Nonhydrostatic Meso-Scale Model. Janjic y otros 2001; Janjic 2003) utilizado preferentemente en las cercanías a la cordillera. En cambio, en la región norte del país donde el clima es por momentos tropical, se utiliza el modelo ACCESS (Australian Community Climate and Earth System Simulator. K. Puri 2005a, b), BAM (Brazilian Global Atmospheric Model. Figueroa y otros 2016) y en verano, también el modelo WRF. Para el pronóstico en las bases antárticas, además de los modelos GFS y ECMWF antes mencionados, los pronosticadores utilizan el modelo AMPS (Antarctic Mesoscale Prediction System. Bromwich y otros 2003) que por su mayor resolución reproduce muy bien los sistemas de mesoescala con mucho detalle en altas latitudes y también utilizan los meteogramas de READY.

A la hora de pronosticar casos extremos de reducción de visibilidad o de persistencia de nieblas son muy tenidas en cuenta las estadísticas disponibles. El SMN realizó las climatologías de visibilidad reducida por umbrales en base a los reportes SYNOP entre 1998 y 2007 para los principales aeropuertos del país y ARG tiene realizadas estadísticas de bajo mínimos de al menos cinco años (2014-2018) en los aeropuertos en los que operan, pudiendo ocurrir que en algunos se hayan considerado más años (comunicación personal con Raul Rodano y Eduardo Fernandez). En cuanto a la información de horas bajo mínimos EANA S.E. tiene al FMU (Unidad de Gestión de Afluencia de Vuelos, por sus siglas en inglés), una división que manda informes estadísticos diarios sobre el tráfico aéreo en Ezeiza, Aeroparque y El Palomar. En esos informes se puede observar si alguno de dichos aeropuertos estuvo bajo mínimos en algún momento del día (sobre la implementación de este procedimiento en Argentina ver https://www.icao.int/SAM/Documents/2018-ATFM/ARG%20%20PPT%20Implantaci%C3%B3n%20ATFM-Argentina-Jun-18_final.pdf. Un ejemplo de informe se puede ver en <https://www.eana.com.ar/sites/default/files/2020-01/PDA%2017-01-20%20FMU%20EZE.pdf> donde la fecha “2020-01” representa a enero del 2020, y “17-01-20” al 17 del mes y año antes mencionado. Si se reemplaza con la fecha apropiada se puede obtener el informe deseado).

En aeropuertos donde las nieblas radiativas son más frecuentes, ARG utiliza con resultados prometedores el cálculo de la Temperatura de Crossover y el Número de Richardson Modificado (Baker y otros 2002) como estimaciones de saturación, estabilidad estática y turbulencia de la atmósfera. Si existe la posibilidad de una componente advectiva en las nieblas radiativas, es decir si existe una circulación persistente y fuerte de una dirección en niveles bajos desde una superficie no marina y llana, se mira la Temperatura de Crossover corriente arriba en vez de la local. También se hace el pronóstico a partir del cálculo del nivel de condensación por ascenso ya que a partir de ese valor se puede inferir la formación de estratos bajos.

El pronóstico del momento de la formación de nieblas resulta el más fácil de todos los otros parámetros de interés. Por el contrario, la cuantificación de la visibilidad y el pronóstico del momento de la disipación aún resultan un gran desafío. Este último pronóstico se basa en muchos casos puramente en la experiencia del pronosticador apoyado en gran parte en información climatológica. Parte de la dificultad del pronóstico es poder proyectar si la disipación alcanzará al aeropuerto o no, ya que una falla en este sentido ocasiona grandes inconvenientes. Las diferentes herramientas mencionadas en esta sección se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2: Herramientas disponibles para el monitoreo y pronóstico de visibilidad afectada por nieblas.

Herramientas para el pronóstico de niebla	Observaciones	Cartas	Análisis de cartas de superficie isalobárico y 850 hPa
		METAR/SPECI	Previos y de aeropuertos cercanos
		AMDAR	Inversión térmica en altura, estabilidad de los niveles cercanos al suelo, perfil de viento.
		Radiosondeos	
		AWOS	Visibilidad, RVR, depresión del punto de rocío, velocidad del viento
	Sensoramiento remoto	Radar	Viento (Doppler)
		Satélite	GOES-16 (Día: Canal 2 - Visible); Noche: compuesto RGB microfísica nocturna)
	Modelos numéricos	SMN	WRF, GFS, ECMWF
		Otros	GFS, BAM, ACCESS, NMM, ECMWF, AROME, AMPS
	Climatologías		Realizadas por SMN, INUMET, ARG,

4. CONCLUSIONES

La revisión aquí presentada permite ver que se han realizado numerosos estudios relacionados con diversos aspectos de la niebla a nivel internacional. En cambio, la cantidad de estudios en este campo llevados a cabo a nivel nacional es bastante acotada. Por esta razón, se ha considerado importante el aporte de los conocimientos adquiridos en la experiencia de aquellas personas que se dedican o dedicaron a la observación y/o al pronóstico de las nieblas en los aeropuertos nacionales.

