IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL FIR ANTOFAGASTA-CHILE

DIRECCIÓN METEOROLÓGICA DE CHILE
SECCIÓN CLIMATOLOGÍA
OFICINA CAMBIO CLIMÁTICO

ELABORADO POR CAROLINA VILCHES DELGADO

Carolina.vilches@dgac.gob.cl

DIRECCIÓN METEOROLÓGICA DE CHILE

SUBDEPARTAMENTO CLIMATOLOGÍA Y METEOROLOGÍA APLICADA

SECCIÓN CLIMATOLOGÍA

OFICINA CAMBIO CLIMÁTICO

AGOSTO 2022

CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN 1

2. DATOS Y METODOLOGÍA 2

2.1 Delimitación geográfica 2

2.2 Datos y métodos 2

3. CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS DE LA ZONA 4

4. ANÁLISIS DE LAS VARIABLES QUE AFECTAN A LAS OPERACIONES AÉREAS 5

4.1 Anomalías y tendencias de precipitación y temperaturas extremas 6

4.2 Tendencias de los índices climáticos extremos 11

4.3 Altitud de densidad 13

4.4 Viento 15

4.5 Base de la altura de las nubes 20

4.6 Tiempo presente 21

5. RESTRICCIONES AERONÁUTICAS 22

6. DISCUSIÓN Y RESULTADOS 23

7. BIBLIOGRAFÍA 24

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático se ha convertido en los últimos años en el gran desafío a nivel mundial, ya que afecta de múltiples maneras a todas las regiones de la Tierra.
Además de su grave impacto sobre el medio ambiente y las personas, el cambio climático también es una de las mayores amenazas para la estabilidad económica. Particularmente, el sector económico de la aviación reconoce su vulnerabilidad por ser altamente sensible a los cambios a las variables meteorológicas, por lo tanto, la exigencia en mejorar el conocimiento y el desarrollo científico es cada vez más importante, considerando que el tránsito aéreo se ha duplicado en los últimos años.

La navegación aérea en Chile debido a la gran extensión del territorio, se divide en seis Regiones de Información de Vuelo (FIR), que es el espacio aéreo de dimensiones definidas, dentro del cual se facilitan los servicios de información de vuelo y alerta, los cuales son; FIR Antofagasta, FIR Santiago, FIR Puerto Montt, FIR Punta Arenas, FIR Isla de Pascua y FIR Antártica.

En este informe en particular, se analizarán las variables meteorológicas en superficie de estaciones ubicadas dentro del FIR Antofagasta, las cuales por su ubicación cuentan con una alta variabilidad entre ellas, especialmente entre la precipitación y la temperatura, producto de los diferentes factores climáticos que influyen en la zona. El FIR cuenta con 3 aeropuertos ubicados cerca de la costa; Chacalluta en Arica, Diego Aracena en Iquique y Andrés Sabella en Antofagasta, además de 3 Aeródromos; El Loa en Calama, Desierto de Atacama en Caldera y el Aeródromo Vallenar ubicado en esa ciudad, los cuales favorecen la conexión de las personas y hacia las mineras que se encuentran en la zona con el resto del país.

El análisis de las variables aeronáuticas se analizará sólo en los aeropuertos debido a la cantidad de información existente, con el objetivo de comprender mejor los impactos del cambio climático en el sistema aeronáutico y también como una manera de contribuir al conocimiento de las variaciones climáticas, sirviendo de herramienta para la adaptación y la actualización de procedimientos que minimicen los posibles riesgos en la navegación aérea.

2. DATOS Y METODOLOGÍA

2.1 Delimitación geográfica

La región de información de vuelo del FIR Antofagasta abarca desde el límite norte 18°21' S hasta el límite sur 28°30' S y desde el límite este en la frontera chileno-argentina con el límite oeste en los 90°00' W. El límite vertical inferior es tierra y/o agua y el superior el nivel de vuelo máximo permitido.

2.2 Datos y métodos

Todas las estaciones meteorológicas utilizadas en este estudio son parte del FIR Antofagasta (Fig. 1) y corresponden a la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) y a la Dirección General de Aguas (DGA) (Tabla 1), en donde se analizaron las variables meteorológicas de precipitación, viento y temperatura (máxima, mínima y media) desde el 1 de enero del año 1990 hasta el 31 de diciembre del 2021. La temperatura media utilizada corresponde a la temperatura media aritmética obtenida de la siguiente ecuación:

$$T_{med} = \frac{T_{máx} + T_{mín}}{2}$$

Se realizó la homogenización necesaria para evaluar la discontinuidad de las series, debido a datos faltantes o a factores externos; como el cambio en la ubicación de la estación o en los instrumentos, mediante el paquete estadístico Climatol del software RStudio, usando el procedimiento SNHT (Standard Normal Homogenity Test) Alexandersson, 1986; Alexandersson and Moberg, 1997. Los resultados de la aplicación del test a las estaciones del estudio, se muestran en la Tabla 2, las cuales están corregidas desde el salto en la serie hacia atrás. Posteriormente, Climatol entrega las series rellenadas, por lo tanto, se cuenta con todos los datos diarios durante el período de estudio.

La información aeronáutica de las variables de visibilidad, tiempo presente y de tipo y altura de la base de la nube, se obtuvieron desde el reporte meteorológico METAR (Meteorological Aerodrome Report) para el aeródromo Chacalluta en la ciudad de Arica, el aeródromo Diego Aracena en Iquique y el aeródromo Andrés Sabella en Antofagasta.

Por último, las tendencias lineales analizadas en las variables meteorológicas de este estudio, se obtuvieron a través del método de mínimos cuadrados con los valores anuales y estacionales por cada estación meteorológica.

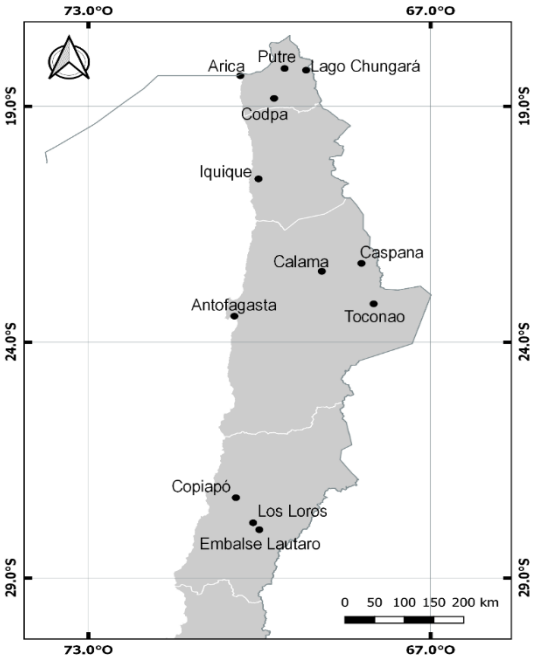

Fig. 1: Distribución espacial de las estaciones meteorológicas del FIR Antofagasta

Tabla 1: Ubicación, altitud y fuente de las estaciones meteorológicas del estudio

Nombre	Latitud	Longitud	Altitud (m)	Fuente
Putre	-18.2	-69.55	3532	DMC
Lago Chungará	-18.23	-69.18	4585	DGA
Codpa	-18.83	-69.74	1870	DGA
Arica	-18.35	-70.33	63	DMC
Iquique	-20.53	-70.16	52	DMC
Calama	-22.49	-68.91	2321	DMC
Caspana	-22.33	-68.21	3245	DGA
Toconao	-23.18	-68.00	2495	DGA
Antofagasta	-23.45	-70.44	113	DMC
Copiapó	-27.34	-70.40	305	DMC
Los Loros	-27.83	-70.11	940	DGA
Embalse Lautaro	-27.97	-70.003	1110	DGA

Tabla 2: Estaciones meteorológicas homogenizadas en el estudio del FIR Antofagasta.

Variable meteorológica	Estación meteorológica homogeneizada
Temperatura máxima	Toconao Copiapó
Temperatura mínima	Putre Caspana Toconao
Precipitación	Codpa

3. CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS DE LA ZONA

Las características climáticas de la zona norte y específicamente el FIR Antofagasta están determinadas por tres rasgos principales que caracterizan la climatología de Chile en general. Por el extremo norte y en la alta cordillera, el cinturón de vientos alisios o del este provenientes de la vertiente amazónica es el encargado de proporcionar las precipitaciones estivales debido a la actividad convectiva característica de esta zona, mientras que hacia el sur de la zona norte, el responsable de proporcionar las precipitaciones son los vientos del oeste que es por donde se desplazan los sistemas frontales y bajas migratorias provenientes del suroeste, sin embargo, la presencia del Anticiclón Subtropical del Pacifico Sur (ASPS), que en estas latitudes es un elemento predominante, bloquea los sistemas frontales que aportan precipitación, convirtiéndose en el gran responsable de la aridez de la zona (Miller 1976, Garreaud et al. 2003).

Estos factores climáticos más la compleja topografía de la zona norte, determinan las grandes diferencias térmicas y de precipitación en todas las estaciones analizadas en este estudio. Las estaciones de altura; Putre y Lago Chungará son las que presentan los montos de precipitación más altos de la región, del orden de 180 y 330 mm en promedio anual, muy por sobre a lo registrado en las estaciones de superficie cercanas a la costa que no sobrepasan los 4 mm en promedio anual (Tabla 3). Estas diferencias también se reflejan en el carácter episódico de las precipitaciones, siendo más frecuentes en el altiplano durante el verano, cuando la circulación atmosférica regional favorece la advección de vapor de agua desde la cuenca amazónica, mientras que las escasas precipitaciones de las estaciones costeras se originan con mayor frecuencia durante el período invernal, ya que son responsabilidad de los sistemas frontales o bajas migratorias que llegan a la zona.

