

Impacto del cambio climático en el FIR Santiago

Dirección Meteorológica de Chile

Sección Climatología

Oficina Cambio Climático



ELABORADO POR CAROLINA ARAVENA URZÚA Y CAROLINA VILCHES DELGADO

Carolina.aravena@dgac.gob.cl, Carolina.vilches@dgac.gob.cl

DIRECCIÓN METEOROLÓGICA DE CHILE

SUBDEPARTAMENTO CLIMATOLOGÍA Y METEOROLOGÍA APLICADA

SECCIÓN CLIMATOLOGÍA

OFICINA CAMBIO CLIMÁTICO

NOVIEMBRE 2020

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN 4

2. DATOS Y METODOLOGÍA..... 5

2.1. Delimitación geográfica..... 5

2.1. Datos y métodos 5

3. CARACTERISTICAS CLIMÁTICAS DE LA ZONA..... 7

4. ANÁLISIS DE LAS VARIABLES QUE AFECTAN LAS OPERACIONES AÉREAS 9

4.1. Anomalías y tendencias de temperaturas extremas y precipitación 9

4.2. Tendencias de los índices climáticos extremos de cambio climático que afectan la aeronáutica 15

4.3. Altitud de densidad 18

4.4. Viento 20

4.5. Base de la altura de las nubes..... 25

4.6. Visibilidad 27

4.7. Tiempo presente 29

5. DISCUSIÓN Y RESULTADOS 33

6. REFERENCIAS 34

1. INTRODUCCIÓN

Los efectos del cambio climático se vienen haciendo presente desde hace varias décadas, trayendo consigo nuevos escenarios en términos de variables meteorológicas como la temperatura y la precipitación. Estos cambios traen consecuencias en una de las actividades económicas de carácter global más importante como es la aviación, donde una de las dificultades que ha tenido que enfrentar la navegación aérea producto del aumento de las temperaturas, ha sido el impacto en el rendimiento de los aviones dificultando las maniobras de despegue, asociado principalmente a la baja densidad del aire que dificulta la elevación del avión, lo que lleva a modificar su carga e incluso la longitud de la pista para lograr el despegue (Puempel y Williams, 2016).

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 el FIR Santiago es donde se concentra el mayor tráfico aéreo, ya que se encuentra el aeropuerto más importante del país, Arturo Merino Benítez (AMB), además, cuenta con 39 aeródromos de carácter público y civil los cuales se distribuyen desde la región de Atacama hasta la región del Biobío, por lo cual es indispensable evaluar el impacto del cambio climático en esta zona mediante estaciones meteorológicas de superficie, considerando las variables de temperatura, viento y precipitación, además de las variables aeronáuticas de los aeródromos que concentran alto flujo de operaciones; La Florida ubicado en la ciudad de La Serena y Carriel Sur ubicado en Concepción, junto con el aeropuerto AMB en Santiago, 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 Santiago abarca desde el límite norte 28°30' S hasta el límite sur 38°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.

2.1. Datos y métodos

Todas las estaciones meteorológicas utilizadas en este estudio son parte del FIR Santiago (Figura 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 2019. La temperatura media utilizada corresponde a la temperatura media aritmética obtenida de la siguiente ecuación:

$$T_{med} = \frac{T_{m\acute{a}x} + T_{m\acute{i}n}}{2}$$

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 Homogeneity 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 La Florida en la ciudad de La Serena, el aeropuerto Arturo Merino Benítez en Santiago y el aeródromo Carriel Sur en Concepción.

Finalmente, las tendencias lineales analizadas en todas las variables meteorológicas de este estudio, se obtuvieron a través del método de mínimos cuadrados con los valores anuales y estacionales, aplicándose el test estadístico Mann Kendall para determinar su significancia estadística al nivel del 5% de confianza en las variables de temperatura y precipitación.

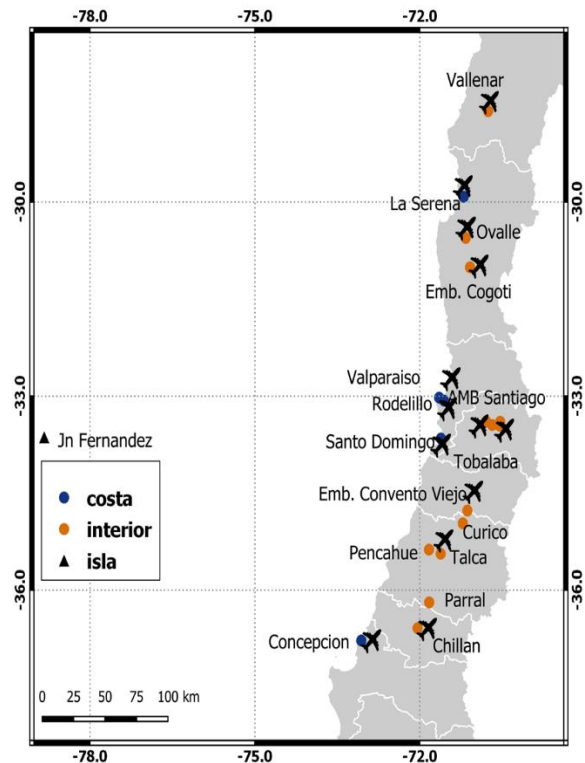


Figura 1: Distribución espacial de las estaciones del FIR Santiago y principales aeródromos. En azul estaciones costeras (La Serena, Valparaíso, Rodelillo, Santo Domingo y Concepción). En naranja estaciones del valle-interior (Vallenar, Ovalle, Embalse Cogotí, Pudahuel, Cerro Calán, Santiago, Tobalaba, Embalse Convento Viejo, Curicó, Penco, Talca, Parral y Chillán). El triángulo es la Isla Juan Fernández.

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

Nombre	Latitud sur	Latitud oeste	Altitud (m)	Fuente
Vallenar	28°59'33"	70°75'69"	535	DMC-DGA
La Serena	29°91'75"	71°20'11"	142	DMC
Ovalle	30°55'28"	71°16'42"	340	DGA
Embalse Cogotí	31°00'78"	71°08'56"	740	DGA
Valparaíso	33°02'28"	71°64'75"	51	DMC
Rodelillo	33°06'83"	71°55'75"	330	DMC
Pudahuel	33°39'19"	70°79'44"	482	DMC
Cerro Calán	33°39'5"	70°53'67"	848	DGA
Santiago	33°44'5"	70°68'28"	534	DMC
Tobalaba	33°45'44"	70°54'78"	650	DMC
Juan Fernández	33°63'58"	78°83'31"	4	DMC
Santo Domingo Ad.	33°65'5"	71°61'42"	75	DMC
Chimbarongo	34°76'94"	71°13'31"	239	DGA
Curicó	34°96'64"	71°21'67"	230	DMC
Pencahue	35°37'25"	71°83'25"	55	DGA
Talca U.C.	35°43'58"	71°61'97"	130	DGA
Parral	36°18'78"	71°82'83"	175	DGA
Chillán	36°58'72"	72°04'	151	DMC
Concepción	36°77'83"	73°06'25"	17	DMC

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

Variable meteorológica	Estación meteorológica homogenizada
Temperatura máxima	Santo Domingo Embalse Cogotí Pencahue
Temperatura mínima	Pudahuel Embalse Cogotí Embalse Convento Viejo Parral Pencahue
Precipitación	Tobalaba

3. CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS DE LA ZONA

La zona central de Chile tiene un clima tipo mediterráneo (Köppen, 1948), que se distingue por tener temperaturas templadas, las cuales son suavizadas en la costa oeste por la influencia del Océano Pacífico. El régimen de precipitaciones se caracteriza por una estación lluviosa en los meses de invierno y seca en verano. La duración del período seco varía latitudinalmente, en donde, por ejemplo, en la ciudad de La Serena dura entre 8 a 10 meses y en Concepción de 4 a 5 meses (DMC, 2008). La figura 2 confirma lo anterior, mostrando que los eventos de precipitación presentan un ciclo estacional bien definido, además, se registra una mayor cantidad de precipitación en estaciones costeras y ubicadas más al sur de la zona central, como es el caso de Concepción. En cambio, en estaciones que se encuentran hacia el valle como Pudahuel y Curicó, los montos de precipitación que se registran durante el año son mucho más bajos que la ciudad costera de Concepción, los cuales no

superan los 600 mm al año, dominando así la variación latitudinal que la longitudinal (Tabla 3).

Al igual que la precipitación, la temperatura media, y también las extremas, muestra un ciclo estacional bastante evidente en todas las estaciones del FIR Santiago, con mínimos de temperatura durante el invierno (junio y julio) y máximos en verano (enero y febrero), a excepción de la estación de Juan Fernández, donde se aprecia un leve desfase, observándose las mínimas en los meses de agosto y septiembre (Figura 2). La estación que registra la mayor temperatura mínima es Juan Fernández con 13.1°C, y la menor Chillán con 7.1°C. En cuanto a la temperatura máxima, la estación que presenta mayores valores de esta variable es Embalse Cogotí con 22.9°C, seguida por Pudahuel con 22.8°C, mientras que en Santo Domingo se presenta la temperatura extrema más baja con 17.7°C.

Tabla 3: Temperatura media anual y precipitación media anual entre 1990-2019 para las estaciones meteorológicas del estudio.

Nombre	Temperatura Mínima (°C)	Temperatura Máxima (°C)	Temperatura Media (°C)	Precipitación (mm)
Vallenar	10.4	22.6	16.6	38.5
La Serena	10.7	18.1	14.4	81.3
Ovalle	9.6	22.8	16.2	102.6
Embalse Cogotí	7.6	22.9	15.3	157.7
Valparaíso	11.7	17.9	14.8	360.1
Rodelillo	9.6	19.2	14.4	512.7
Pudahuel	8.1	22.8	15.5	220.9
Cerro Calán	10.0	23.2	16.7	373.4
Santiago	8.7	23.1	16.0	286.9
Tobalaba	8.7	22.8	15.8	326.2
Juan Fernández	13.1	18.0	15.6	972.3
Santo Domingo Ad.	8.0	17.7	12.9	421.0
Chimbarongo	7.4	21.2	14.4	602.3
Curicó	7.9	21.2	14.6	595.6
Pencahue	6.6	21.9	14.3	576.9
Talca U.C.	7.9	21.3	14.6	561.0
Parral	6.6	20.8	13.7	869.6
Chillán	7.1	20.4	13.8	942.2
Concepción	8.2	17.9	13.1	984.9