En entrevistas individuales y grupales se discutió sobre los diversos mecanismos que interactúan con las nieblas y neblinas en cada aeropuerto. A partir de dicha información se pudieron obtener algunas conclusiones generales. Hipotéticamente, la niebla se forma, se desarrolla y se disipa como resultado de interacciones complejas entre varios procesos tanto locales, microfísicos, dinámicos, radiativos, químicos y condiciones de la capa límite, como también procesos meteorológicos de gran escala. Además, la geografía que rodea al aeropuerto cumpliría un rol dentro del ciclo de vida de dicho fenómeno meteorológico. Esta información oral

obtenida en las entrevistas (a veces en forma de conocimiento concreto, a veces en forma de hipótesis) sugiere varios caminos de investigación para aquellos interesados en atacar algunos de estos problemas. Estos estudios podrían, eventualmente, fortalecer las hipótesis aquí mencionadas como también mostrarlas erróneas.

El pronóstico del momento de la formación de nieblas es el más practicado y se encontraron múltiples herramientas complementarias entre sí para llevarlo a cabo de forma operacional: observaciones *in situ* en superficie y en altura, sensoramiento remoto a partir de satélites, modelos numéricos de predicción y estadísticas en base a climatologías. Por esta razón, dicho pronóstico resulta más fácil respecto de los otros parámetros de interés como la cuantificación de la visibilidad o el pronóstico del momento de la disipación, que aún resultan un gran desafío.

Agradecimientos

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, financiada por el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación de la Nación Argentina.

4. REFERENCIAS

Amani, M., S. Mahdavi, T. Bullock and S. Beale, 2020: Automatic nighttime sea fog detection using GOES-16 imagery, *Atmospheric Research*, Volume 238, 2020, 104712, ISSN 0169-8095, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104712>.

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

———, 2019(a): 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>

———, 2019(b): Anuario estadístico 2019. <https://datos.anac.gov.ar/estadisticas/article/055dd8be-984f-4c3c-b2ae-ce5037902295>

———, 2020: AIP Gen 3.5 Servicios Meteorológicos. Fecha de efectividad de la presente: 3 de DICIEMBRE de 2020. <http://ais.anac.gov.ar/descarga/aip-5f7eed8adea60>

Baker, R., J. Cramer, and J. Peters, 2002: Radiation Fog: UPS Airlines Conceptual Models and Forecast Methods, Preprints, 10th Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology, Portland, OR, Amer. Meteor. Soc., 5.11.

Bergot, T., and D. Guedalia, 1994: Numerical Forecasting of Radiation Fog. Part I: Numerical Model and Sensitivity Tests, *Monthly Weather Review*, 122(6), 1218-1230. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1994\)122<1218:NFORFP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1994)122<1218:NFORFP>2.0.CO;2)