La temperatura es otra variable que presenta grandes diferencias entre las estaciones de altura y las de superficie. En el altiplano, la temperatura media es relativamente baja; 10.2 y 3.9 °C en Putre y Lago Chungará respectivamente, debido a que en la atmósfera libre la temperatura disminuye con la altura a una tasa cercana a 6.5°C/km, sin embargo, se ha evidenciado que en la pendiente andina el gradiente de temperatura es menor, corresponde a 5.5°C/km, como resultado de la transferencia de energía desde la superficie (Aceituno, 1993).

Las estaciones de Arica, Iquique y Antofagasta reciben la influencia costera lo que colabora con la estabilidad climática de las estaciones, reflejado en una escasa amplitud entre las temperaturas extremas inferior a 5 °C. Lo contrario ocurre con las estaciones ubicadas, hacia los valles interiores de la zona como Calama, Copiapó, Los Loros y Embalse Lautaro, que están inmersas en una compleja topografía que influye junto con otros factores en que las temperaturas extremas tengan una amplitud de hasta 20°C (Tabla 3).

Tabla 3: Temperatura media anual y precipitación media anual entre 1990-2021 para las estaciones meteorológicas del estudio.

Nombre	Temperatura mínima (°C)	Temperatura media (°C)	Temperatura máxima (°C)	Precipitación (mm)
Putre	5.1	10.2	15.3	181.6
Lago Chungará	-3.1	3.9	11.0	331.4
Arica	17.0	19.5	21.9	2.1
Codpa	7.3	16.1	24.9	28.2
Iquique	16.1	18.7	21.4	1.1
Calama	3.2	11.2	19.2	6.6
Caspana	3.1	13.3	23.5	65.3
Toconao	7.5	16.5	25.5	30.8
Antofagasta	14.4	17.1	19.8	4.2
Copiapó	10.2	17.3	24.4	17.0
Los Loros	8.6	18.2	27.7	33.5
Embalse Lautaro	9.7	19.4	29.1	38.2

4. ANÁLISIS DE LAS VARIABLES QUE AFECTAN A LAS OPERACIONES AÉREAS

El conocimiento de las condiciones climáticas es fundamental para planificar la ruta de vuelo, considerando una anticipación ante fenómenos adversos que podrían poner en riesgo la seguridad de las operaciones aéreas, desde el lugar donde se inicia el vuelo hasta el aterrizaje en nuestro destino. Junto con considerar las características medias de variables meteorológicas como la temperatura y la precipitación en un determinado lugar, también es importante complementar que producto del cambio climático los eventos extremos están siendo cada vez más frecuentes en distintas partes del mundo. Existen estudios que han evidenciado como el aumento progresivo de la temperatura ha debilitado el rendimiento de las aeronaves, también como algunos aeropuertos se han visto en peligro de inundación producto del aumento del nivel del mar (Puempel y Williams, 2016), por lo tanto, se requiere de múltiples esfuerzos aumentar el conocimiento en estas materias, para planificar y lograr una buena adaptación a lo que se espera en el futuro.

El FIR Antofagasta debido a su ubicación, produce una gran diversidad en cuanto a las condiciones meteorológicas, ya que está bajo la influencia de distintos factores climáticos que regulan el clima en la zona. Por lo tanto, el análisis de temperatura y precipitación se realiza en estaciones con distintas características, buscando evidenciar la influencia climática de todos estos factores. Además, se considera la información proporcionada por los reportes meteorológicos (METAR) que se emiten en forma rutinaria en cada aeródromo o aeropuerto, con el fin de garantizar la seguridad en las operaciones aéreas. El METAR se actualiza cada una hora e incluye información específica de viento, temperatura, visibilidad, altura de la base de las nubes y fenómeno meteorológico en el instante de la observación. La información METAR en este estudio será analizada para los aeropuertos Chacalluta en Arica, el aeropuerto Diego Aracena en Iquique y Andrés Sabella en Antofagasta. Todos los aeropuertos son categoría de operación I, clase A, según la Resolución Exenta

DGAC N° 0698 del 27 de septiembre del 2012. Esto implica que, según su reglamento "Operación de las aeronaves DAR 06", las restricciones de aproximación y aterrizaje de las aeronaves en este aeropuerto, deben limitarse a: "una altura de decisión no inferior a 60 metros (200 pies) y con una visibilidad no inferior a 800 metros, o un alcance visual en la pista no inferior a 550 metros".

En base a estas restricciones, se obtuvo la base de la altura de las nubes, la visibilidad y el tiempo presente proporcionada por los METAR en el periodo comprendido entre 1990 hasta el 2021, con fin de evaluar el cambio que han sufrido estas variables producto del cambio climático en estas ciudades.

4.1 Anomalías y tendencias de precipitación y temperaturas extremas

La variabilidad interanual de la zona norte está regulada en gran parte por el fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), el cual en sus fases extremas se expresa como El Niño (fase cálida) y como La Niña (fase fría). Estas fases están relacionadas con la intensidad de los vientos alisios del Ecuador y la Temperatura Superficial del Mar (TSM); en fase cálida se tienen variaciones positivas de la TSM y un debilitamiento en la intensidad de los vientos alisios, mientras que, en la fase fría, la TSM tiene anomalías negativas en esta zona y una intensificación de los vientos alisios (Aceituno & Garreaud, 1995).

De este modo, la ocurrencia de episodios húmedos en el altiplano está asociados con la fase fría de este evento (La Niña), denominado como la "Alta de Bolivia" o "El invierno boliviano". Esta condición se corrobora en un período entre 1998 y el 2001 en que estaba presente La Niña y las precipitaciones superaron los 600 mm en el Lago Chungará durante el 2001. La influencia de La Niña, también alcanzó a las estaciones de Caspana y Toconao durante ese período, dejando precipitaciones sobre los 200 mm en Caspana y cerca de 100 mm en Toconao durante el 2001. (Fig. 2)

Por otra parte, los eventos El Niño se relacionan con la precipitación proveniente de los sistemas migratorios del oeste, los cuales llegan a esta zona gracias a un alta de bloqueo situada en latitudes polares que permiten el desvío de frentes migratorios hacia el norte (Rutllant & Fuenzalida 1991). Durante 1991 y 1992, el fenómeno El Niño afectó las estaciones ubicadas al sur del FIR Antofagasta; dejando precipitaciones en Los Loros y Embalse Lautaro sobre los 100 mm en ese período, triplicando la precipitación promedio en esa zona (Fig. 2). En 1997 e inicios del 1998 se desarrolló el denominado "Niño del siglo" el cual aportó con precipitaciones sobre los 200 mm en las últimas estaciones, incluyendo a Copiapó que registró sobre 100 mm durante el invierno. Este fenómeno fue muy intenso y abarcó hasta Chile central dejando precipitaciones invernales de 3 a 4 veces por sobre el promedio en esa zona.

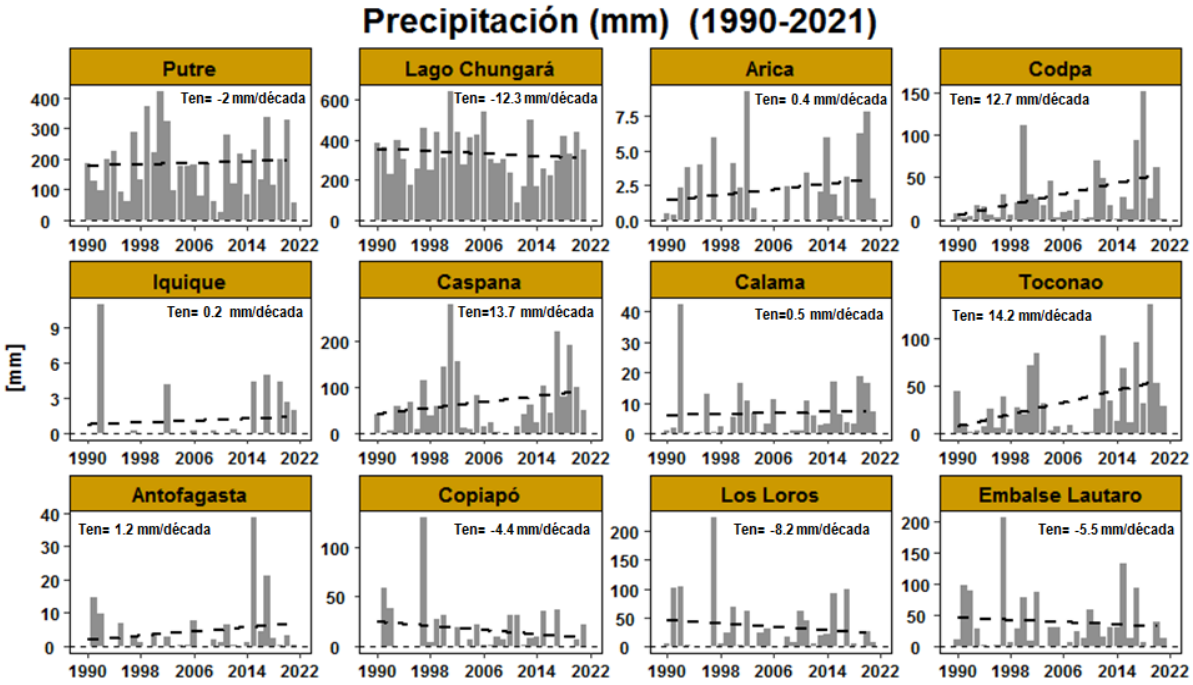

Figura 2: Total anual de precipitación (mm) en las estaciones del FIR Antofagasta entre 1990 y 2021.

La estacionalidad de las precipitaciones dentro del FIR Norte depende del factor climático que origine la precipitación en cada sector. En el extremo norte, en el Altiplano, representado por Putre y Lago Chungará y en las estaciones que se ubican sobre los 2000 metros; Calama, Toconao y Caspana, las precipitaciones son más frecuentes durante el verano (en amarillo), producto de la expansión de los vientos ecuatoriales del Este sobre la tropósfera durante esta época del año, que permiten la advección de masas de aire con alta humedad provenientes del amazonas, (Garreaud et al 2003) (Fig. 3). De este modo, el exceso de calor latente en la atmósfera, que duplica al calor sensible aportado por el suelo, genera inestabilidad de la columna de aire, incrementándose todo este mecanismo durante el verano austral, generando abundantes precipitaciones convectivas en el Altiplano.