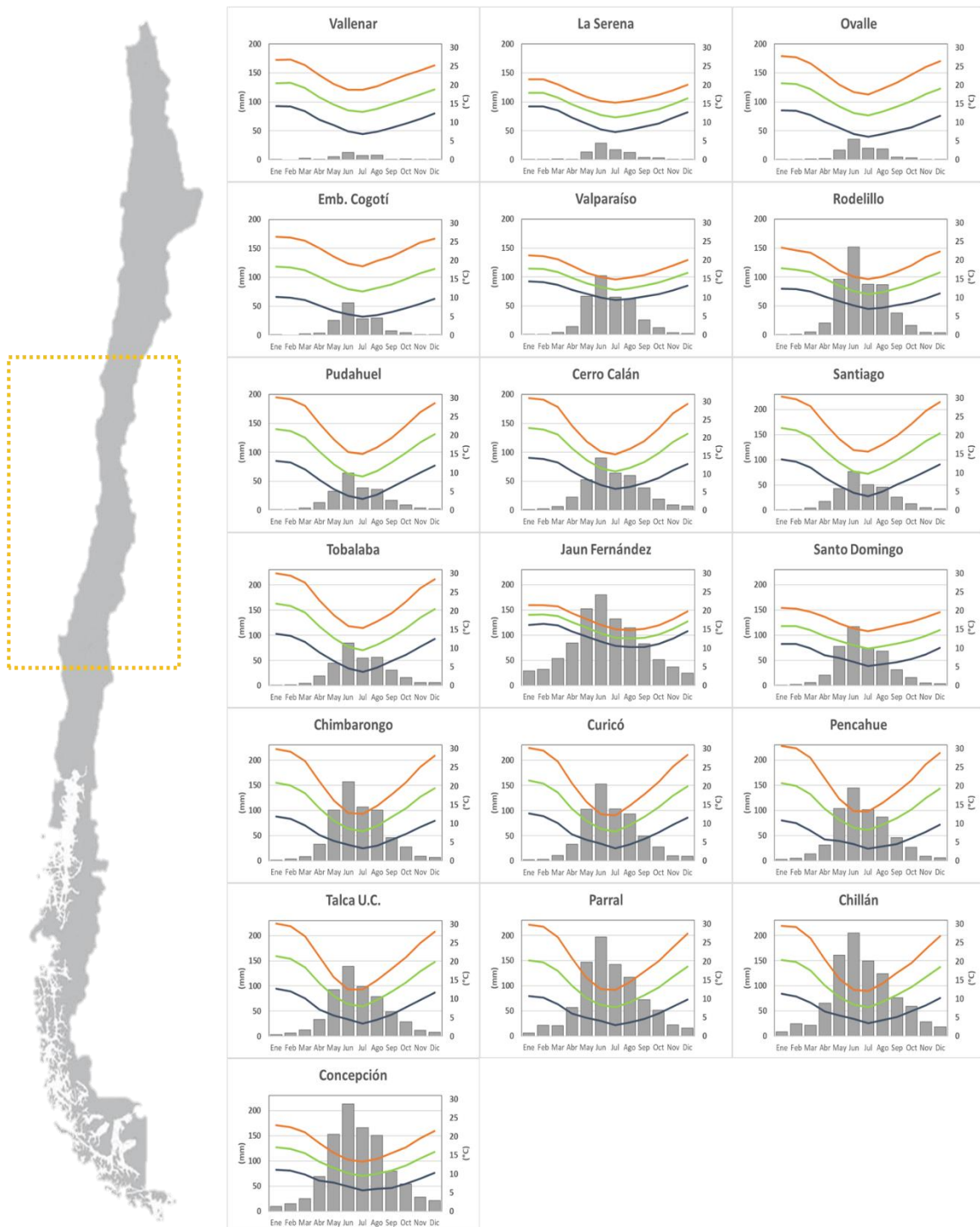


Figura 2: Climogramas de las estaciones utilizadas. Barras grises indican precipitación, línea naranja temperatura máxima, línea azul temperatura mínima y línea verde la temperatura media entre 1990 y 2019.

4. ANÁLISIS DE LAS VARIABLES QUE AFECTAN LAS OPERACIONES AÉREAS

Estudios recientes han demostrado que el aumento de la temperatura a nivel del suelo puede afectar las operaciones aéreas, resultando en una disminución de la densidad del aire, lo que reduce la fuerza de sustentación en las alas de las aeronaves que despegan. Otra de las consecuencias del cambio climático es el aumento en el nivel medio del mar, lo que pone en riesgo a los aeropuertos que están emplazados en lugares costeros y a baja altitud (Puempel y Williams, 2016). Por otra parte, el viento es otra de las variables a considerar, ya que juega un rol muy importante tanto en el despegue y aterrizaje de los aviones, por lo cual, se analizarán las tendencias observadas de temperatura, precipitación y la altitud de densidad, además de la variación en la intensidad del viento.

La gran extensión de territorio que abarca el FIR Santiago, produce una gran diversidad en cuanto a las condiciones meteorológicas dentro del FIR, las cuales podrían afectar las operaciones aéreas debido a cambios en los patrones de circulación produciendo variaciones en las variables climáticas como nubosidad, temperatura, viento, precipitación entre otras. Una de las herramientas para monitorear precisamente estos cambios meteorológicos, son 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 aeródromos La Florida (La Serena) y el aeródromo Carriel Sur (Concepción), además del aeropuerto internacional de Santiago. Tanto los aeródromos como el aeropuerto son categoría de operación I, clase C los aeródromos y Clase A el aeropuerto AMB, 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 2019, con fin de evaluar el cambio que han sufrido estas variables producto del cambio climático en estas ciudades.

4.1 Anomalías y tendencias de temperaturas extremas y precipitación

Al analizar el comportamiento de las temperaturas extremas según las características fisiográficas de la zona central del país, se puede observar que las estaciones costeras, desde el año 2015, muestran un aumento con respecto al promedio climatológico, siendo el año 2016 el que presenta las mayores anomalías positivas de 0.8°C en la temperatura mínima y 0.6°C en la máxima. Al igual que en las estaciones costeras, las estaciones del valle-interior presentan un aumento en las temperaturas, desde el año 2012 en la temperatura mínima y desde el 2011 en la máxima, siendo la más alta el año 2019 con 0.8°C. En Juan Fernández, al igual que en las otras estaciones, se presenta la misma condición desde el año 2012, sin embargo, se destacan el año 2018 y 2019 por presentar una leve disminución de las temperaturas con respecto al promedio (Figura 3).

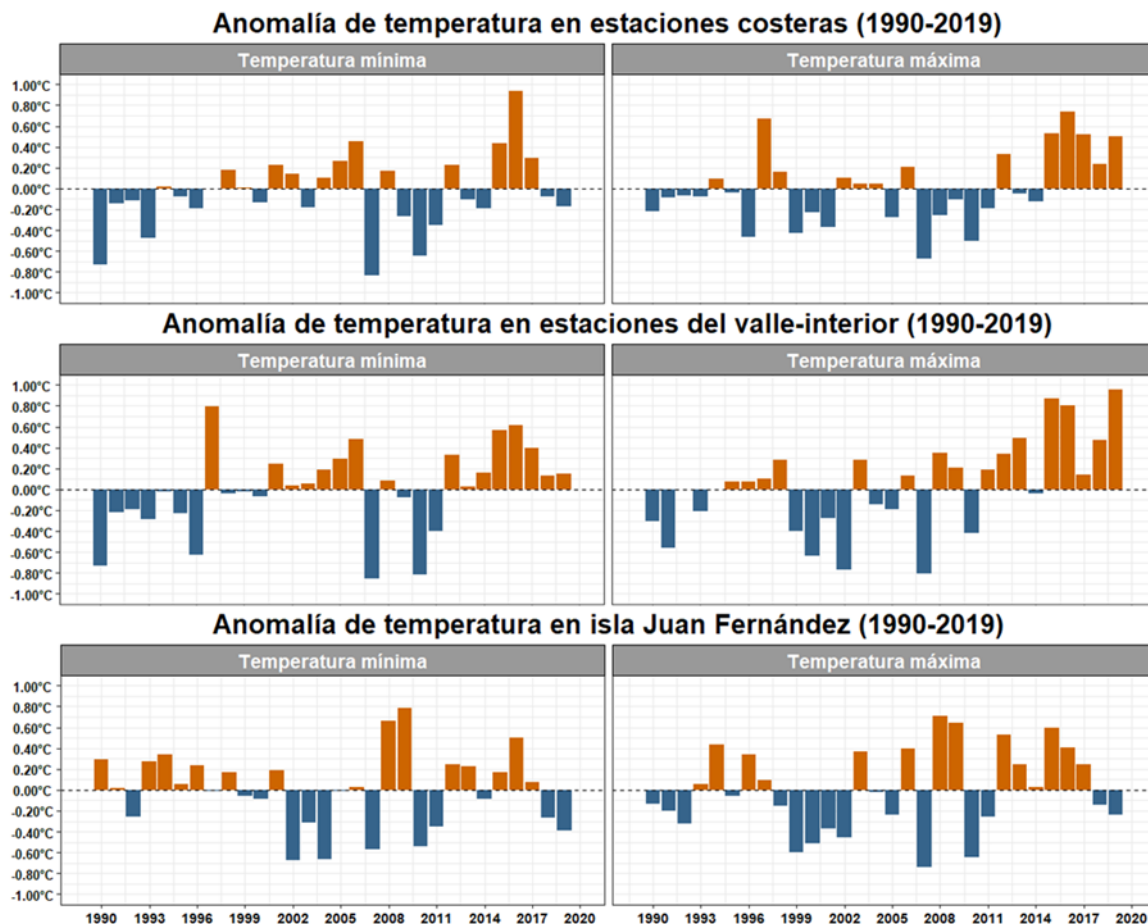


Figura 3: Anomalías de temperaturas extremas en estaciones costeras, del valle-interior e Isla Juan Fernández. Panel izquierdo: Anomalía de la temperatura mínima (°C), Panel derecho: Anomalía de la temperatura máxima desde 1990 al 2019, calculada en base al período climatológico 1990-2010, en todas las estaciones del FIR Santiago.

Las precipitaciones en la zona central se caracterizan por tener un marcado ciclo estacional, en donde se presenta una estación seca que corresponde a los meses de verano, y una lluviosa entre los meses de abril a septiembre, en los cuales se concentra entre el 60% y 70% de la precipitación anual (Quintana 2004). Sin embargo, desde el año 2010 en adelante se viene desarrollando una “mega-sequía”, producto del déficit de precipitación anual que ha afectado a la zona central, el cual ha generado impactos sustanciales sobre los recursos hídricos, los bordes

costeros, y las coberturas vegetaciones en gran parte del país (CR2, 2015).

Esta situación se ha reflejado en las estaciones del FIR Santiago, ya sea en las estaciones costeras, del valle-interior o en la isla Juan Fernández, producto a que desde el año 2009 en adelante se viene presentando una disminución en las precipitaciones, llegando a un déficit aproximado de 250 mm en general en todo el FIR el año 2019, confirmandose como el año más seco de la última década (Figura 4).