- Bromwich, D. H., A. J. Monaghan, J. G. Powers, J. J. Cassano, H. Wei, Y. Kuo and A. Pellegrini, 2003: Antarctic Mesoscale Prediction System (AMPS): A Case Study from the 2000–01 Field Season, *Monthly Weather Review*, 131(2), 412-434. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2003\)131<0412:AMPSAA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2003)131<0412:AMPSAA>2.0.CO;2)
- Brown, R. and W.T. Roach, 1976: The physics of radiation fog: II – a numerical study. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 102, 335-354. <https://doi.org/10.1002/qj.49710243205>
- 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>
- 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>.
- Croft, P. J., 2003: Fog. *Encyclopedia of Atmospheric Sciences*, J. R. Holton, J. A. Curry, and J. A. Pyle, Eds., Academic Press, 777–792.
- 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).
- Duynkerke, P.G., 1999: Turbulence, radiation and fog in Dutch stable boundary layers, *Bound.-Layer Meteor.* 90, 447–477. <https://doi.org/10.1023/A:1026441904734>
- Figuroa, S. N., J. P. Bonatti, P.Y. Kubota, G.A. Grell, H. Morrison, S.R.M. Barros, J.P.R. Fernandez, E. Ramirez, L. Siqueira, G. Luzia, J. Silva, J.R. Silva, J. Pendharkar, V.B. Capistrano, D.S. Alvim, D. P. Enoré, F.L.R. Diniz, P. Satyamurti, I.F.A. Cavalcanti, P. Nobre, H.M.J. Barbosa, C.L. Mendes, and J. Panetta, 2016: The Brazilian Global Atmospheric Model (BAM): Performance for Tropical Rainfall Forecasting and Sensitivity to Convective Scheme and Horizontal Resolution, *Weather and Forecasting*, 31(5), 1547-1572. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-16-0062.1>
- Findlater, J., 1985: Field investigations of radiation fog formation at outstations, *Meteor. Mag.* 114, 187– 201.
- , W.T. Roach, and B.C. Mchugh, 1989: The Haar of North-East Scotland, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 115, 581–608.
- Fitzjarrald, D.R. and Lala, G.G., 1989: Hudson Valley Fog Environments, *J Appl. Meteor.* 28, 1303– 1328.
- Gilson, G. F., Jiskoot, H., Cassano, J. J., and Nielsen, T. R., 2018: Radiosonde-derived temperature inversions and their association with fog over 37 melt seasons in east Greenland. *J. Geophys. Res.* 123 9571–88
- Gultepe, I., Tardif, R., Michaelides, S. C., Cermak, J., Bott, A., Bendix, J., 2007: Fog research: A review of past achievements and future perspectives. *Journal of Pure and Applied Geophysics*, 164, 1121–1159.
- , 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](https://doi.org/10.1175/2008BAMS2354.1)

- , G. A. Isaac, P. Joe, P. Kucera, J. The´riault 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>.
- , T. Kuhn, M. Pavlonis, C. Calvert, J. Gurka, and G.A. Isaac, 2014b: Ice fog in Arctic during FRAM-IF project: Aviation and nowcasting applications. *Bulletin of American Meteorological Society*, 95, 211–226. DOI: [10.1175/BAMS-D-11-00071.1](https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00071.1)
- , 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/AMSMONOGRAPHS-D-16-0013.1>.
- , R. Sharman, P.D. Williams, B. Zhou, G. Ellrod, P. Minnis, S. Trier, S. Griffin, S.S. Yum, B. Gharabaghi, W. Feltz, M. Temimi, Z. Pu, L.N. Storer, P. Kneringer, M.J. Weston, H. Chuang, L. Thobois, A.P. Dimri, S.J. Dietz, G.B. Franc, M.V. Almeida and F. L. Albuquerque Neto, 2019: A Review of High Impact Weather for Aviation Meteorology. *Pure Appl. Geophys.* 176, 1869–1921. DOI: [10.1007/s00024-019-02168-6](https://doi.org/10.1007/s00024-019-02168-6)
- 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>.
- Holets, S. and R. N. Swanson, 1981: High-inversion fog episodes in Central California, *J. Appl. Meteor.* 20, 890–899. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1981\)020<0890:HIFEIC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1981)020<0890:HIFEIC>2.0.CO;2)
- INUMET, 2014: Tablas y resúmenes climatológicos, <https://www.inumet.gub.uy/aeronautica/tablas-y-resumenes-climatologicos>.
- Janjic, Z. I., 2003: A nonhydrostatic model based on a new approach. *Meteor. Atmos. Phys.*, 82, 271–285. DOI: [10.1007/s00703-001-0587-6](https://doi.org/10.1007/s00703-001-0587-6)
- , J. P. Gerrity and S. Nickovic, 2001: An alternative approach to nonhydrostatic modeling. *Mon. Wea. Rev.*, 129, 1164–1178. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2001\)129<1164:AAATNM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2001)129<1164:AAATNM>2.0.CO;2)
- Lala, G.G., E. Mandel, and J.E. Jiusto, 1975: A numerical investigation of radiation fog variables, *J. Atmos. Sci.* 32, 720–728. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1975\)032<0720:ANEORF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1975)032<0720:ANEORF>2.0.CO;2)
- Lapido, B., 2019: Estudio preliminar de nieblas 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.
- Ley 27161: Empresa Argentina de Navegación Aérea. Creación. Senado y Cámara de Diputados de la Nación Argentina. Sancionada: Julio 15 de 2015. Promulgada: Julio 29 de 2015.
- Mensbrugge, V., 1892: The formation of fog and of clouds, translated from *Ciel et Terre*, Symons's Monthly Meteor. Magazine 27, 40–41.
- 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