Por otro lado, el FIR Antofagasta se caracteriza por su aridez debido en gran parte al fortalecimiento del Anticiclón subtropical del Pacifico sur en estas latitudes, el cual se expande latitudinalmente hacia el sur durante el verano, bloqueando la llegada de frentes migratorios en la zona. Sin embargo, durante el invierno el ASPS se contrae hacia norte permitiendo la llegada ocasional de sistemas frontales que dejan las precipitaciones en esta época del año. Tanto en las estaciones costeras como en las estaciones del sur del FIR Antofagasta (Fig. 3), las precipitaciones se originan con mayor frecuencia durante el invierno austral (en naranjo), producto precisamente de la contracción hacia el norte del ASPS.

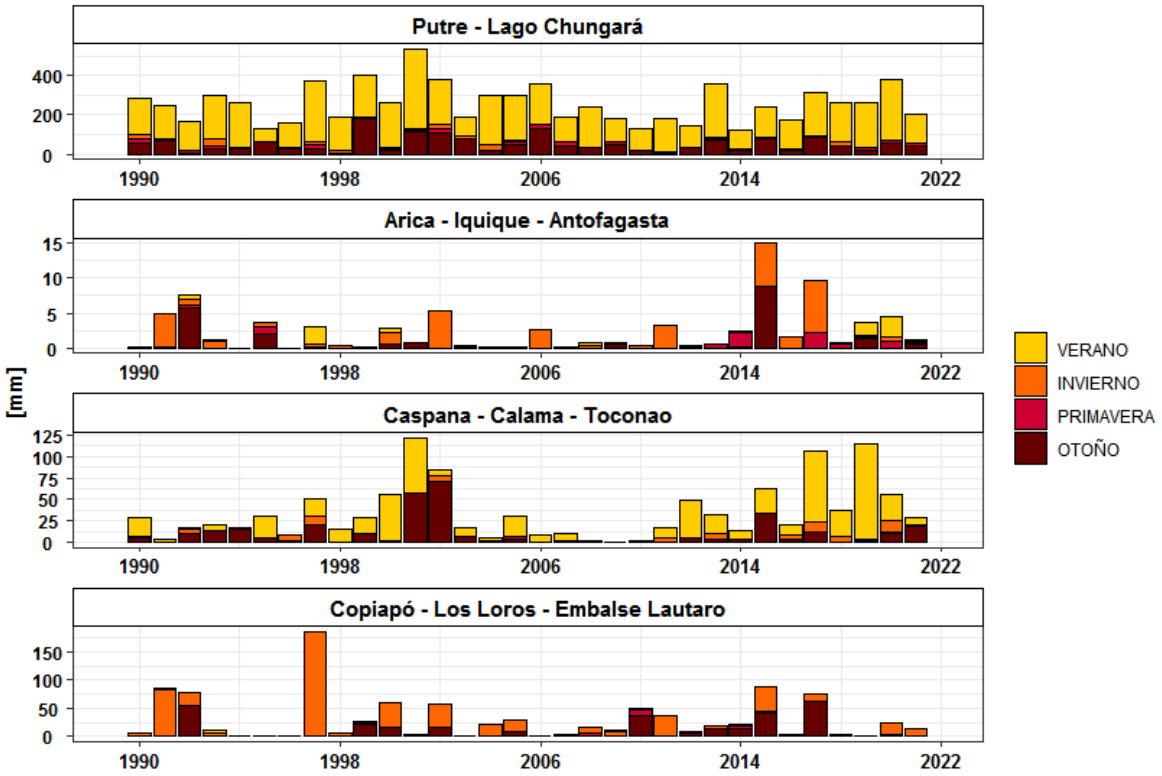

Figura 3: Distribución estacional de la precipitación en mm en las estaciones del FIR Antofagasta, separadas por sectores; Altiplano (Putre-Lago Chungará), costeras (Arica, Iquique, Antofagasta), estaciones en altura (Caspana, Calama y Toconao) y sur del FIR (Copiapó, Los Loros y Toconao).

En cuanto al comportamiento de la temperatura en superficie en el FIR Antofagasta, las estaciones costeras de Arica, Iquique y Antofagasta están influenciadas en gran parte por El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) y la temperatura de la mar asociada a este evento (Montecinos et al, 20003). Tanto en las temperaturas máximas y mínimas (Fig. 4 y Fig. 5), se observan anomalías positivas, destacando el aumento cercano a 3°C respecto al promedio en las temperaturas mínimas, durante el episodio El Niño entre 1997 y 1998, considerado uno de los más intensos en los últimos 30 años. En contraste, el fenómeno ENOS en su fase fría; La Niña disminuye las temperaturas en las estaciones cerca de la costa, debido al desplazamiento de aguas más cálidas hacia el oeste del océano Pacifico, en consecuencia, del incremento de los vientos alisios. Como muestra de ello, durante el 2007, se desarrolló un intenso fenómeno de La Niña, el que dejó un descenso pronunciado de las temperaturas extremas en las ciudades de Arica, Iquique y Antofagasta con anomalías cercanas a los -3°C en las temperaturas máximas particularmente, (Fig. 4 y Fig. 5).

La influencia del ENOS en la variabilidad interanual de las temperaturas en superficie disminuye hacia el sur del país, sin embargo, durante el 2021 la mayoría de las estaciones del estudio presentaron anomalías negativas de temperaturas, lo que en parte podría ser responsabilidad de un evento moderado de La Niña.

Las tendencias estacionales de las temperaturas extremas, muestran un comportamiento bastante diferente entre las estaciones pertenecientes al FIR Antofagasta. Durante el verano, se ha observado un calentamiento en las estaciones ubicadas al sur y hacia el valle interior del FIR; Copiapó, Los Loros y Embalse Lautaro en que tanto las temperaturas máximas como mínimas han aumentado en hasta 0.5°C por década, el cual se podría asociar a las características del relieve con menor vegetación que ayuda a que aumente la temperatura en zonas con estas características. Por otro lado, es importante destacar, la influencia del océano en la estabilidad térmica de las estaciones costeras en que no se observa una variación definida en las temperaturas extremas en ninguna estación del año, salvo en Iquique en que las temperaturas máximas presentan tendencias negativas del orden de -0.2°C en todas las estaciones del año (Fig. 6).

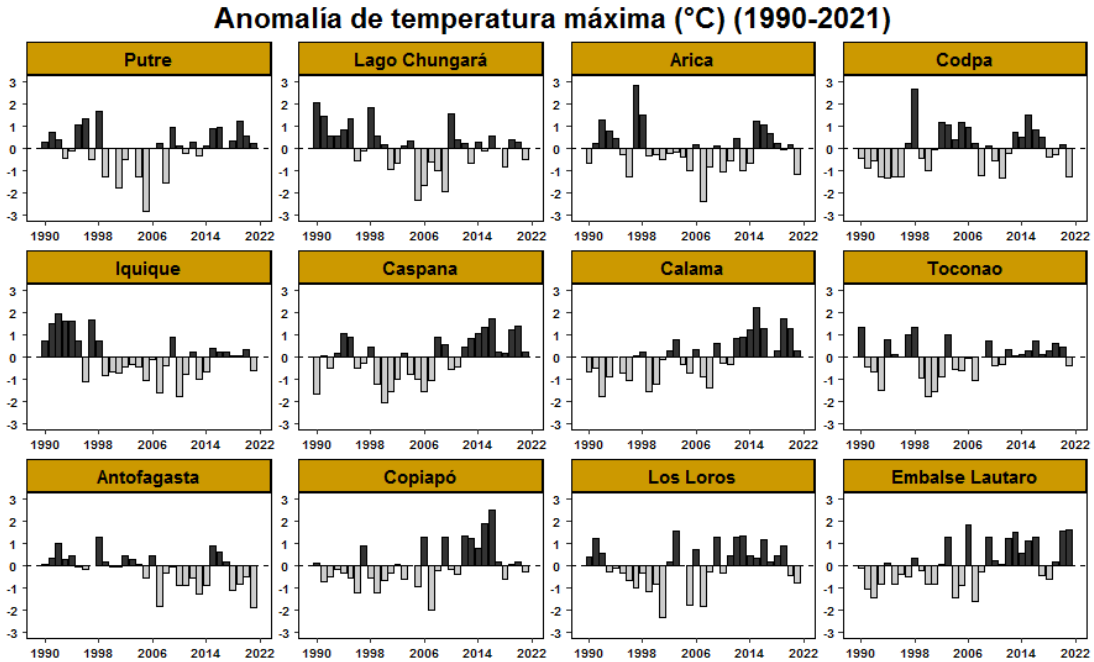

Figura 4: Anomalía de temperatura máxima (°C) en base al período 1991-2020, en todas las estaciones del FIR Antofagasta