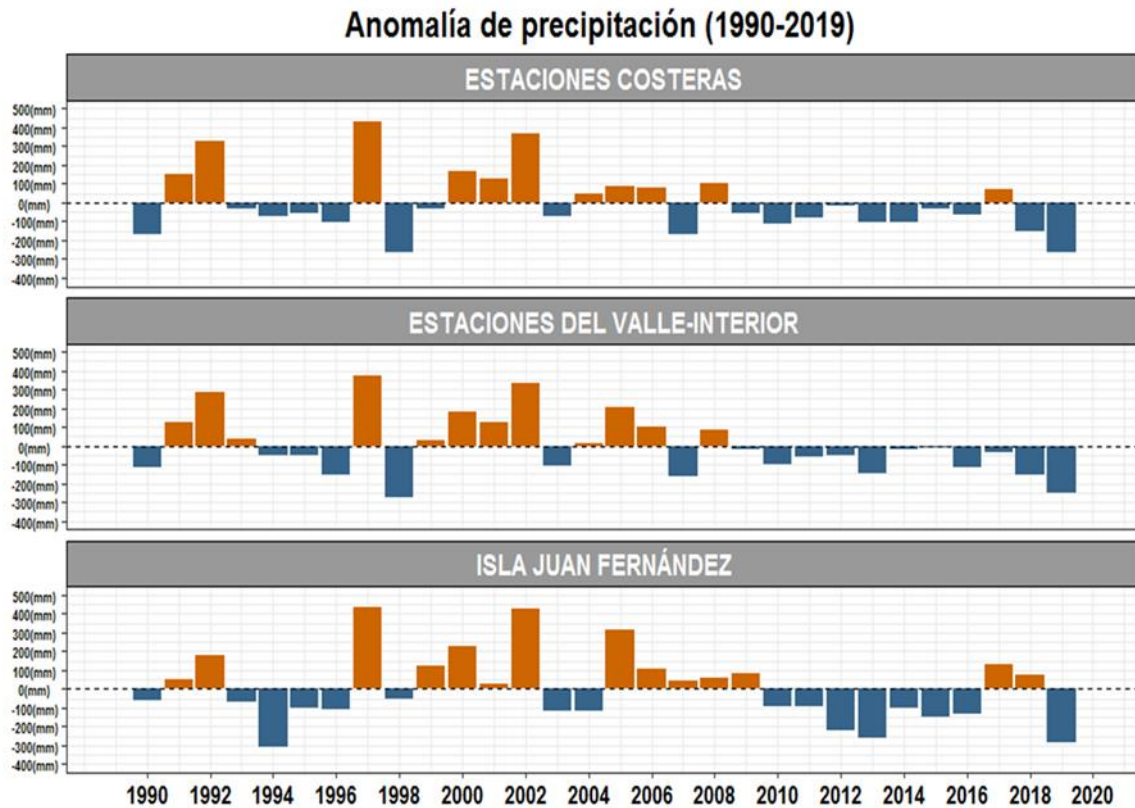


Figura 4: Anomalía de precipitación (mm) en estaciones costeras, del valle-interior e Isla Juan Fernández, en base al período 1990-2010, en todas las estaciones del FIR Santiago.

Las temperaturas extremas, por lo general, han aumentado en todas las estaciones del FIR Santiago según su promedio anual, destacándose la estación de Talca, la cual está aumentando a razón de 0.3°C por década en la temperatura mínima y a 0.6°C por década en la temperatura máxima, con un nivel de significancia al 5% (Figura 5).

Al analizar las tendencias estacionales, también se ve reflejado un aumento en las distintas estaciones del año, sobre todo en la temperatura máxima (Figura 6), donde en verano, Talca sigue siendo la estación que muestra la mayor tendencia de 1°C por década. Lo contrario sucede en las estaciones costeras de Rodelillo y Santo Domingo las cuales

muestran tendencias negativas de -0.2°C por década en la misma estación del año. En primavera, las estaciones ubicadas al norte y centro del FIR Santiago, por lo general, presentan mayores tendencias positivas que las estaciones situadas hacia el sur del FIR.

En cuanto a la temperatura mínima (Figura 7), en invierno las tendencias son negativas en prácticamente todas las estaciones del FIR Santiago, a excepción de Ovalle, Talca, Chillán y Concepción. En primavera y verano, solamente en Juan Fernández se presenta una tendencia negativa de las temperaturas mínimas, mientras que en el resto de las estaciones las temperaturas mínimas han aumentado entre 1990 y el 2019.

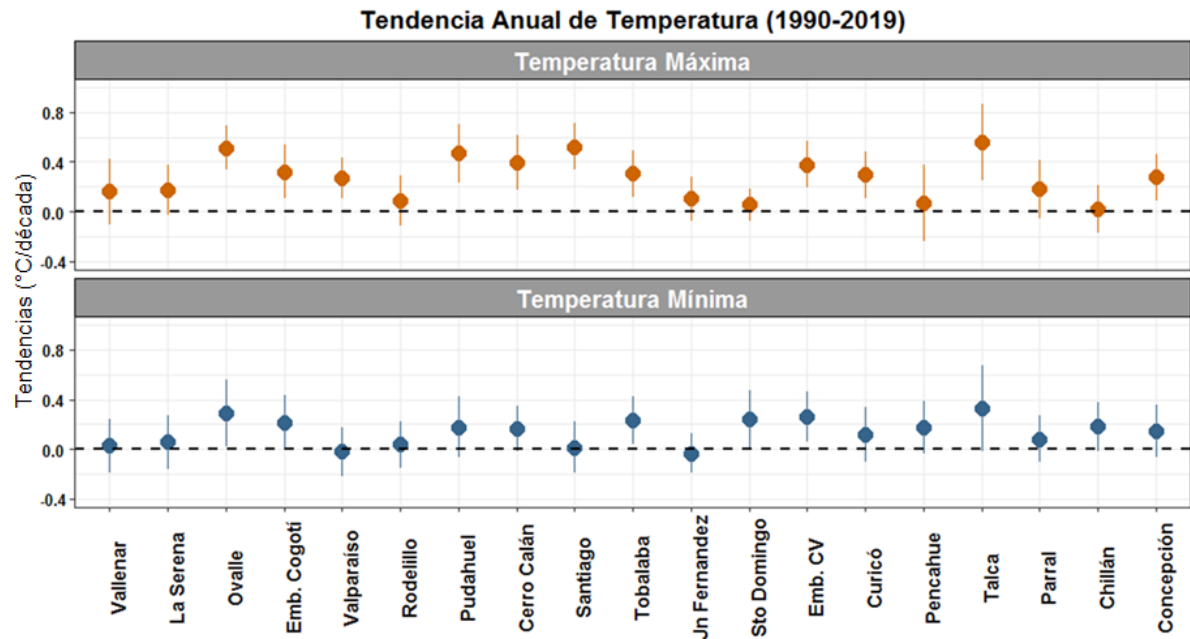


Figura 5: Tendencia anual de las temperaturas (°C/década) máxima (naranja) y mínima (azul) en el período 1990-2019, en todas las estaciones del FIR Santiago. Barras indican los intervalos de confianza al 95%.

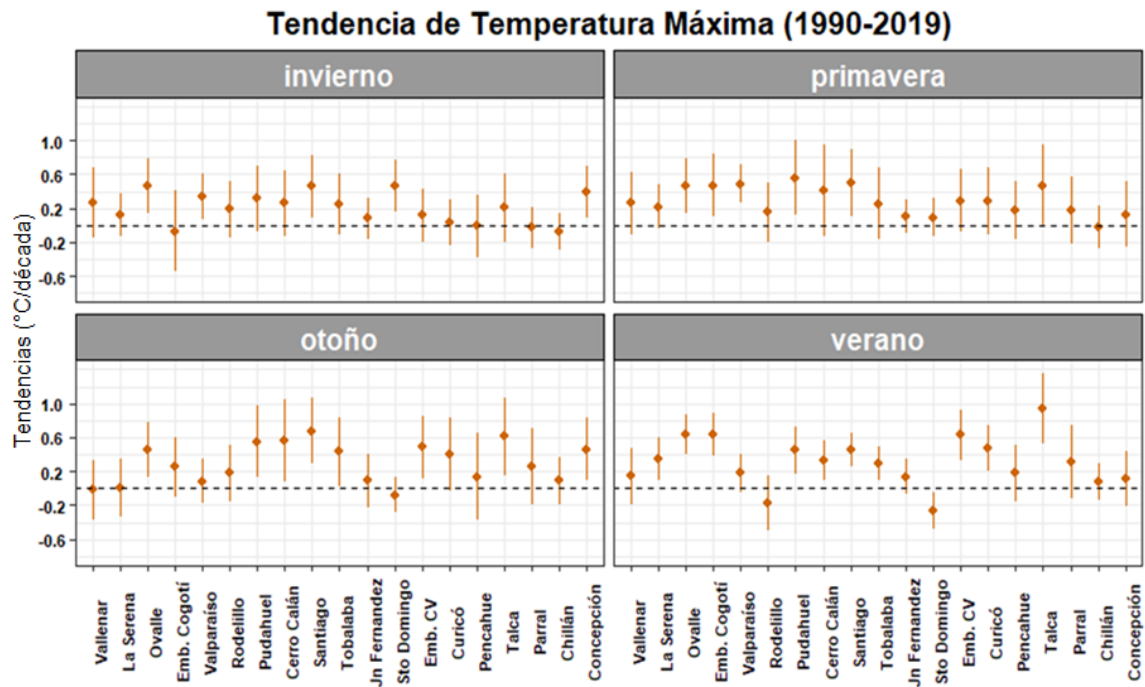


Figura 6: Tendencia estacional de temperatura máxima (°C/década) en el período 1990-2019, en todas las estaciones del FIR Santiago. Barras indican los intervalos de confianza al 95%.

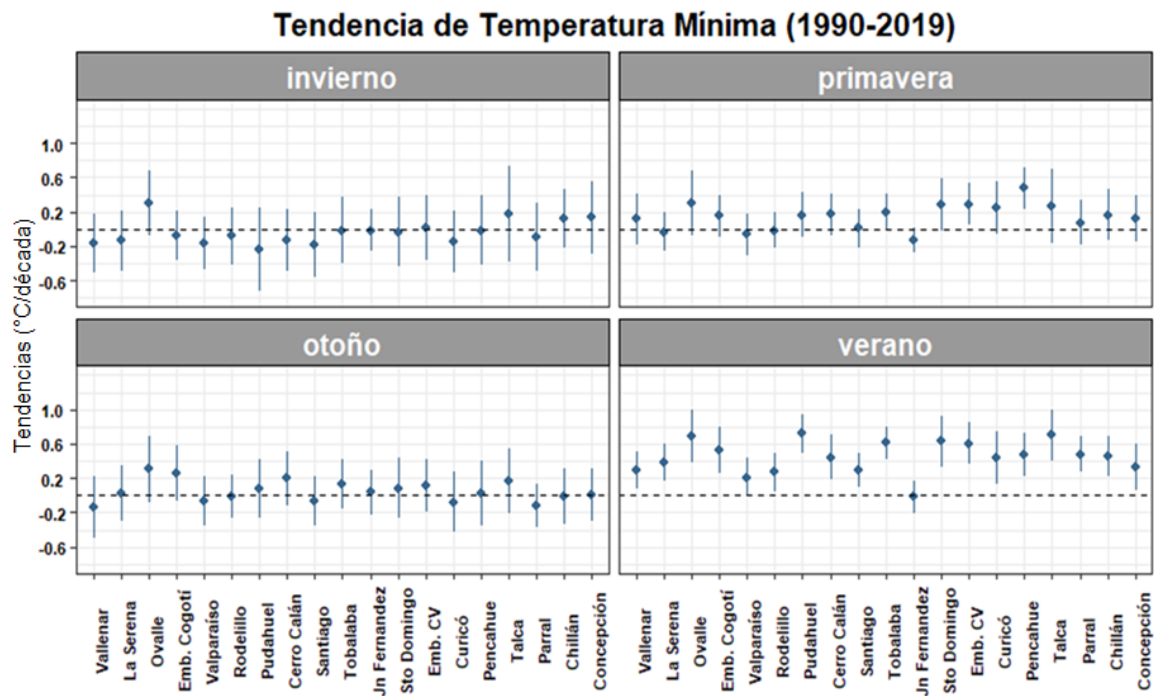


Figura 7: Tendencia estacional de la temperatura mínima (°C/década) en el período 1990-2019, en todas las estaciones del FIR Santiago. Barras indican los intervalos de confianza al 95%.

Desde el año 2010 el territorio comprendido entre las regiones de Coquimbo y la Araucanía ha experimentado un déficit de precipitaciones cercano al 30%. Esta pérdida de lluvias ha permanecido desde entonces en forma ininterrumpida y ocurre en la década más cálida de los últimos 100 años (CR2, 2015).