Neumann, J., 1989: Forecasts of fine weather in the literature of classical antiquity, *Bull. Am. Meteor. Soc.* 70, 46–48. <https://doi.org/10.1175/1520-0477-70.1.46>

NOAA, 1995: Surface weather observations and reports, Federal Meteorological Handbook No. 1, 94 pp. [Available from Department of Commerce, NOAA, Office of the Federal Coordinator for Meteorological Services and Supporting Research, 8455 Colesville Road, Suite 1500, Silver Spring, MD, 20910. <https://www.icams-portal.gov/publications/fmh/FMH1/FMH1.pdf>

NTSB 2010: NASDAC Review of National Transportation Safety Board (NTSB) weather-related accidents (2003–2007). <http://www.asias.faa.gov/>.

OACI, 2016: Anexo 3: Servicio Meteorológico para la Navegación aérea internacional. <https://www.anac.gov.ar/anac/web/uploads/normativa/anexos-oaci/anexo-3.pdf>

OACI, 2016: Anexo 6: Operación de Aeronaves. <https://www.anac.gov.ar/anac/web/uploads/normativa/anexos-oaci/anexo-6-parte-i.pdf>

Piccolo, M. C., 1983: Resultados preliminares de un estudio de nieblas en Río Grande. *Meteorológica*. Vol. XIV. N° 1 y 2. Págs. 213 a 224.

Pillie, 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)

Prohaska, F., 1976: The climate of Argentina, Paraguay, and Uruguay. In: Schwertfeger, W. (Ed.), *Climates of Central and South America*. *World Surv. Climatol.* 12, 13–73.

Puri, K., 2005a: Blueprint for ACCESS, June 2005, Bureau of Meteorology. http://www.accessimulator.org.au/file/blueprint_access20050630.doc

———, 2005b: Project Plan for ACCESS, September 2005, Bureau of Meteorology. http://www.accessimulator.org.au/file/projplan_access20050916.doc

Quinteros de Menzies, C. Y., Obertello, I., 1972: Pronóstico objetivo de nieblas en Ezeiza. Publicación de la Fuerza Aérea Argentina, Comando de regiones aéreas, Servicio Meteorológico Nacional, Serie C, 12, 32 páginas.

Repinaldo, H. F., M. Nicolini, and Y. Skabar Gracia, 2017: Inclinación de un sistema convectivo sobre las Sierras de Córdoba y sensibilidad a modificaciones en el perfil orográfico. *Meteorológica*, 42, 23–42. http://www.meteorologica.org.ar/wp-content/uploads/2018/01/RevistaMeteorologica_Vol42N2.pdf

Roach, W.T., 1976: On the effect of radiative exchange on the growth by condensation of a cloud or fog droplet, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 102, 361–372. <https://doi.org/10.1002/qj.49710243207>

———, R. Brown, R. Caughey, S.J. Garland and C.J. Readings, 1976: The physics of radiation fog: I – A field study, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 102, 313–333. <https://doi.org/10.1002/qj.49710243204>

———, 1995: Back to basics: Fog: Part 2 – The formation and dissipation of land fog, *Weather* 50, 7–11. <https://doi.org/10.1002/j.1477-8696.1995.tb06053.x>

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: Real-time 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

Ryznar, E., 1977: Advection-radiation fog near Lake Michigan, Atmos. Environ. 11, 427–430. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(77\)90004-X](https://doi.org/10.1016/0004-6981(77)90004-X)

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.

Scott, R.H., 1894: Fogs reported with strong winds during the 15 years 1876–90 in the British Isles, Quart. J. Roy. Meteor. Soc. XX, 253–262. <https://doi.org/10.1002/qj.4970209204>

———, 1896: Notes on some of the difference between fogs, as related to the weather systems which accompany them, submitted to the Fog Committee, Quart. J. Roy. Meteor. Soc. XXII, 41–65.

Seity, Y., P. Brousseau, S. Malardel, G. Hello, P. Bénard, F. Bouttier, C. Lac, and V. Masson, 2011: The AROME-France convective-scale operational model. Mon. Wea. Rev., 139, 976–991, [doi:10.1175/2010MWR3425.1](https://doi.org/10.1175/2010MWR3425.1).