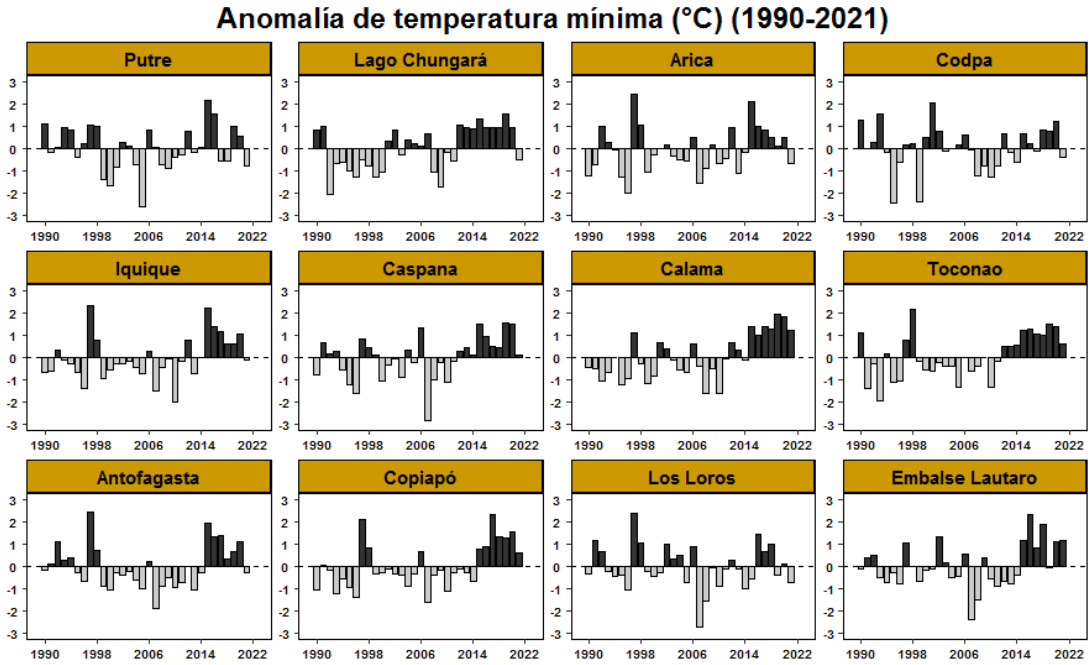

Figura 5: Anomalía de temperatura máxima (°C) en base al período 1991-2020, en todas las estaciones del FIR Antofagasta

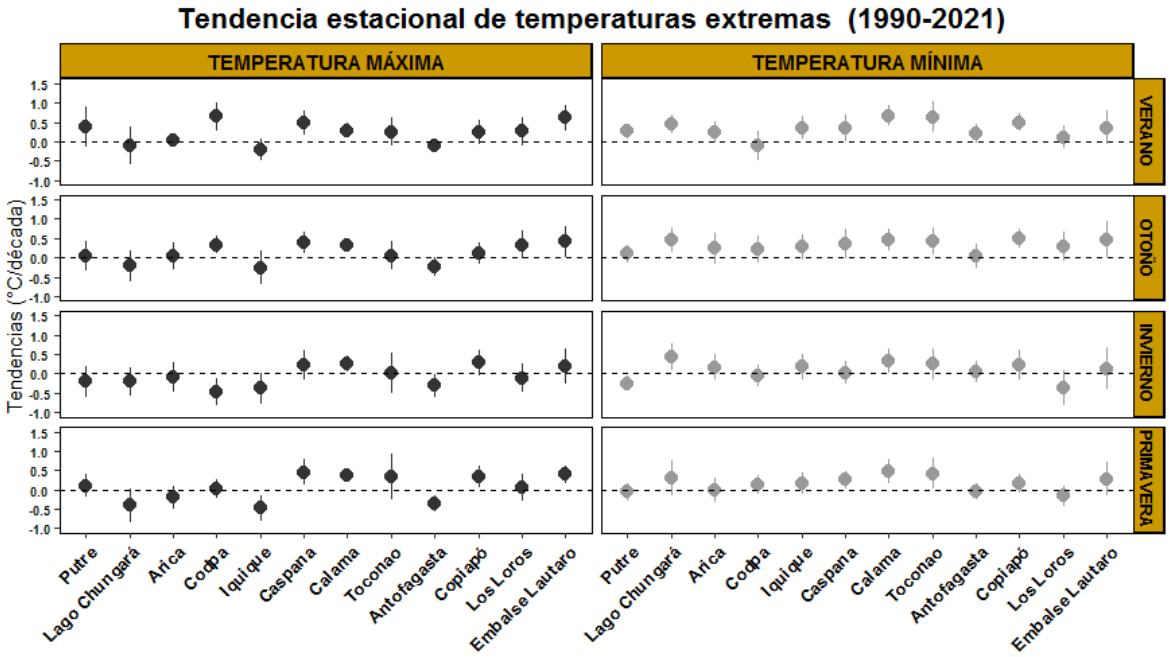

Figura 6: Tendencia estacional de las temperaturas extremas (°C), en todas las estaciones del FIR Antofagasta entre 1990 y 2021.

4.2 Tendencias de los índices climáticos extremos

Los índices de eventos extremos de cambio climático, son un conjunto de indicadores estandarizados, basados en percentiles, umbrales y duración, los que permiten comparar los cambios o ver la evolución de estos a nivel global. En este caso se evaluaron algunos índices en las estaciones meteorológicas ubicadas dentro del FIR Antofagasta (Karl et al., 1999).

Los índices climáticos asociados a la temperatura máxima como los días cálidos y días fríos (TX90p y TX10p respectivamente), muestran un comportamiento diferente entre las estaciones costeras y las estaciones que se encuentran en los valles interiores del FIR Antofagasta. Esto es consecuencia, en gran parte, del relieve que actúa como barrera o freno a las influencias oceánicas. Mientras en Arica, Iquique y Antofagasta los días fríos están aumentando del orden de un 2% por década, en las estaciones del interior como Caspana, Calama y Embalse Lautaro están disminuyendo también en un -2% por década. Por su parte, los días cálidos presentan tendencias negativas en las estaciones costeras alcanzando un -8% por década en Iquique, mientras en las estaciones hacia el interior los días cálidos han aumentado en un 4% por década en Embalse Lautaro específicamente (Fig. 7).

Esta diferencia entre las estaciones cercanas a la costa con las estaciones hacia el interior, también se replica en los días con temperatura máxima sobre 25°C, mostrando tendencias negativas en Arica e Iquique, mientras que en Calama han aumentado en 20 días por década. El índice climático con temperaturas más altas sobre 30°C, los días bajo esta condición han aumentado sólo en las estaciones ubicadas en el sur del FIR Antofagasta. (Fig.8).

En cuanto a la precipitación, el comportamiento de esta variable es muy diferente dentro del FIR Antofagasta debido a los distintos factores que originan las lluvias, tal como se ha mencionado anteriormente. Por lo mismo, al evaluar los días con precipitación sobre 1 mm, no se observan tendencias significativas, a excepción de la estación en altura Lago Chungará en que los días con precipitación han disminuido en 3 días por década, mientras que en Caspana y Toconao se observan tendencias positivas de 2 días por década. (Fig. 9)

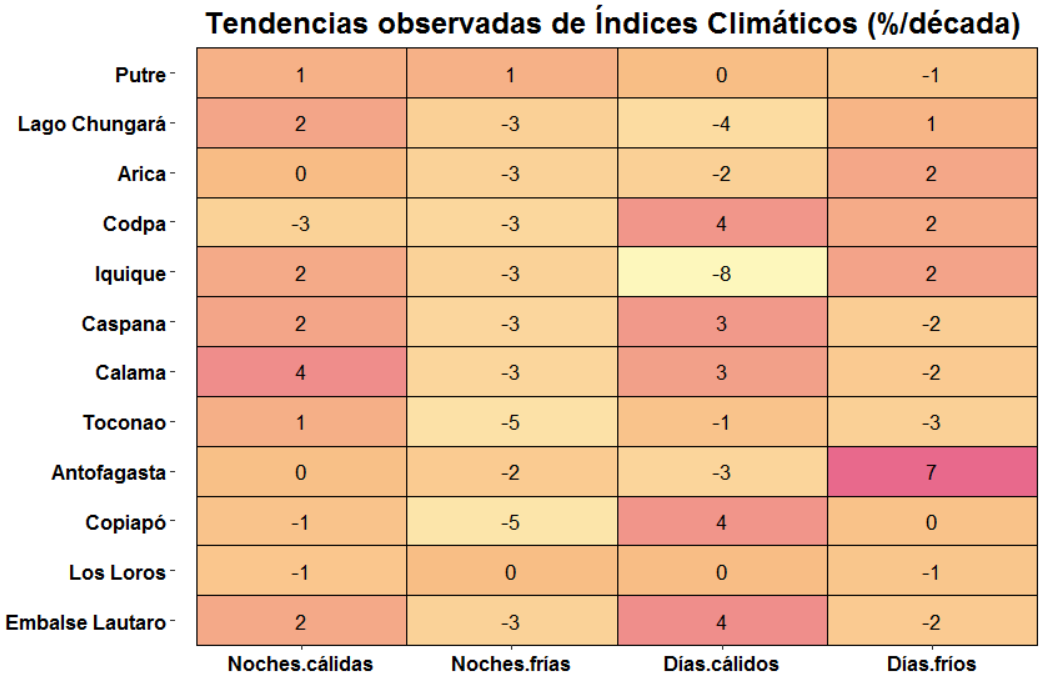

Figura 7: Tendencias de los índices climáticos; noches cálidas, noches frías, días cálidos y días fríos, entre 1990-2021, en las estaciones del FIR Antofagasta. Tendencias negativas (naranja) y positivas (rojo).

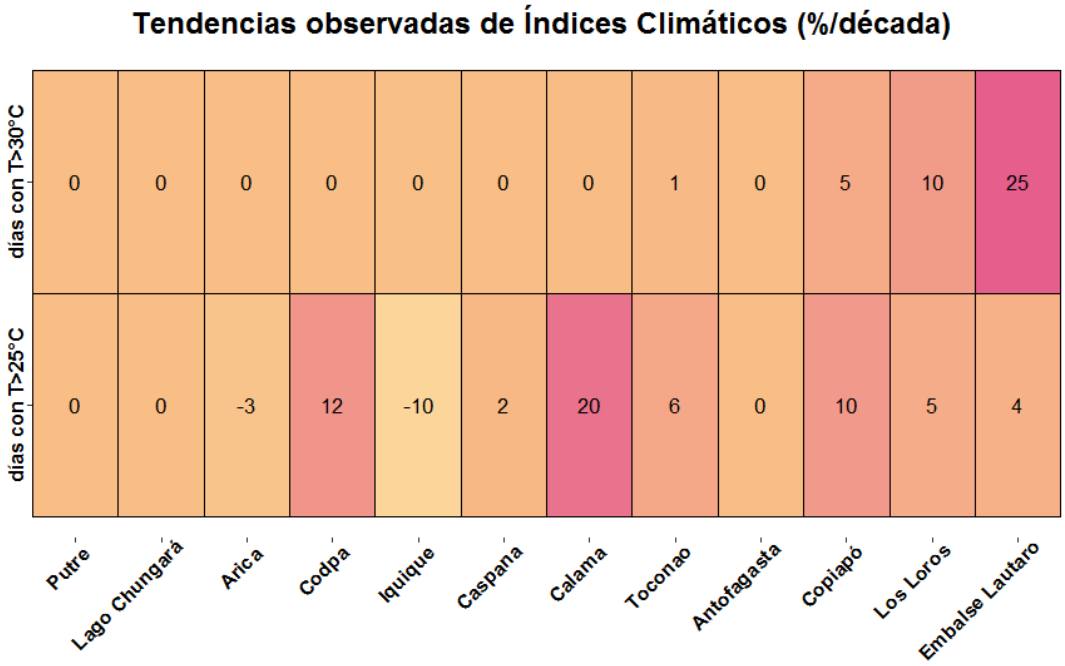

Figura 8: Tendencias de los índices climáticos; días con Tmáx>25°C, días con Tmáx>30°C, entre 1990-2021, en las estaciones del FIR Antofagasta. Tendencias negativas (naranja) y positivas (rojo).