Las tendencias anuales de precipitación del FIR Santiago, confirman la sequía que han experimentado las regiones comprendidas entre Coquimbo y la Araucanía en los últimos años,

mostrando tendencias negativas en todas las estaciones de este FIR, alcanzando incluso hasta un 25% por década de déficit en estaciones como Rodelillo y Pudahuel (Figura 8).

Si bien en las tendencias anuales el déficit es generalizado en toda la zona, tanto en primavera como en otoño, las estaciones al norte del FIR Santiago; Vallenar, La Serena y Ovalle, presentan tendencias positivas cercanas al 25% por década (Figura 9).

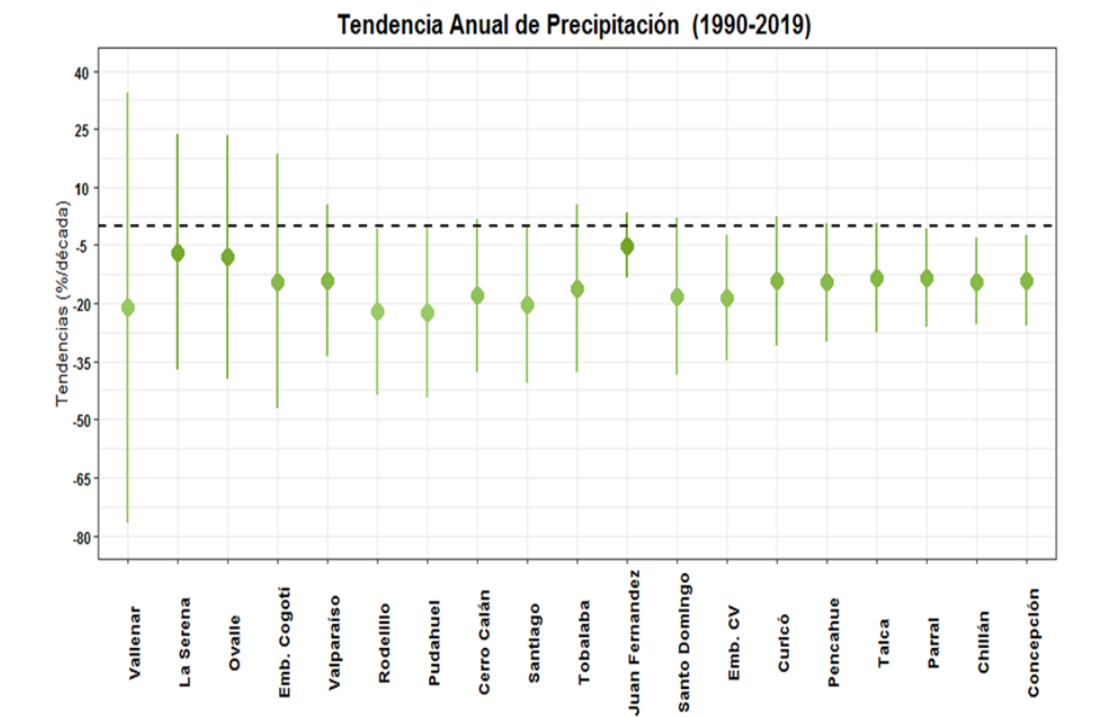


Figura 8: Tendencia anual de precipitación (%/década) en el período 1990-2019, en todas las estaciones del FIR Santiago. Barras indican los intervalos de confianza al 95%.

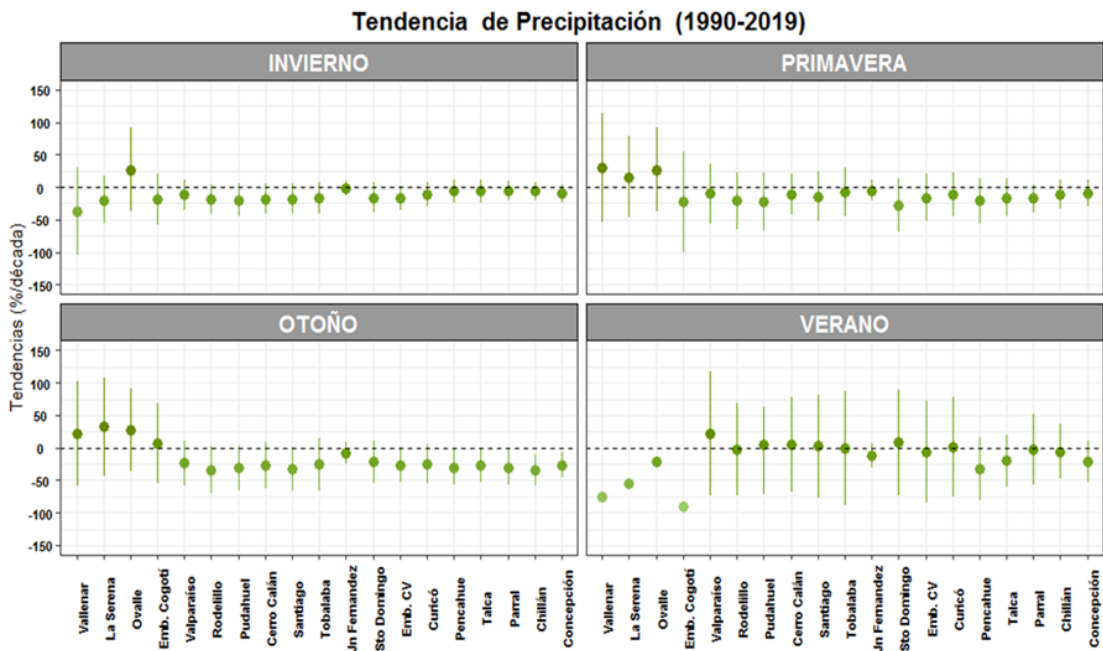


Figura 9: Tendencia estacional de precipitación (%/década) en el período 1990-2019, en todas las estaciones del FIR Santiago. Barras indican los intervalos de confianza al 95%.

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 del FIR Santiago (Karl et al., 1999).

Los índices climáticos asociados a la temperatura muestran un aumento generalizado de las temperaturas extremas en las últimas décadas en gran parte de las estaciones del FIR Santiago. En el caso de los días cálidos (porcentaje de días en que la temperatura máxima supera el percentil 90) han aumentado en casi todas las estaciones, especialmente en Embalse Cogotí con un 6% por década y en Parral con un 5%, sin embargo, en las estaciones costeras de la zona central; Rodelillo y Santo Domingo muestran una disminución de un 1% por década. Con respecto a las noches cálidas (porcentaje de días en que la temperatura mínima supera el percentil 90), las estaciones que muestran un aumento importante son Ovalle y Embalse Cogotí con un 6% y 7% por década, respectivamente. Por el contrario, los días fríos (porcentaje de días en que la temperatura máxima está bajo el percentil 10) muestran una disminución, sobre todo en estaciones al norte y en el centro del FIR Santiago, como Ovalle y Valparaíso con un decremento de un 4% por década. Las noches frías (porcentaje de días en que la temperatura mínima está bajo el percentil 10), muestran una disminución de un 3% por década en estaciones como Pudahuel, Tobalaba y Santo Domingo, sin embargo, las estaciones de Embalse Cogotí y Valparaíso presentan un leve aumento de un 1% por década (Figura 10). Las temperaturas máximas sobre 25°C, también se han hecho más frecuentes, principalmente en estaciones del valle-interior, como Ovalle (18 días por década), Embalse Cogotí (17 días por década), Santiago (11 días por década) y Parral (12 días por década). Lo mismo ocurre con las temperaturas sobre 30°C, en donde las mayores tendencias se aprecian en la zona centro y sur del FIR Santiago con un aumento de 10 días por década en Santiago y Curicó y de 14 días por década en Parral. (Figura 11).

Tendencias observadas de Índices Climáticos (%/década)				
	noches cálidas	noches frías	días cálidos	días fríos
Vallenar -	0	-2	2	0
La Serena -	1	-1	3	-1
Ovalle -	6	-1	3	-4
Emb. Cogotí -	7	1	6	-1
Valparaíso -	1	1	1	-4
Rodelillo -	1	0	0	-1
Pudahuel -	1	-3	3	-2
Cerro Calán -	2	-1	3	-1
Santiago -	1	-1	4	-2
Tobalaba -	2	-3	2	-1
Juan Fernandez -	-1	0	1	-1
Santo Domingo -	0	-3	-1	-3
Emb. CV -	2	-1	2	-1
Curicó -	3	-2	4	-1
Pencahue -	1	-1	3	0
Talca -	1	-2	1	1
Parral -	3	-2	5	-2
Chillán -	0	-1	1	0
Concepción -	1	-1	1	0

Figura 10: Tendencias de los índices climáticos; noches cálidas, noches frías, días cálidos y días fríos, entre 1990-2019, en las estaciones del FIR Santiago. Tendencias negativas (azul) y positivas (naranja).

Tendencias observadas de Índices Climáticos (días/década)		
Vallenar -	11	1
La Serena -	1	0
Ovalle -	18	6
Emb. Cogotí -	17	6
Valparaíso -	1	0
Rodelillo -	0	1
Pudahuel -	9	9
Cerro Calán -	7	8
Santiago -	11	10
Tobalaba -	6	5
Juan Fernández -	1	0
Santo Domingo -	-1	0
Emb. CV -	3	0
Curicó -	6	10
Pencahue -	6	6
Talca -	2	1
Parral -	12	14
Chillán -	4	4
Concepción -	3	0
	días con T>25°C	días con T>30°C

Figura 11: Tendencias de los índices climáticos; días con $T_{\text{máx}} > 25^{\circ}\text{C}$, días con $T_{\text{máx}} > 30^{\circ}\text{C}$, entre 1990-2019, en las estaciones del FIR Santiago. Tendencias negativas (azul) y positivas (naranja).

Los eventos extremos asociados a precipitación son categóricos en manifestar la sequía que afecta al FIR Central, en donde los días lluviosos (suma anual de precipitación en días que superan el percentil 95) muestran déficit en todas las estaciones, sin embargo, este es mucho mayor en las ubicada al centro y sur del FIR Central, en donde Concepción presenta un decremento de 71 mm por década. Con respecto a la intensidad de precipitación diaria (suma anual de precipitación en días que precipita sobre 1 milímetro, dividido por el número de días con precipitación), se aprecia que, por lo general, las precipitaciones están siendo menos intensas, sobre todo en la estación de

Rodelillo (-3 mm por década) y Santiago (-2 mm por década) (Figura 12). Los días con precipitación (número de días en el año con precipitación sobre 1 milímetro) muestran tendencias negativas desde Ovalle al sur, destacándose las estaciones de Embalse Convento Viejo con una disminución de 5 días por década y Talca con 4 días por década. Juan Fernández es la única estación que muestra tendencias positivas con un aumento de 2 días por década. Los días con precipitación sobre 20 mm (número de días en el año con precipitación sobre 20 milímetros) también muestran tendencias negativas desde Valparaíso al sur de -1 y -2 días por década (Figura 13).