Sela, J.G., 1980: Spectral modeling at the National Meteorological Center. Mon Weather Rev 108:1279–1292. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1980\)108<1279:SMATNM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1980)108<1279:SMATNM>2.0.CO;2)

Skamarock, W.C., J.B. Klemp, J. Dudhia, D.O. Gill, D.M. Barker, M.G. Duda, X.Y. Huang, X.Y. and J.G. Wang Wand Powers, 2008: A Description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR TECHNICAL NOTE June 2008. Mesoscale and Microscale Meteorology Division, National Center for Atmospheric Research Boulder, Colorado, USA.

SMN, 2008: Maproma parte 7 - Climatología Aeronáutica. <http://www3.smn.gov.ar/intra/index.php?mod=htms&id=2>

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>

Taylor, G.I., 1917: The formation of fog and mist, Quart. J. Roy. Meteor. Soc. 43, 241–268. [doi:10.1002/qj.49704318302](https://doi.org/10.1002/qj.49704318302)

Toth, G., I. Gultepe, J. Milbrandt, B. Hansen, G. Pearson, C. Fogarty and W. Burrows, 2010: The Environment Canada Handbook on Fog and Fog Forecasting. <http://www.ec.gc.ca/Publications/default.asp?lang=En&xml=8366E97B-2DD6-4EBD-B5C0-216089>

Turton, J.D. and R. Brown, 1987: A comparison of a numerical model of radiation fog with detailed observations, Quart. J. Roy. Meteor. Soc. 113, 37–54. <https://doi.org/10.1002/qj.49711347504>

Valdez, J., 2000: National Weather Service—A high impact agency . . . we make a difference: Reinvention goals for 2000. National Weather Service. <http://govinfo.library.unt.edu/npr/library/announc/npr5.htm>.

Vasques Ferro, R. y C. Ribero, 2015: Formación de nieblas en Aeroparque Jorge Newbery. XII CONGREMET, Mar del Plata, Argentina.

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](https://doi.org/10.1016/0004-6981(77)90042-7)

Willett, H.C., 1928: Fog and haze, their causes, distribution, and forecasting, Monthly Weather Rev. 56, 435–468. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1928\)56<435:FAHTCD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1928)56<435:FAHTCD>2.0.CO;2)

WMO, 1966: International Meteorological Vocabulary (World Meteorological Organization. Geneva Switzerland).

Xie, S., S.A. Klein, J.J. Yio, A.C.M. Beljaars, C.N. Long, and M. Zhang, 2006: An assessment of ECMWF analyses and model forecasts over the North Slope of Alaska using observations from the ARM Mixed-Phase Arctic Cloud Experiment. J Geophys Res, 111. [doi:10.1029/2005JD006509](https://doi.org/10.1029/2005JD006509)

Instrucciones para publicar Notas Técnicas

En el SMN existieron y existen una importante cantidad de publicaciones periódicas dedicadas a informar a usuarios distintos aspectos de las actividades del servicio, en general asociados con observaciones o pronósticos meteorológicos.

Existe no obstante abundante material escrito de carácter técnico que no tiene un vehículo de comunicación adecuado ya que no se acomoda a las publicaciones arriba mencionadas ni es apropiado para revistas científicas. Este material, sin embargo, es fundamental para plasmar las actividades y desarrollos de la institución y que esta dé cuenta de su producción técnica. Es importante que las actividades de la institución puedan ser comprendidas con solo acercarse a sus diferentes publicaciones y la longitud de los documentos no debe ser un limitante.

Los interesados en transformar sus trabajos en Notas Técnicas pueden comunicarse con Ramón de Elía (rdelia@smn.gov.ar), Luciano Vidal (lvidal@smn.gov.ar) o Martin Rugna (mrugna@smn.gov.ar) de la Dirección Nacional de Ciencia e Innovación en Productos y Servicios, para obtener la plantilla WORD que sirve de modelo para la escritura de la Nota Técnica. Una vez armado el documento deben enviarlo en formato PDF a los correos antes mencionados. Antes del envío final los autores deben informarse del número de serie que le corresponde a su trabajo e incluirlo en la portada.

La versión digital de la Nota Técnica quedará publicada en el Repositorio Digital del Servicio Meteorológico Nacional. Cualquier consulta o duda al respecto, comunicarse con Melisa Acevedo (macevedo@smn.gov.ar).