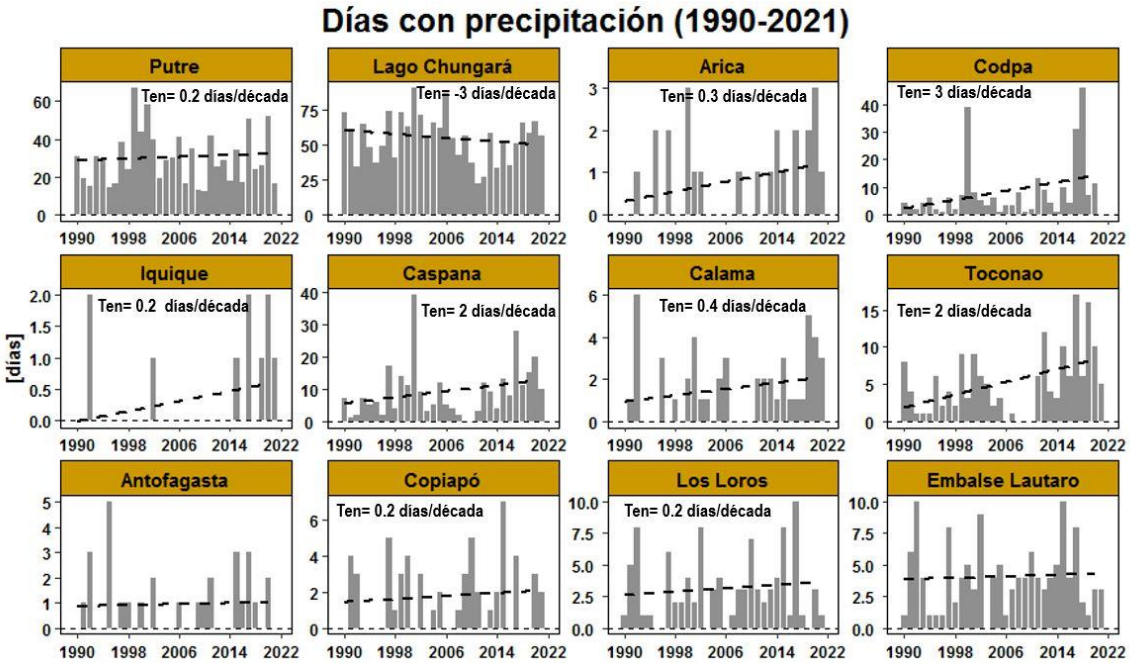

Figura 9: Serie anual de los días con precipitación sobre 1 mm en las estaciones del FIR Antofagasta en barras grises entre 1990 y 2021. Tendencia lineal en línea punteada negra.

4.3 Altitud de densidad

La altitud de densidad (DA), es un concepto utilizado en aeronáutica relacionado con el rendimiento de los aviones, por lo que implica una serie de factores como son las variables meteorológicas, el peso del avión y la longitud de pista en un aeropuerto. Corresponde a un valor teórico que se equipara a la densidad del aire a una altitud específica en atmósfera estándar o dicho de otra forma es la altura en la atmósfera estándar en la cual la densidad del aire es la misma que la de la ubicación del avión [Federal Aviation Administration, (FAA), 2010]. Esto es, una baja densidad del aire resulta en un aumento de Altitud de densidad, lo cual afecta la elevación del avión a una velocidad dada, requiriendo menor peso para mejorar su rendimiento, especialmente en el momento del despegue (Figura 10). La DA tiene una fuerte dependencia a las variables meteorológicas como son la temperatura y la presión, las que a su vez varían en distintas escalas de tiempo ya sea horarias, estacionales o decadales, por lo tanto, se produce una gran diferencia al ser evaluada en la costa y hacia el interior del valle. Esta evaluación se realizó durante el verano (diciembre, enero y febrero) desde 1990 hasta el 2021, con el fin de determinar su comportamiento en el período más cálido del año, mediante una ecuación simplificada (1b) (Goodman, C., & Small Griswold, J., 2018).

(1a) $$PA = (P_o - P_{alt}) * 1000 + H_{aeropuerto}$$

(1b) $$DA = PA + 120(T - T_s)$$

Donde PA es la altitud de presión, P_o es la presión estándar en pulgadas de Mercurio, P_{alt} es la presión

del altímetro ajustado en pulgadas de Mercurio, $H_{aeropuerto}$ es la elevación del aeropuerto en pies, T es la temperatura observada en °C $T_s = T_{o-0.002*} H_{aeropuerto}$ y $T_o = 15$°C (atmosfera estándar).

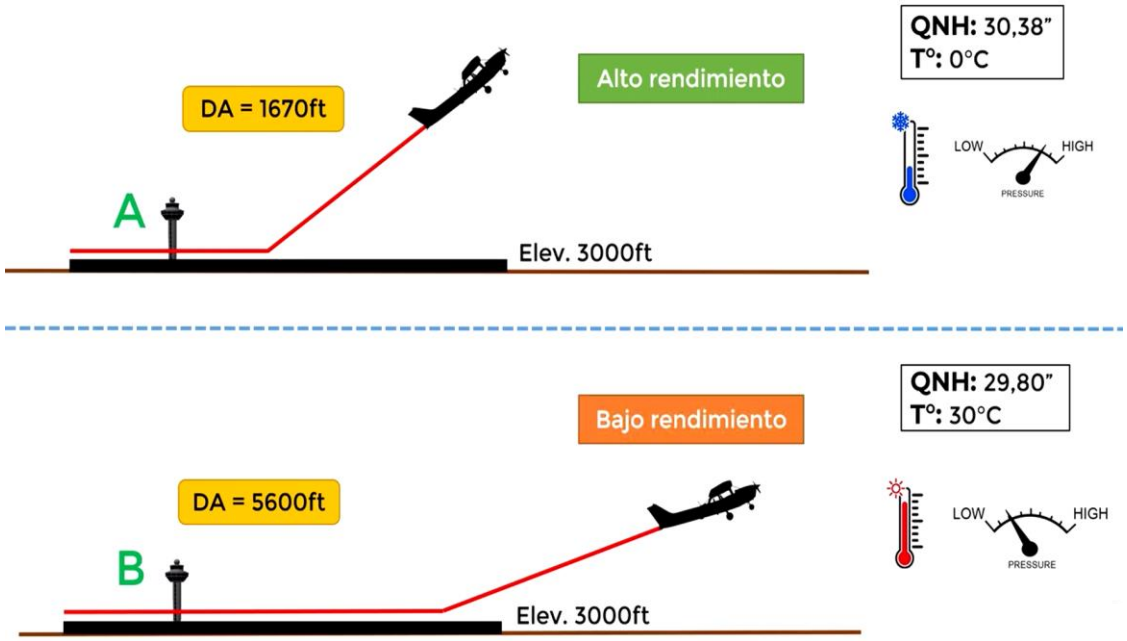

Figura 10: Esquema explicativo de la altitud de densidad y su efecto en el rendimiento de los aviones. Fuente: National Weather Service (NOAA). (Figura adaptada).

Los aeropuertos más importantes del FIR Antofagasta están ubicados cerca de la costa, por lo tanto, la temperatura no es tan elevada durante el verano, en comparación a las temperaturas registradas en los valles del país. Esto favorece a que la altitud de densidad no se incremente tanto durante el período estival, lo que podría afectar seriamente en el rendimiento de las aeronaves. En general, en los tres aeropuertos; Chacalluta, Diego Aracena y Andrés Sabella, la altitud de densidad se sitúa entre los 1200 y 1800 pies entre 1990 y 2021, lo que se traduce en que el avión funcionaría como si estuviese a esa altitud, a pesar de que los aeropuertos están ubicados a una altitud de 166, 156 y 455 pies respectivamente. También es importante destacar, que la altitud de densidad tiene una tendencia positiva, aunque muy baja en Chacalluta de 10 pies por década y en Andrés Sabella de 12 pies por década, mientras que en Diego Aracena la altitud de densidad ha disminuido del orden de -60 pies por década. (Fig. 11).