Tendencias observadas de Índices Climáticos de Precipitación		
	Suma anual de días lluviosos (mm/década)	Intensidad de precipitación diaria (mm/década)
Vallenar	-9	-1
La Serena	-2	0
Ovalle	0	0
Emb. Cogotí	-14	-1
Valparaíso	-28	-1
Rodelillo	-57	-3
Pudahuel	-18	-1
Cerro Calán	-25	-1
Santiago	-23	-2
Tobalaba	-27	-1
Juan Fernandez	-41	-1
Santo Domingo	-35	-1
Emb. CV	-51	-1
Curicó	-28	-1
Pencahue	-34	-1
Talca	-36	-1
Parral	-61	-1
Chillán	-65	-1
Concepción	-71	-1

Figura 12: Tendencias de los índices climáticos; suma anual (en mm) de días lluviosos (P90) e intensidad de precipitación diaria (en mm), entre 1990-2019, en todas las estaciones del FIR Santiago. Tendencias negativas (café) y positivas (verde).

Tendencias observadas de Índices Climáticos de Precipitación		
	Días con precipitación (días/década)	Días con pp>20mm (días/década)
Vallenar	0	0
La Serena	0	0
Ovalle	-1	0
Emb. Cogotí	-1	0
Valparaíso	-1	-1
Rodelillo	-2	-2
Pudahuel	-2	-1
Cerro Calán	-2	-2
Santiago	-2	-1
Tobalaba	-2	-1
Juan Fernandez	2	-1
Santo Domingo	-3	-2
Emb. CV	-5	-2
Curicó	-2	-2
Pencahue	-3	-2
Talca	-4	-1
Parral	-3	-2
Chillán	-3	-2
Concepción	-3	-2

Figura 13: Tendencias de los índices climáticos; días con precipitación y días con precipitación sobre 20 mm, entre 1990-2019, en todas las estaciones del FIR Santiago. Tendencias negativas (café) y positivas (verde).

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 14). 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 evaluarla en el aeródromo La Florida, el aeropuerto AMB y en el aeródromo Carriel Sur. Esta evaluación se realizó durante el verano (diciembre, enero y febrero) desde 1990 hasta el 2019, 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).

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

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

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 $T_o = 15^\circ\text{C}$ (atmósfera estándar).

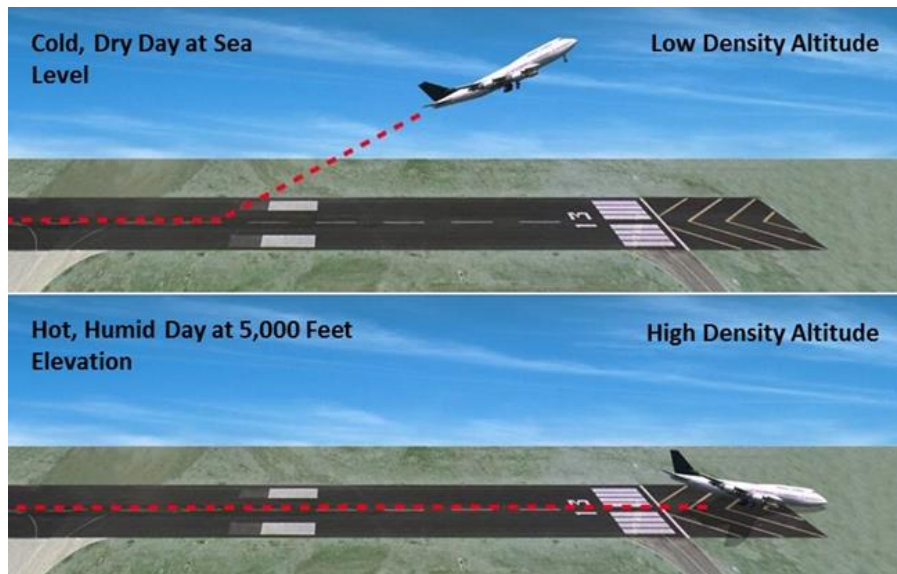


Figura 14: Esquema explicativo de la altitud de densidad y su efecto en el rendimiento de los aviones. Fuente: National Weather Service (NOAA).

Para entender la altitud de densidad, tomaremos como ejemplo el año 1990 en el aeródromo La Florida, el cual, al evaluar la altitud de densidad durante el verano, utilizando la temperatura máxima nos da como resultado 1300 pies, esto se traduce en que el avión funcionaría como si estuviese en esa altitud a pesar de que la altitud del aeródromo es de sólo 481 pies (Figura 15a). En AMB, la altitud de densidad es mucho más alta en comparación a La Florida, debido a que las temperaturas máximas durante el verano también son más altas ($\sim 30^{\circ}\text{C}$ en promedio) y además la altitud del aeropuerto también es más alta (1555 pies), lo que provoca que la DA bordee los 3800 pies en 1990 (Figura 15b). En Carriel Sur por su parte, la altitud de densidad se presenta más baja que en los otros dos casos, producto de que la altitud del aeródromo es sólo de 26 pies y que además la temperatura máxima promedio en verano es de $\sim 22^{\circ}\text{C}$, lo que influye que la DA no supere los 1000 pies desde 1990 hasta el 2019 (Figura 15c).

hasta el 2019 a razón de 38 pies por década en La Florida, 55 pies por Década en AMB y en 5 pies por década en Carriel Sur.

Es importante destacar que la altitud de densidad está fuertemente relacionada a las variables meteorológicas, lo que se evidenció en el FIR Santiago, ya que en aquellos aeródromos que se ubican en la costa (La Florida y Concepción), su clima permite que se regule la temperatura, por lo que la altitud de densidad no es tan alta en comparación del aeropuerto AMB que se sitúa más alejado de la línea de costa, por lo cual, al evaluar el impacto que tiene el cambio climático producto del aumento progresivo de los eventos de calor extremo que también se proyectan a futuro (IPCC, 2013), este sería uno de los principales aeropuertos en los que hay que hacer un seguimiento de la evolución de la temperatura máxima para cambiar los protocolos que aseguren la eficiencia y seguridad de la navegación aérea de ser necesario.

A pesar de las variaciones en la altitud de densidad en cada aeródromo y en el aeropuerto, las tres coinciden en que han aumentado desde 1990

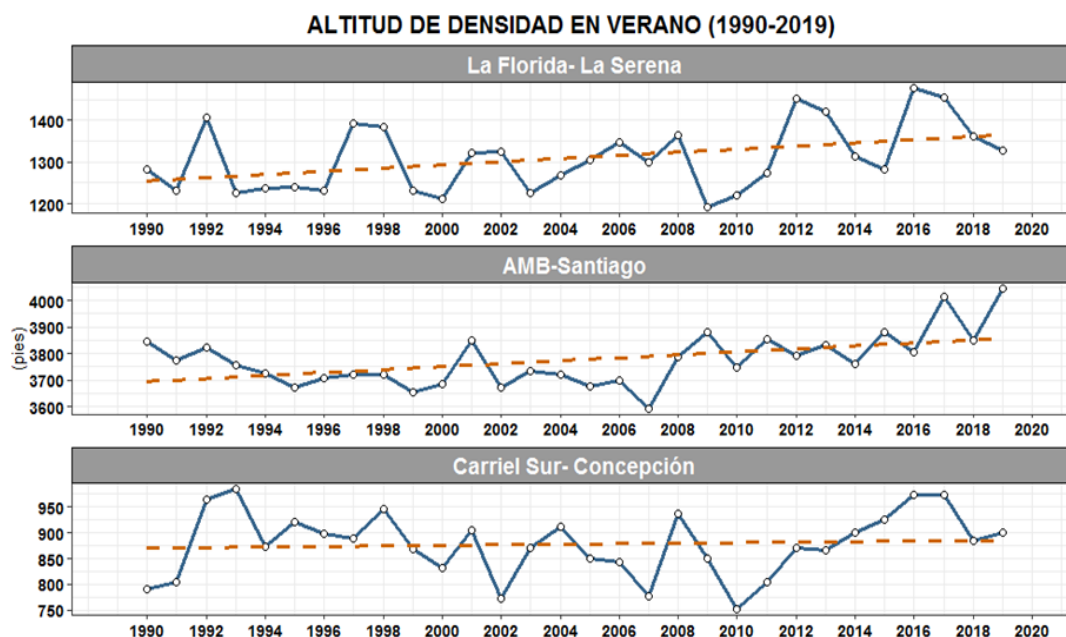


Figura 15: Altitud de densidad (pies), obtenida a partir de la temperatura máxima (línea azul), durante los meses de verano (diciembre, enero y febrero) desde 1990 a 2019 en La Florida, AMB y Carriel Sur.

4.4 Viento

La intensidad del viento es uno de los factores principales y más importantes para la navegación aérea, ya que es una variable que se debe evaluar antes de iniciar un vuelo y considerarla durante todo el desarrollo del mismo.

Para comparar si la intensidad del viento ha experimentado cambios a lo largo del tiempo, separamos la información en dos períodos decadales, (1990-1999) y (2010-2019) en cada aeródromo y en el aeropuerto AMB. En La Florida, se observa que en la segunda década el viento no ha variado significativamente (Figura 16), a excepción de algunos meses como enero, abril, mayo y junio, en donde en horas de la tarde se aprecia una leve disminución de la intensidad (1 nudo). Por el contrario, a lo que ocurre en La Florida, en AMB, la intensidad del viento aumenta en la última década, principalmente en los meses cálidos, en donde, en diciembre en horas de la tarde la diferencia es de 4 nudos con respecto a la primera década (Figura 17). En el caso del aeropuerto de Concepción la intensidad del viento ha bajado en la última década, especialmente en horas de la tarde y en verano, con una disminución de 3 nudos. (Figura 18).

Por otro lado, en la figura 19 se aprecia que en La Florida predominan los vientos con dirección oeste con una intensidad no mayor a los 20 nudos sobre todo en los meses de diciembre, febrero y marzo, en donde la posición del Anticiclón Subtropical del Pacífico, produce que se genere una leve brisa de componente oeste costa afuera (Miller, 1976),

conduciendo estos vientos hacia la superficie costera durante el día (Weischet, 1996), mientras que en los meses invernales se aprecian vientos de componente sur-este con una intensidad menor a los 10 nudos. En AMB (Figura 20), la mayor parte del año se presentan vientos de componente sur, asociada al régimen promedio de circulación superficial en Santiago que corresponde a un sistema de brisa valle-montaña que produce vientos del suroeste por la tarde y débiles vientos del este en la noche (Garreaud y Rutllant, 2006). Cabe destacar que, en los meses fríos, como mayo, junio y julio se observan vientos de componente norte con intensidad menor a 10 nudos, asociados a una mayor aproximación de sistemas frontales debido al desplazamiento hacia menores latitudes del “cinturón de los oestes”.

Finalmente, en Carriel Sur, los vientos desde el mes de octubre hasta marzo tienen, principalmente, una componente sur-oeste con una intensidad menor a los 20 nudos, en cambio, desde abril a septiembre se presentan vientos de componente norte con intensidades que alcanzan hasta los 30 nudos (Figura 21).

Tanto en el aeródromo de La Florida como en Carriel Sur, la intensidad del viento aumenta en verano, siendo una característica persistente en muchas zonas costeras, ya que son impulsados por la evolución de los gradientes térmicos que se produce entre el océano y la tierra (Burt et al., 1973, 1974; Halpern, 1974, 1977; Price y Weller, 1986; Rosenfeld, 1988; Lerczak et al., 2001).

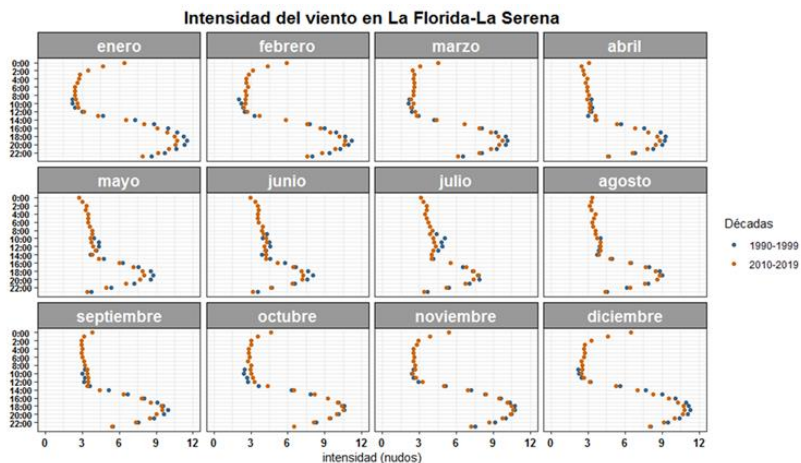


Figura 16: Intensidad horaria (UTC) del viento (nudos) en La Serena. Década (1990-1999) puntos azules y Década (2010-2019) puntos naranjas.

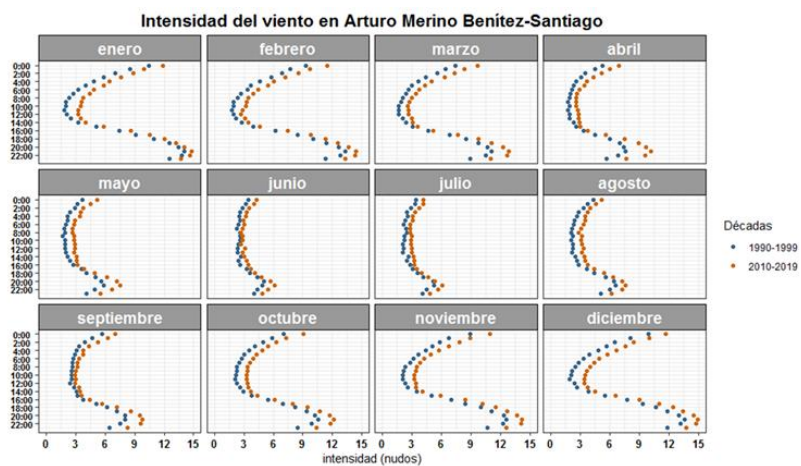


Figura 17: Intensidad horaria (UTC) del viento (nudos) en Santiago. Década (1990-1999) puntos azules y Década (2010-2019) puntos naranjas.

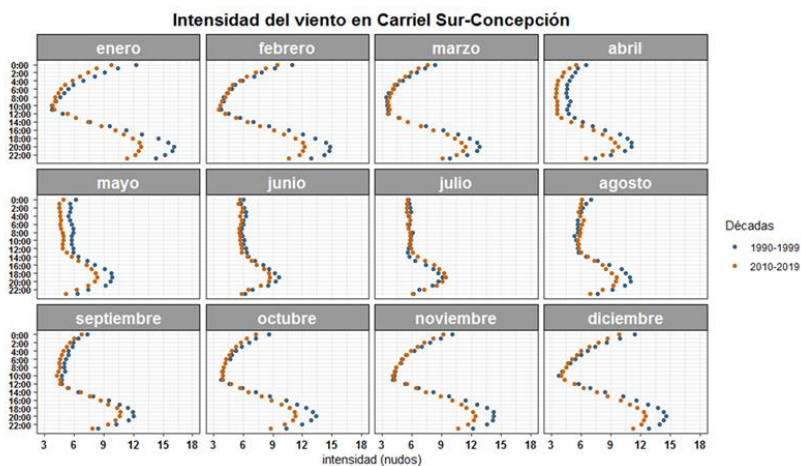


Figura 18: Intensidad horaria (UTC) del viento (nudos) en Concepción. Década (1990-1999) puntos azules y Década (2010-2019) puntos naranjas.

Dirección e intensidad del viento en La Serena

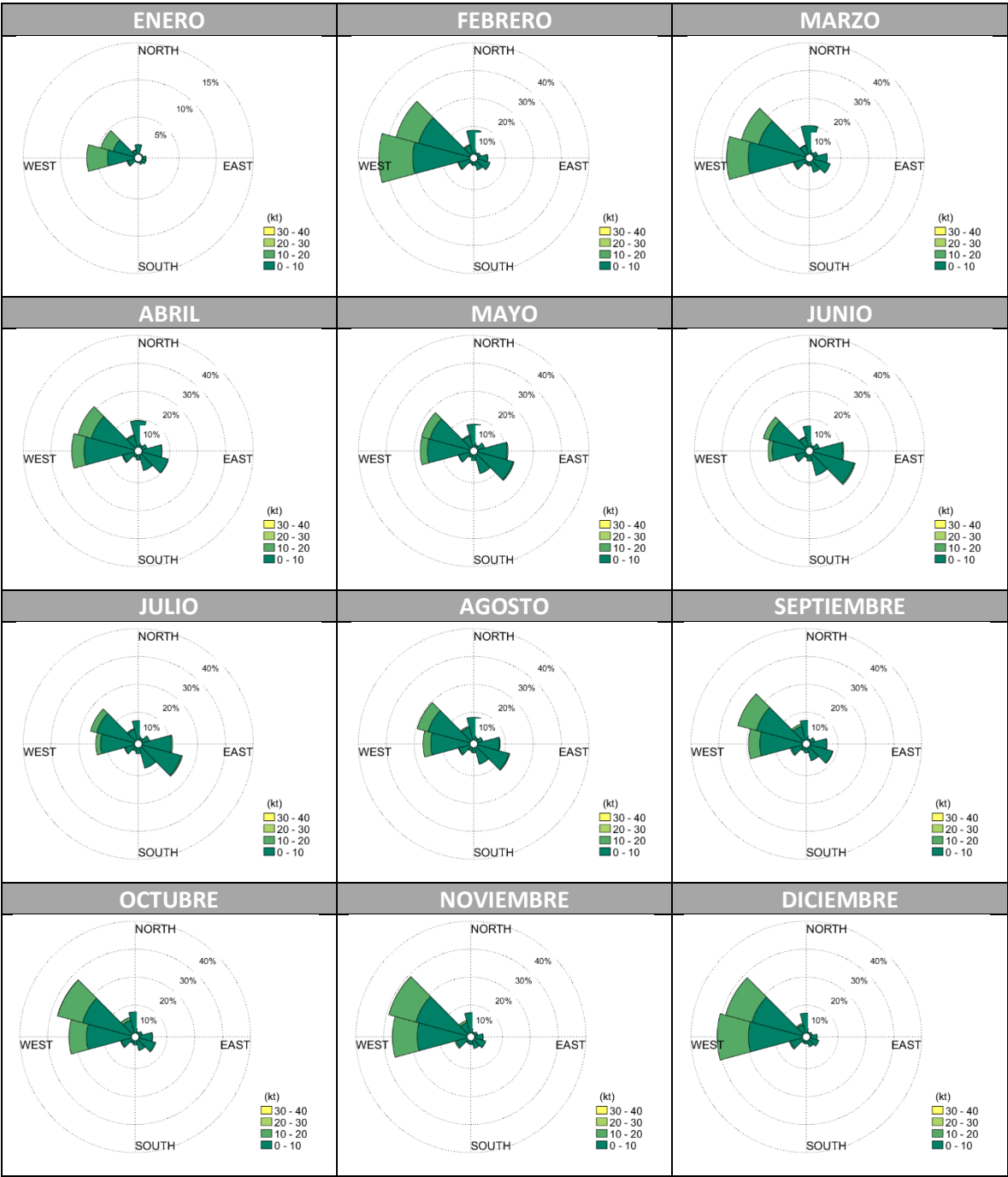


Figura 19: Dirección e intensidad promedio del viento en La Serena entre 1990-2019 en todos los meses del año.

Dirección e intensidad del viento en Santiago



Figura 20: Dirección e intensidad promedio del viento en Santiago entre 1990-2019 en todos los meses del año.

Dirección e intensidad del viento en Concepción



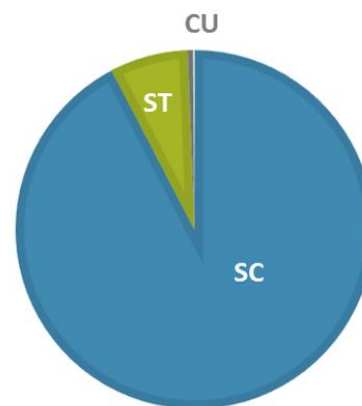
Figura 21: Dirección e intensidad promedio del viento en Concepción entre 1990-2019 en todos los meses del año.

4.5 Base de la altura de las nubes

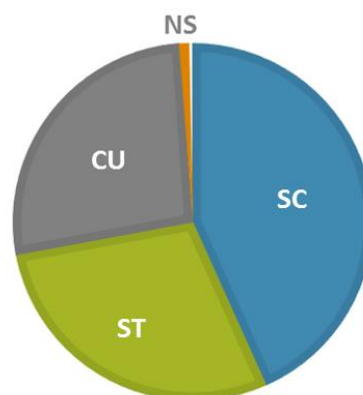
En las operaciones aéreas, se considera relevante para la navegación aérea la nubosidad bajo los 5000 pies, según el procedimiento descrito para la elaboración de un pronóstico de aeropuerto TAF [DAP 03 08]. En base a esta característica, se determinó el tipo de nubosidad más frecuente bajo los 5000 pies en el aeropuerto AMB y en ambos aeródromos (Figura 22).

En el aeródromo La Florida, predomina la nubosidad tipo estratocúmulo (SC), seguido de estratos (ST). Este tipo de nubosidad es característico de la costa en la zona norte, debido a la subsidencia asociada al anticiclón semipermanente del pacífico sur, la cual, al combinarse con las aguas frías de la costa, producen una capa límite húmeda frecuentemente cubierta por estratocúmulos, la cual está presente durante todo el año. [Muñoz et al, 2015]. En AMB, existen tres grandes grupos de nubosidad menor a 5000 pies; estratocúmulos, estratos, cúmulos y en menor frecuencia aparecen los nimbostratos. En Carriel Sur, la condición es diferente, ya que predominan los cúmulos (CU), a diferencia de las otras ciudades. Le siguen los estratocúmulos, estratos y en menor frecuencia nimbostratos (NS). En cuanto al comportamiento mensual del tipo de nubosidad, (Figura 23), los estratocúmulos predominan durante todo el año en La Florida, mientras que, en Santiago predominan en prácticamente todo el año, a excepción del verano, en que aparecen con mayor frecuencia los cúmulos, nacidos a partir de la convección térmica, debido a que en verano aumentan las temperaturas, por lo tanto, la masa de aire caliente asciende hacia capas más altas y frías, dando origen a la formación de una nube de desarrollo vertical como son los cúmulos. En Carriel sur, por su parte, predominan los cúmulos durante el invierno y la primavera, temporada en la cual se concentran las precipitaciones en esta ciudad. Esto se debe a que la nube tipo cumulo una vez que crece en altura, da origen a los cumulonimbus, los cuales son los responsables de dejar precipitación y tormentas. Además, en esta ciudad aparece con mayor frecuencia los nimboestratos, especialmente en invierno, asociados a sistemas frontales que también son responsables de aportar con precipitación

Aeródromo La Florida- La Serena



Aeropuerto Arturo Merino Benítez-Santiago



Aeródromo Carriel Sur- Concepción

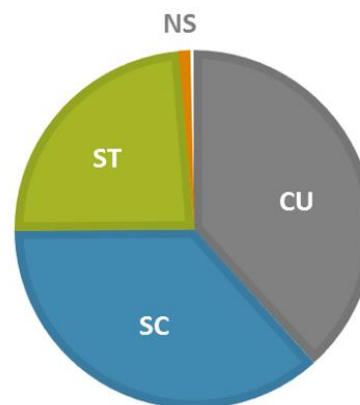


Figura 22: Frecuencia del tipo de nubosidad bajo los 5.000 pies en el aeródromo de La Florida, AMB y Carriel Sur.