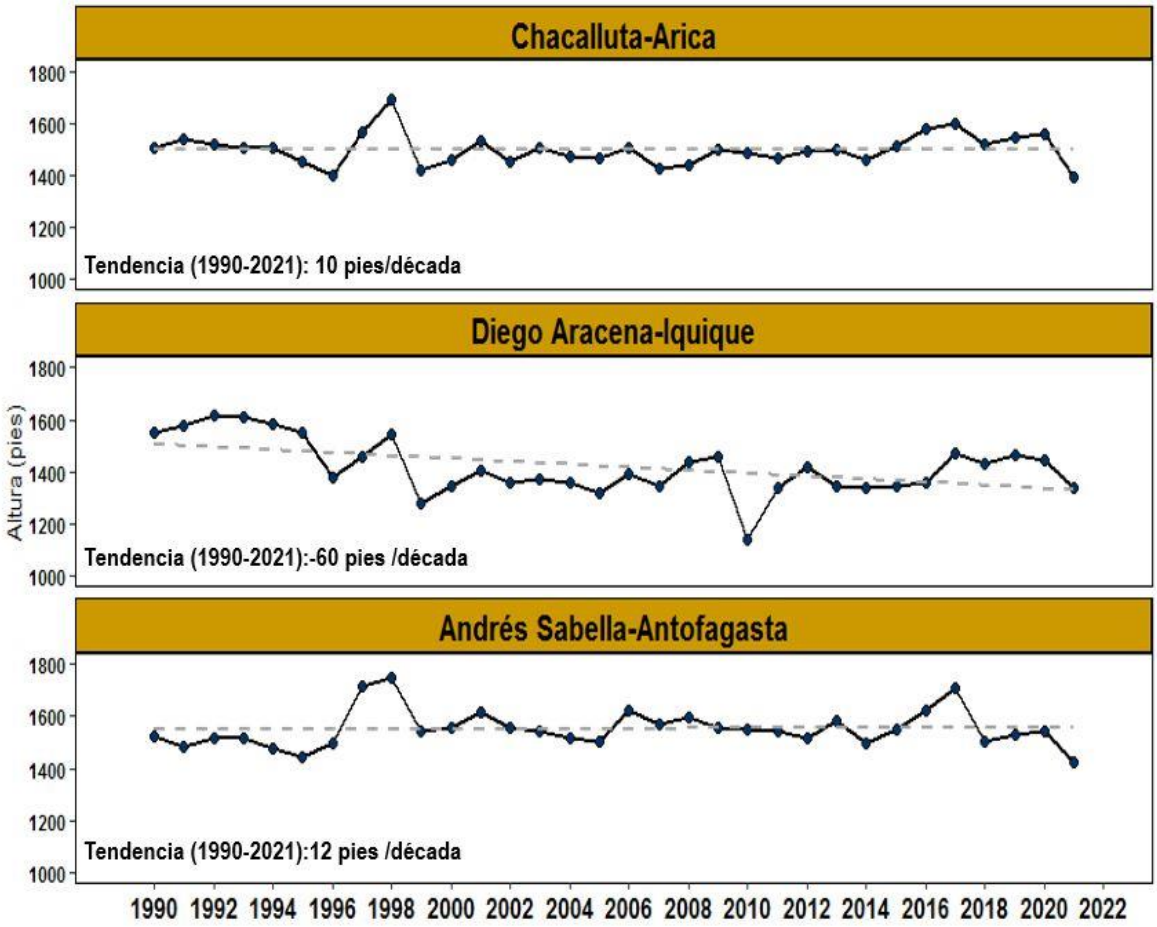

Figura 11: Altitud de densidad (pies), obtenida a partir de la temperatura máxima, durante los meses de verano (diciembre, enero y febrero) desde 1990 a 2021 en Arica, Iquique y Antofagasta (línea negra). Tendencia lineal (línea punteada gris).

4.4 Viento

En la navegación aérea, el viento es un factor clave que puede afectar de forma severa a la seguridad del vuelo, ya sea antes de iniciarlo o durante todo su desarrollo.

Para comparar si la intensidad del viento ha experimentado cambios a lo largo del tiempo, la separamos en dos períodos decadales, (1990-1999) y (2012-2021) en cada aeropuerto. En Chacalluta, se observa que en la segunda década (puntos amarillos), el viento ha disminuido ligeramente en comparación con lo observado durante la primera década (puntos negros), (Fig. 12), en horas de la tarde, en donde se origina el viento más intenso especialmente durante los meses de verano. Esta condición se revierte durante las mañanas, ya que el viento más intenso se produce durante la última década, aumentando alrededor de dos nudos a lo observado anteriormente.

Durante el invierno, en Diego Aracena- Iquique, el viento no ha variado en intensidad en la última década en ningún horario, sin embargo, durante el verano, en las horas de la tarde en que se registra el viento más intenso, el viento ha aumentado hasta en 3 nudos en comparación con lo observado en la primera década. (Fig. 13).

En Andrés Sabella- Antofagasta, la intensidad del viento ha variado solamente durante las horas de la tarde en todos los meses del año, en que se ha observado viento menos intenso en la última década notándose especialmente durante la primavera y el verano (Fig. 14).

En cuanto a la dirección del viento, se observa que el viento suroeste predomina en la zona costera durante todo el año (Fig. 15, 16 y 17). Esta componente es favorable a la surgencia costera la cual se caracteriza por el ascenso de aguas frías y por el descenso del nivel del mar junto a la costa (Pizarro et al, 1994).

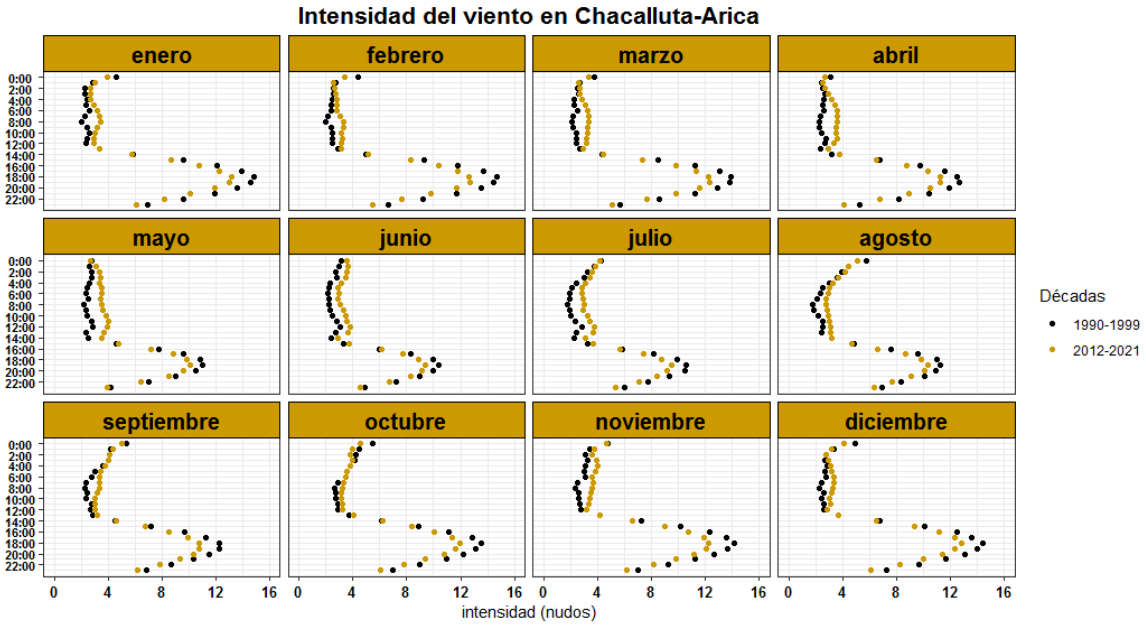

Figura 12: Intensidad horaria (UTC) del viento (nudos) en el aeropuerto Chacalluta en Arica. Década (1990-1999) puntos negros y década (2010- 2021) puntos amarillos.

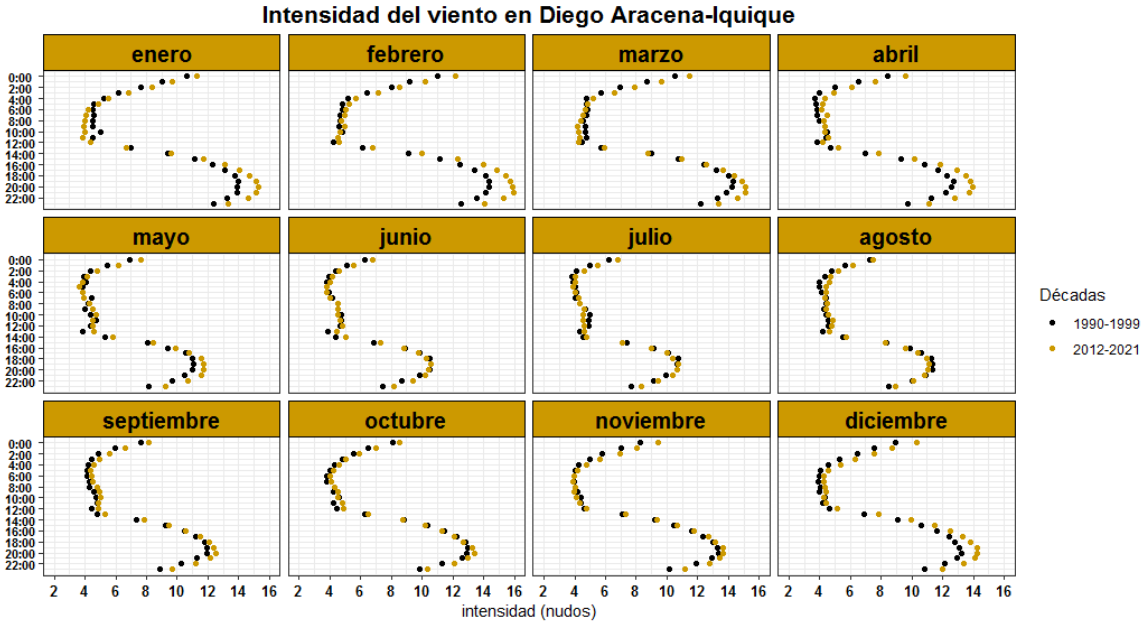

Figura 13: Intensidad horaria (UTC) del viento (nudos) en el aeropuerto Diego Aracena en Iquique. Década (1990-1999) puntos negros y década (2010- 2021) puntos amarillos.

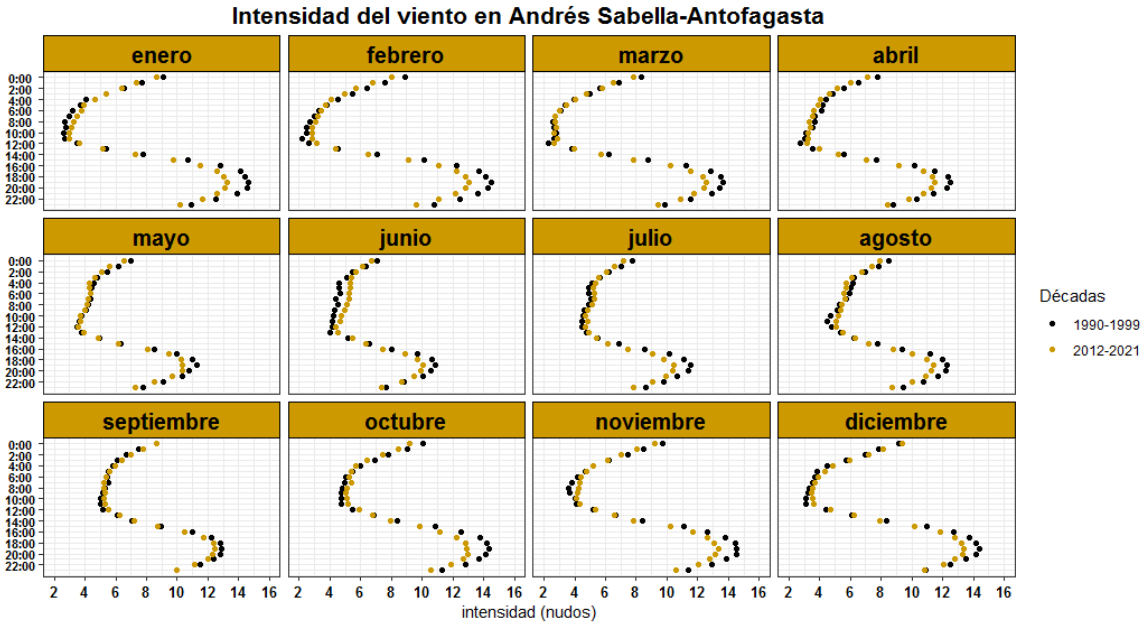

Figura 14: Intensidad horaria (UTC) del viento (nudos) en el aeropuerto Andrés Sabella en Antofagasta. Década (1990-1999) puntos negros y década (2010- 2021) puntos amarillos.

.

4.4.1 Dirección e intensidad del viento

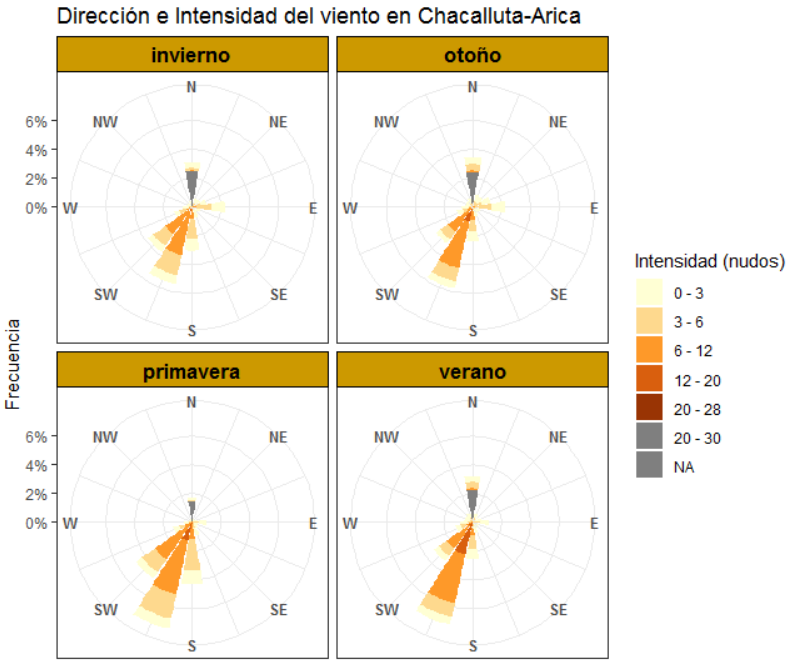

Figura 15: Dirección e intensidad estacional del viento en Arica del promedio entre 1990-2021

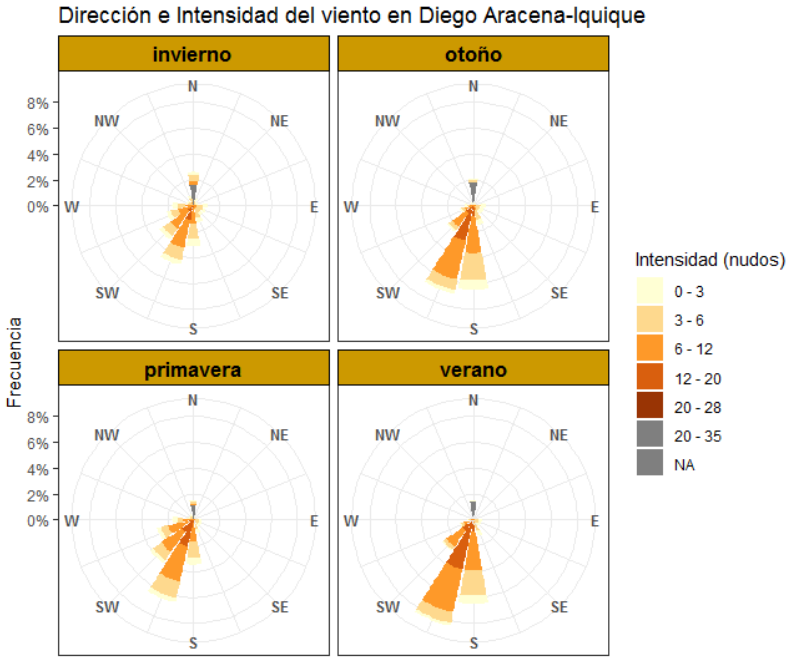

Figura 16: Dirección e intensidad estacional del viento en Iquique del promedio entre 1990-2021

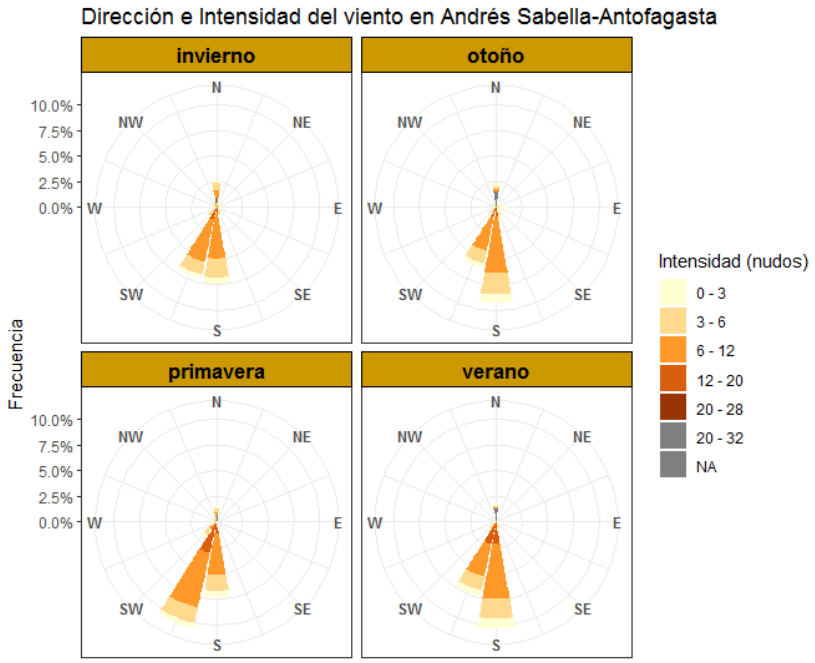

Figura 17: Dirección e intensidad estacional del viento en Antofagasta del promedio entre 1990-2021

4.5 Base de la altura de las nubes

La costa de la zona norte, se caracteriza por la presencia casi permanente de estratocúmulos en niveles bajos, limitada en altura por la subsidencia de aire del Anticiclón Subtropical del Pacifico Sur (ASPS) y por el fuerte contraste térmico entre el mar y el continente (Rutllant et al., 1998). Esta condición es bastante relevante, considerando que, para la navegación aérea, es importante reportar la nubosidad bajo los 5000 pies, según el procedimiento descrito para la elaboración de un pronóstico de aeropuerto TAF [DAP 03 08], ya que la visibilidad se podría ver afectada producto de la intensidad de esta capa de estratocúmulos.

En base a esta característica, según las observaciones de los tres aeródromos del FIR norte entre 1990 y el 2021, se observa que los tipos de nubosidad más frecuente bajo los 5000 pies en el aeródromo Chacalluta en Arica son los estratocúmulos, seguido de los estratos y los cúmulos, mientras que en Diego Aracena-Iquique también predominan los estratocúmulos, seguido por cúmulos, estratos y nimbostratos y en Andrés Sabella Antofagasta, también predominan los estratocúmulos y los estratos tienen alta frecuencia en este aeropuerto, además de algunas observaciones de cúmulos y nimbostratos. (Fig. 18).

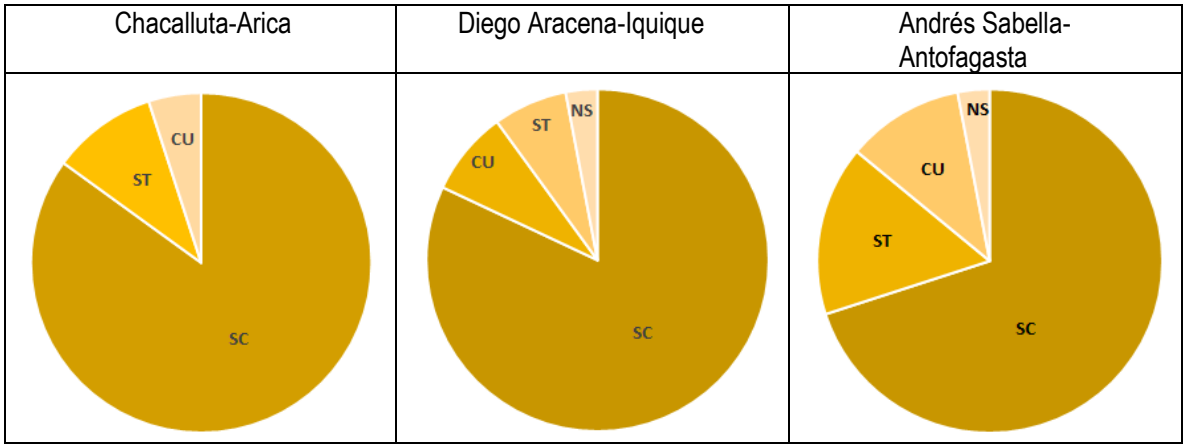

Fig.18: Frecuencia del tipo de nubosidad bajo los 5000 pies en los aeropuertos del FIR Antofagasta.