A pesar de que las nubes se consideran de suma importancia para la navegación aérea hasta los 5000 pies, existe una restricción aún mayor en los aeródromos y aeropuertos de categoría I, que implica que la aproximación y aterrizaje de las aeronaves no debe ser inferior en la altura de nubes a 200 pies [DAR 06] (Figura 24). En La Florida, las observaciones con esa restricción de nubosidad se reportan con mayor frecuencia durante mayo, junio, julio y agosto, las cuales además han presentado un ligero aumento desde 1998 hasta el 2019 en ~2obs/década, precisamente en los meses con mayor cantidad de observaciones. En AMB, se repiten los meses con mayor frecuencia de techos bajos de nubosidad, aunque las observaciones han aumentado un poco más que en La Florida a razón de ~12 obs/década. En Carriel Sur, además de los meses anteriores se suma abril a los que presentan mayor registro de nubosidad bajo los 200 pies con una tendencia de ~10 obs/década.

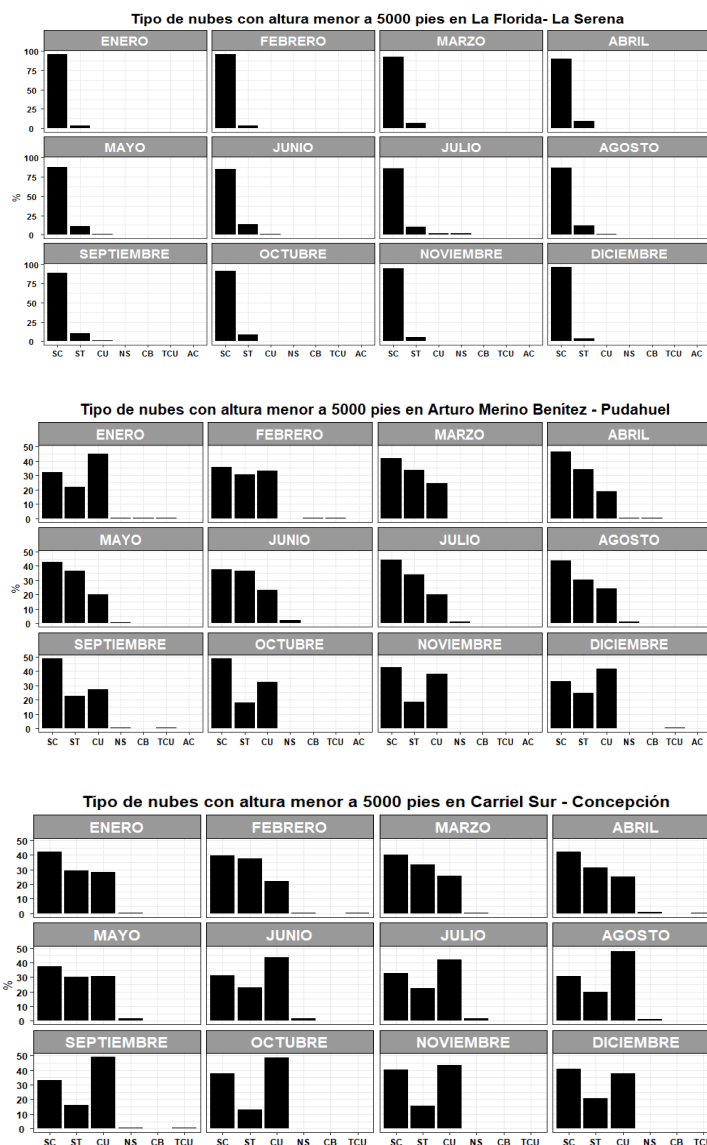


Figura 23: Frecuencia de observaciones (%) con el tipo de nubes bajo los 5000 pies La Florida, AMB y Carriel Sur, para todos los meses del año. Estratocúmulos (SC), Estratos (ST), Cúmulos (CU), Nimbostratos (NS), Altocúmulos (AC), Cumulonimbos (CB), y Torres de Cúmulos (TCU)

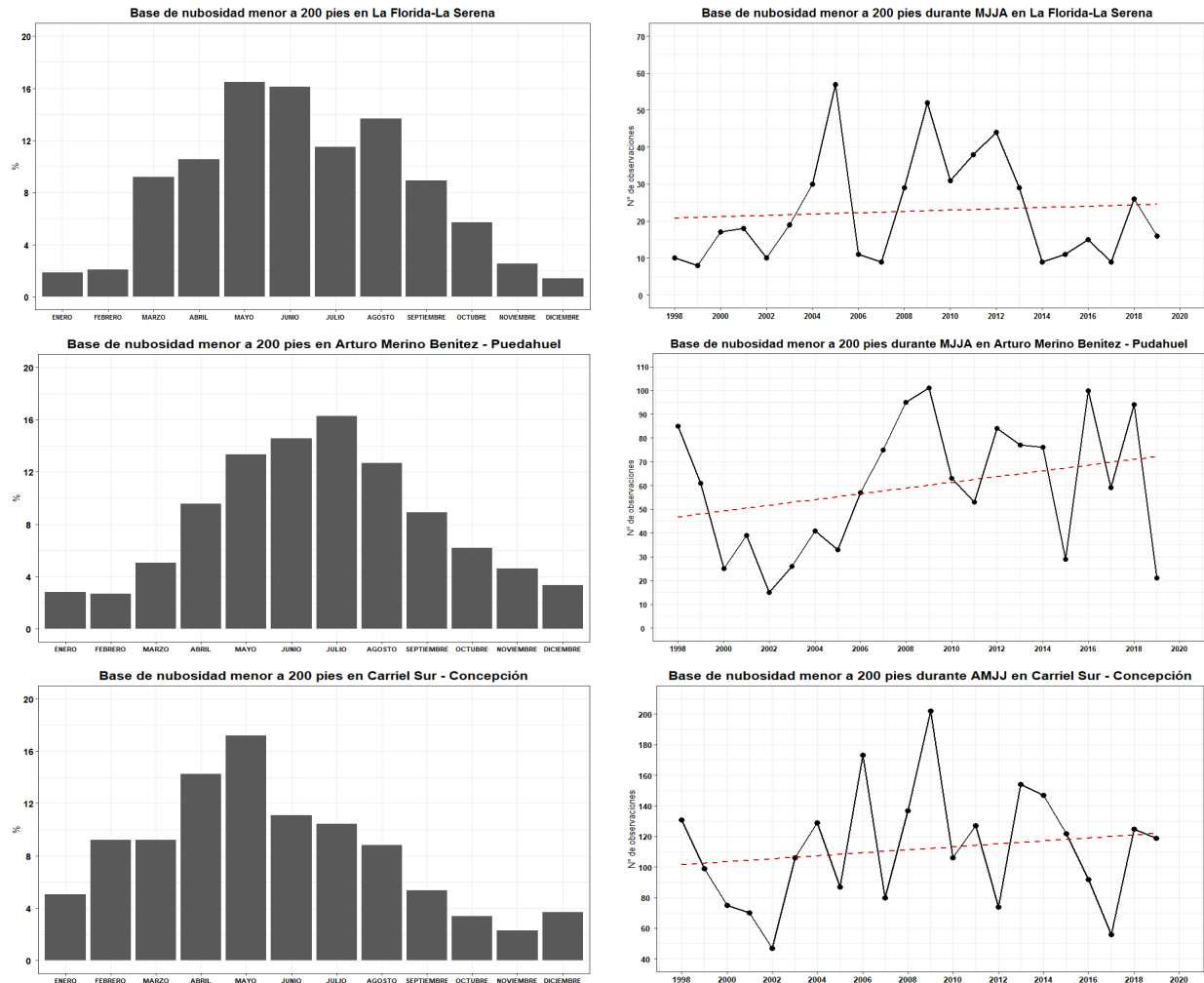


Figura 24: Porcentaje de observaciones (%) con base de la nubosidad menor a 200 pies, en todos los meses del año entre 1998 y 2019 (panel izquierdo) y Número de observaciones, con base de la nubosidad menor a 200 pies, en mayo, junio, julio y agosto en el aeródromo de La Florida y AMB, y en abril, mayo, junio y julio en Carriel Sur, entre 1998 y 2019 (panel derecho) (línea negra con puntos). Tendencia (obs/década) en línea punteada roja.

4.6 Visibilidad

La visibilidad en aeronáutica se entiende por el valor más elevado entre:

- la distancia máxima a la que pueda verse y reconocerse un objeto de color negro, situado cerca del suelo, al ser observado ante un fondo brillante.
- La distancia máxima a la que puedan verse e identificarse las luces de aproximadamente 1000 candelas ante un fondo no iluminado.

Ambas distancias se evalúan mediante instrumentos que entregan el alcance óptico meteorológico (MOR) o mediante observación humana.

En La Florida, en AMB y Carriel Sur, se analizó la visibilidad reinante (máximo de visibilidad, al que se llega dentro de un círculo que cubre por lo menos la mitad del horizonte o la mitad de la superficie del aeródromo (DAP 03 06,2008)), menor a 800 metros, ya que bajo este rango de visibilidad existen restricciones en el aterrizaje y despegue de

las aeronaves en cada aeropuerto [DAR, 06], (Figura 25), determinándose que durante mayo, junio, julio y agosto son los meses en que existe mayor frecuencia de observaciones bajo esta condición en La Florida, los cuales a pesar de concentrar cerca del 50% de las observaciones con visibilidad menor a 800 metros han disminuido

desde el 2005 al 2019 en cerca de ~40 obs/década. En el caso de AMB, las observaciones con visibilidad menor a 800 metros se concentran en un 60% en los meses de mayo, junio y julio, aunque al igual que en La Florida, han disminuido desde el 2005 hasta el 2019 en ~72 obs/década durante estos meses. Por su lado en Carriel Sur, la disminución de la visibilidad a 800 metros, se da con mayor frecuencia entre abril y junio concentrándose en estos meses cerca del 60% de las observaciones totales durante el año, las cuales también han disminuido desde el 2005 en adelante a razón de ~31 obs/década durante los meses de mayor recurrencia.