4.6 Tiempo presente

El tiempo presente es una variable aeronáutica que hace referencia a los fenómenos meteorológicos en el instante de la observación, ya sea en el aeropuerto o en las cercanías de él, expresándolos según su tipo, característica e intensidad.

Como los aeropuertos más importantes en el FIR Antofagasta están ubicados muy cerca de la costa, es frecuente que se origine bruma debido a las partículas de agua en suspensión del océano, las cuales incluso pueden reducir la visibilidad. Este fenómeno es el más frecuente en todos los meses del año tanto en Arica como en Iquique, mientras que en Antofagasta predomina sólo en los meses de invierno. (Fig. 19). La llovizna (DZ) es otro de fenómenos significativos de las estaciones costeras, ya que el aire al estar cerca de la costa presenta un gran contenido de humedad relativa. Este fenómeno, es altamente frecuente en todos los meses del año en el aeródromo de Antofagasta. La lluvia (RA), también se registra como fenómeno significativo en Arica y Antofagasta, durante los meses de enero y febrero, asociados probablemente al paso de alguna baja migratoria que llegó hasta la zona aportando con abundantes precipitaciones.

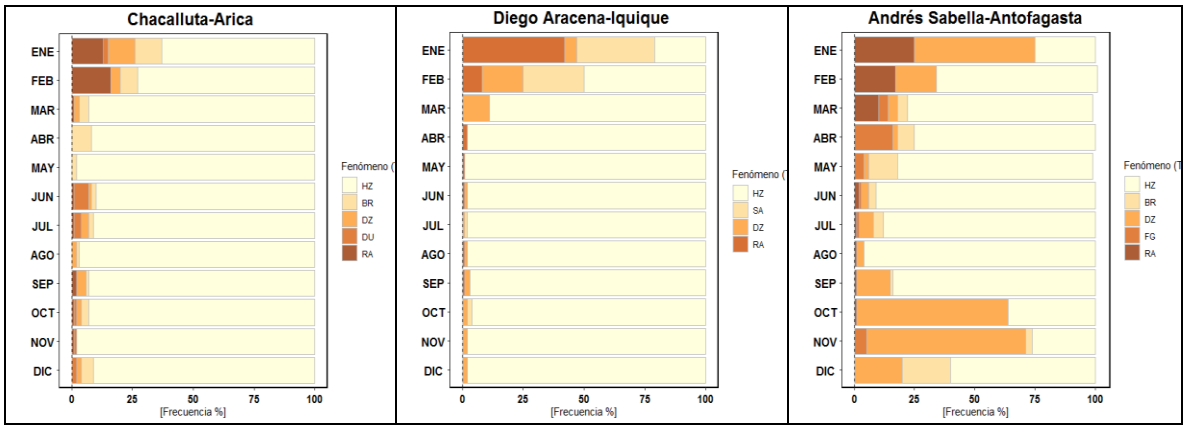

Fig. 19: Frecuencia mensual del fenómeno de tiempo presente reportado en cada aeropuerto del FIR Antofagasta. Llovizna (DZ), lluvia (RA) neblina (BR), niebla (FG), bruma (HZ), polvo (DU), humo (FU) y arena (SA).

5. RESTRICCIONES AERONÁUTICAS

En los aeródromos y aeropuertos existen restricciones meteorológicas, las cuales tienen como objetivo que las operaciones se realicen con la mayor seguridad posible según las características propias de cada lugar. En el instructivo “Operaciones de aeronaves DAR 06”, se expresa que las maniobras de aterrizaje y despegue en un aeropuerto deben limitarse a una altura de decisión no inferior a 60 metros (200 pies) y con una visibilidad no inferior a 800 metros. Si incluimos ambas restricciones, ya sea techos de nubosidad hasta 200 pies y visibilidad reinante inferior a 800 metros, se registran muy pocas observaciones y sólo en el aeródromo de Antofagasta, siendo más frecuentes en abril, junio, mayo y julio; asociadas principalmente a niebla y neblina. (Fig. 20). A pesar de que esta situación se ha dado en pocas oportunidades, la intensidad y duración del evento podría condicionar la operatividad del aeropuerto, debiendo tomar medidas alternativas, tal como ocurrió en mayo del 2013, en que se debió cerrar las operaciones en el aeródromo por algunas horas, hasta que las condiciones de visibilidad mejoraran.

Fig. 20: Frecuencia mensual (%) de los eventos con visibilidad menor a 800 metros y con techos de nubes inferior a 200 pies en el aeropuerto de Antofagasta.

6. DISCUSIÓN Y RESULTADOS

El FIR Antofagasta presenta una alta variabilidad de los fenómenos meteorológicos entre las estaciones que lo componen, debido a su ubicación principalmente, que hace que confluyan distintos factores climáticos que regulan el clima. Por una parte, existen precipitaciones de origen estival en el Altiplano, mientras que, por otro lado, casi toda la zona presenta características más bien áridas, producto del escaso arribo de sistemas frontales que aporten con lluvia especialmente hacia los valles interiores del FIR.

La influencia costera también es importante, considerando que los principales aeropuertos del FIR se encuentran cerca del océano, regulando en gran medida las temperaturas. Este punto es muy relevante, ya que la altitud de densidad evaluada en estos aeropuertos en promedio es del orden de 1600 pies, gracias a que las temperaturas durante el verano no son excesivamente altas, por lo tanto, el rendimiento de los aviones no se vería afectado por esta condición, sin embargo, la cercanía a la costa, hace que los aeropuertos estén en permanente contacto con nubosidad estratocúmulo, la cual eventualmente podría afectar la visibilidad en las pistas.

El viento medido en los aeropuertos, muestra un ciclo diurno bien pronunciado con intensidad más fuerte durante las tardes y en el verano. Además, todos los aeródromos coinciden en que la dirección predominante del viento es sur-suroeste durante todo el año, siguiendo la línea de costa.

En cuanto a las restricciones de operatividad en cada aeropuerto, sólo en Antofagasta se pudo determinar cuáles son los meses en que se dan techos de nubosidad bajo los 200 pies y visibilidad menor a 800 metros, concluyendo que entre otoño e invierno es cuando se da con mayor frecuencia ambas condiciones, asociadas principalmente a niebla y neblina. En este punto, es imperativo destacar la importancia de reportar los fenómenos de tiempo presente en cada aeródromo y aeropuerto del país, ya que es una de las mejores herramientas que tenemos para evaluar las condiciones meteorológicas que podrían afectar directamente a las operaciones aéreas.

7. BIBLIOGRAFÍA

Aceituno P. (1993). Aspectos generales del clima en el Altiplano sudamericano. En: Actas del II Simposio Internacional de Estudios Altiplánicos. Arica, p. 63-69.

Aceituno P. (1996). Elementos del clima en el Altiplano Sudamericano. Revista Geofísica-IPGH, N° 44, p. 37-55.

Coffel, E., Horton, R., (2015). Climate Changue and the Impact of extreme temperatures on aviation". Departamento Earth and Environmental Sciences, Columbia University, New York, USA.

Falvey M & Garreaud R (2005). Moisture variability over the South American Altiplano during the South American Low-Level Jet Experiment (SALLJEX) observing season. Journal of Geophysical Research 110: 1-12.

Federal Aviation Administration, (2010). Performance and Accountability Report. (FAA).

Garreaud R & Muñoz R. (2004). The diurnal cycle in circulation and cloudiness over the subtropical Southeast Pacific: a modeling study. Journal of Climate 17: 1699–1710

Goodman C., & Small Griswold, J., (2018). Climate Impacts on Density Altitude and Aviation Operations. Atmospheric Sciences Department, University of Hawaii at M_anoa, Honolulu, Hawaii

IPCC 2013. AR5-WGI, The Physical Science Basis: https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/

Karl, T.R., N. Nicholls, and A. Ghazi, 1999: CLIVAR/GCOS/WMO workshop on indices and indicators for climate extremes: Workshop summary. Climatic Change, 42, 3-7.

Montecinos A, Aceituno P. (2003). Seasonality of the ENSO-related rainfall variability in central Chile and associated circulation anomalies. Journal of Climate 16: 281–296

Pizarro O, Hormazábal S, Gonzalez A & Yañez E. (1994): Variabilidad del viento, nivel del mar y temperatura en la costa norte de Chile. Investigaciones marinas V.22

Reglamentos Aeronáuticos DAR, (2017). "Operaciones de Aeronaves" DAR 08. Dirección General de Aeronáutica Civil.

Rutllant J & Fuenzalida H (1991). Synoptic aspects of the central Chile rainfall variability associated with the southern Oscillation. International Journal of Climatology 11: 63-76.

Schulz N, Boisier J P, & Aceituno P. (2011). "Climate Change along the arid coast of northern Chile". Journal of Climate 32: 1803–1814

Puempel, H., and P. D. Williams, 2016: The impacts of climate change on aviation: Scientific challenges and adaptation pathways. ICAO Environmental Report 2016: On Board A Sustainable Future, 205–207.

DIRECCIÓN METEOROLÓGICA DE CHILE
Av. Portales 3450, Estación Central-Santiago
Contacto: comunicacional_dmc@meteochile.cl
Teléfono +562-24364538 – Fax +562-24378212