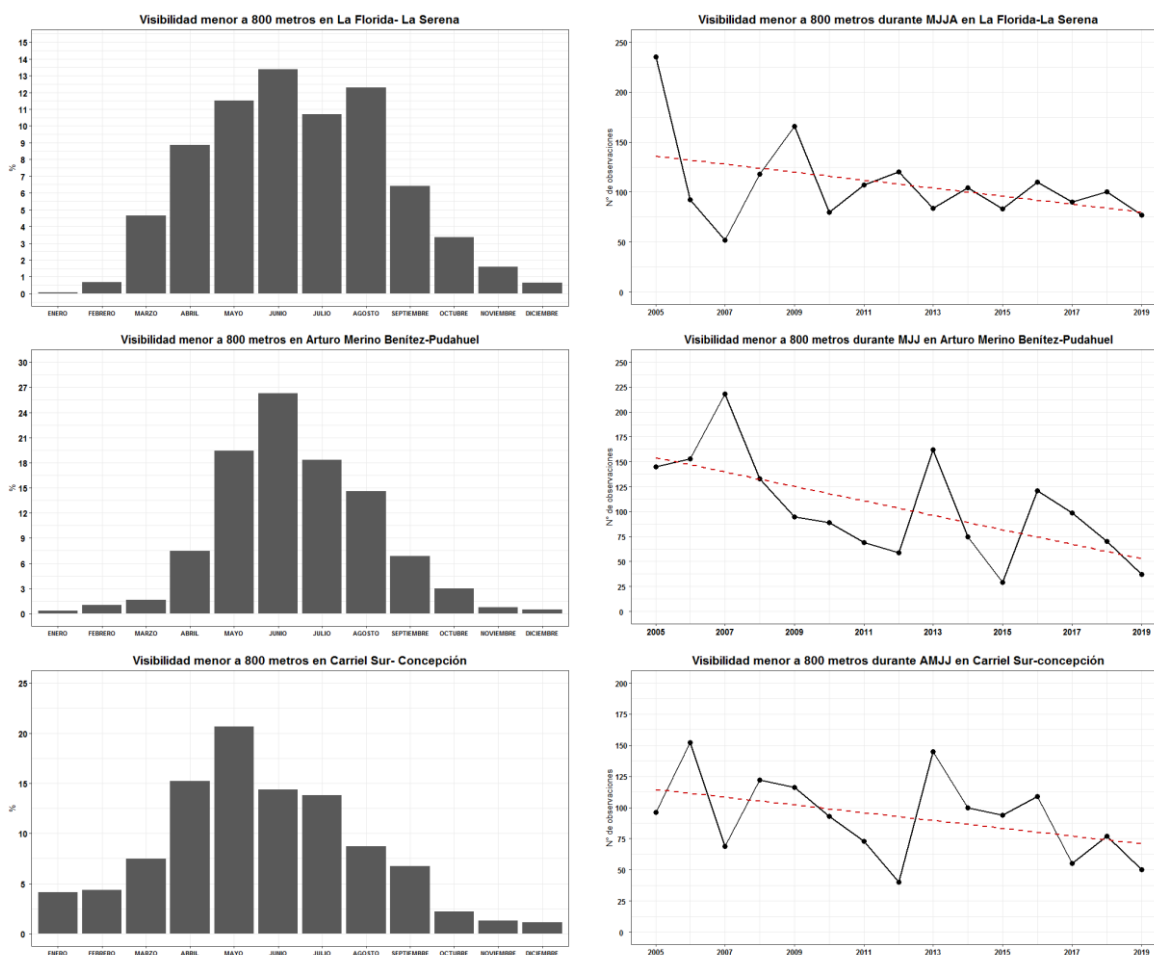


Figura 25: Porcentaje de observaciones (%), con visibilidad menor a 800 metros en todos los meses del año desde el 2005 al 2019 (panel izquierdo). Número de observaciones, con visibilidad menor a 800 metros en los meses de mayo, junio, julio y agosto en La Florida, junio, julio y agosto en AMB y abril, mayo, junio y julio en Carriel Sur desde el 2005 al 2019 (panel derecho).

4.7 Tiempo presente

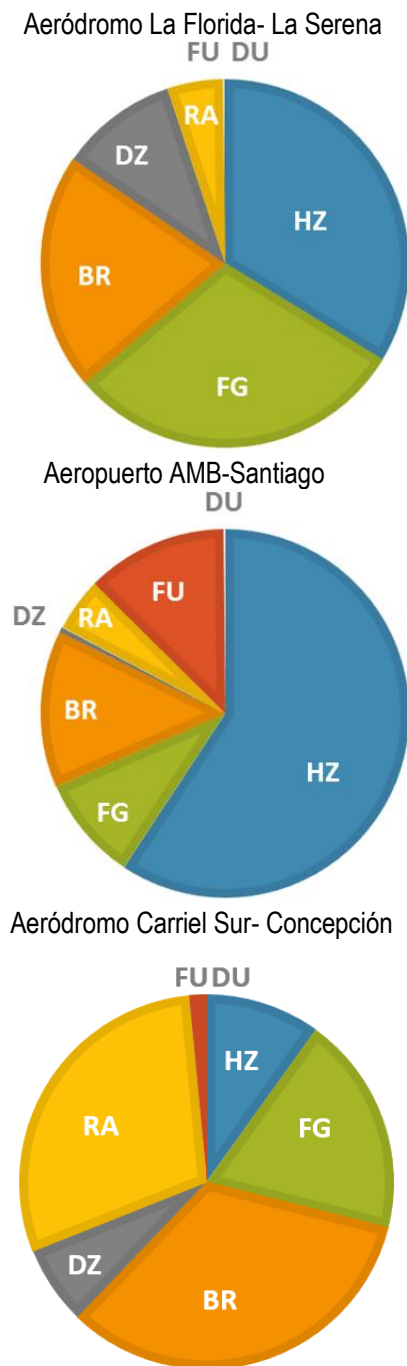


Figura 26: Frecuencia del fenómeno de tiempo presente desde el 2011 al 2019. Lluvia (RA), llovizna (DZ), neblina (BR), niebla (FG), bruma (HZ), polvo (DU), humo (FU).

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. En La Florida, el fenómeno de tiempo presente que se reporta con mayor frecuencia es la niebla (FG), seguido de la bruma (HZ) y la neblina (BR). También, hay observaciones, aunque con menor frecuencia de llovizna (DZ) y algunos reportes de lluvia (RA). En AMB, el fenómeno de tiempo presente con mayor frecuencia es la bruma (BR), seguida de la llovizna (BR). Otro fenómeno de tiempo presente que se reporta con frecuencia es el humo (FU), el cual, si bien no es un fenómeno meteorológico, si puede afectar la visibilidad para las operaciones de aterrizaje y despegue en el aeropuerto. En Carriel Sur, la condición es bastante diferente ya que la lluvia (RA), es un fenómeno bastante frecuente en Concepción comparado con las otras ciudades (La Serena y Santiago), lo que la convierte en el fenómeno de tiempo presente más reportado, seguido de la neblina (BR) y luego la niebla (FG). (Figura 26).

En cuanto al comportamiento mensual de los fenómenos de tiempo presente (Figura 27), se observa que en La Serena durante el verano son predominantes las observaciones de bruma o calima (partículas en suspensión secas que pueden afectar la visibilidad, OMM), mientras que hacia el invierno predomina la niebla, la cual según estudios anteriores se asocia a niebla radiativa, (Pizarro, 2016), debido a la escasez de vapor de agua durante esta época del año, lo que facilita el enfriamiento de la superficie permitiendo la emisión de radiación de onda larga. Sin embargo, a pesar de que la niebla es un fenómeno presente durante todo el año en La Serena, se ha observado una disminución en las observaciones anuales desde el 2011 hasta el 2019 (Figura 28a). En AMB, las observaciones de humo son frecuentes durante el verano, coincidentes con el periodo en que se originan mayor cantidad de incendios forestales debido a las altas temperaturas y a la baja humedad del aire, entre otros factores, los cuales al parecer están aumentando en la última década, ya que se han incrementado los reportes de humo en AMB desde el 2011 en adelante (Figura 28b). Esta condición, también puede ser la responsable de los numerosos registros de bruma durante el verano, sin embargo, la bruma está presente en las observaciones durante todo el año.

En Concepción, por su lado, predominan las observaciones de lluvia durante el invierno y la primavera, coincidente con lo que se había mencionado anteriormente debido a la concentración de las precipitaciones durante esta época del año en esa ciudad, las cuales han sido más frecuentes en los reportes del aeródromo Carriel Sur (Figura 28c). Además, en Carriel Sur, existen más reportes de neblina que de niebla lo que sería mejor para la visibilidad en ese aeródromo (Figura 27), los cuales se complementan en que las observaciones de neblina han aumentado en la última década, mientras que las observaciones de niebla han disminuido desde el 2011 en adelante (Figura 28c).

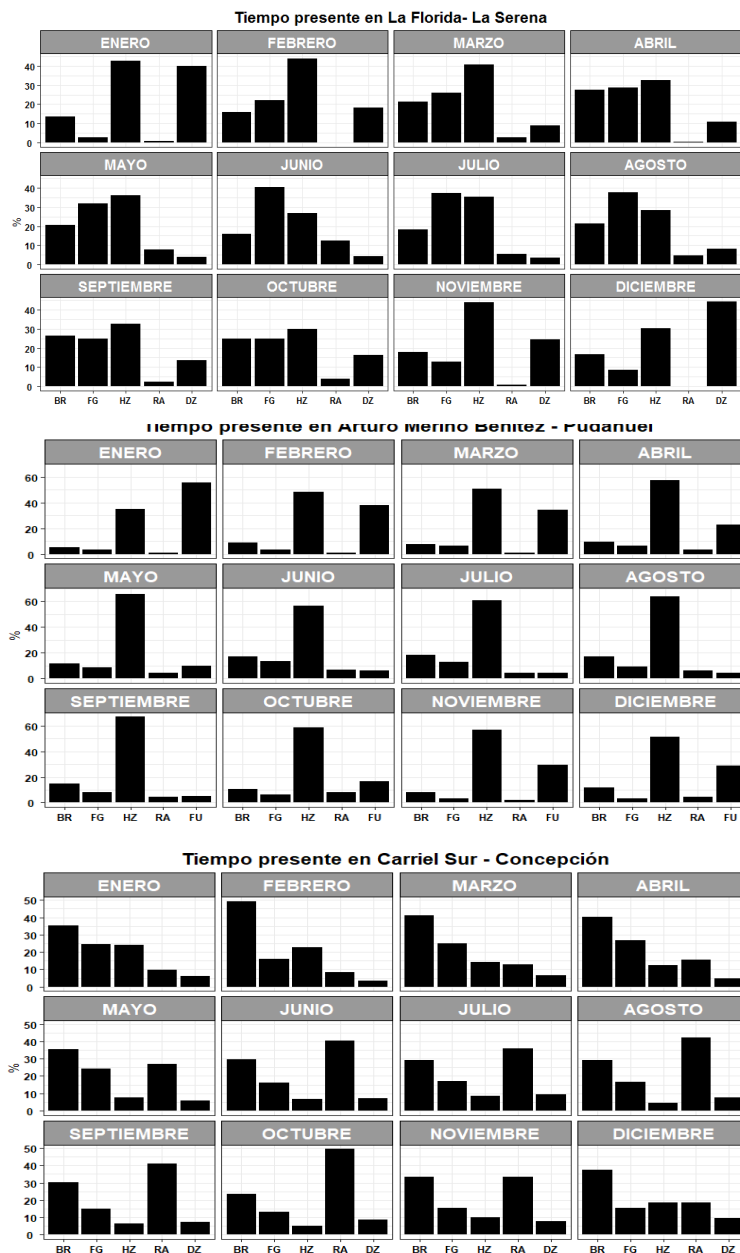


Figura 27: Porcentaje de observaciones (%), con fenómenos significativos en el momento de la observación (Tiempo presente) durante todos los meses del año desde el 2011 al 2019. Lluvia (RA), Ilovizna (DZ), neblina (BR), niebla (FG), bruma (HZ), polvo (DU), humo (FU) en La Florida, AMB y Carriel Sur.

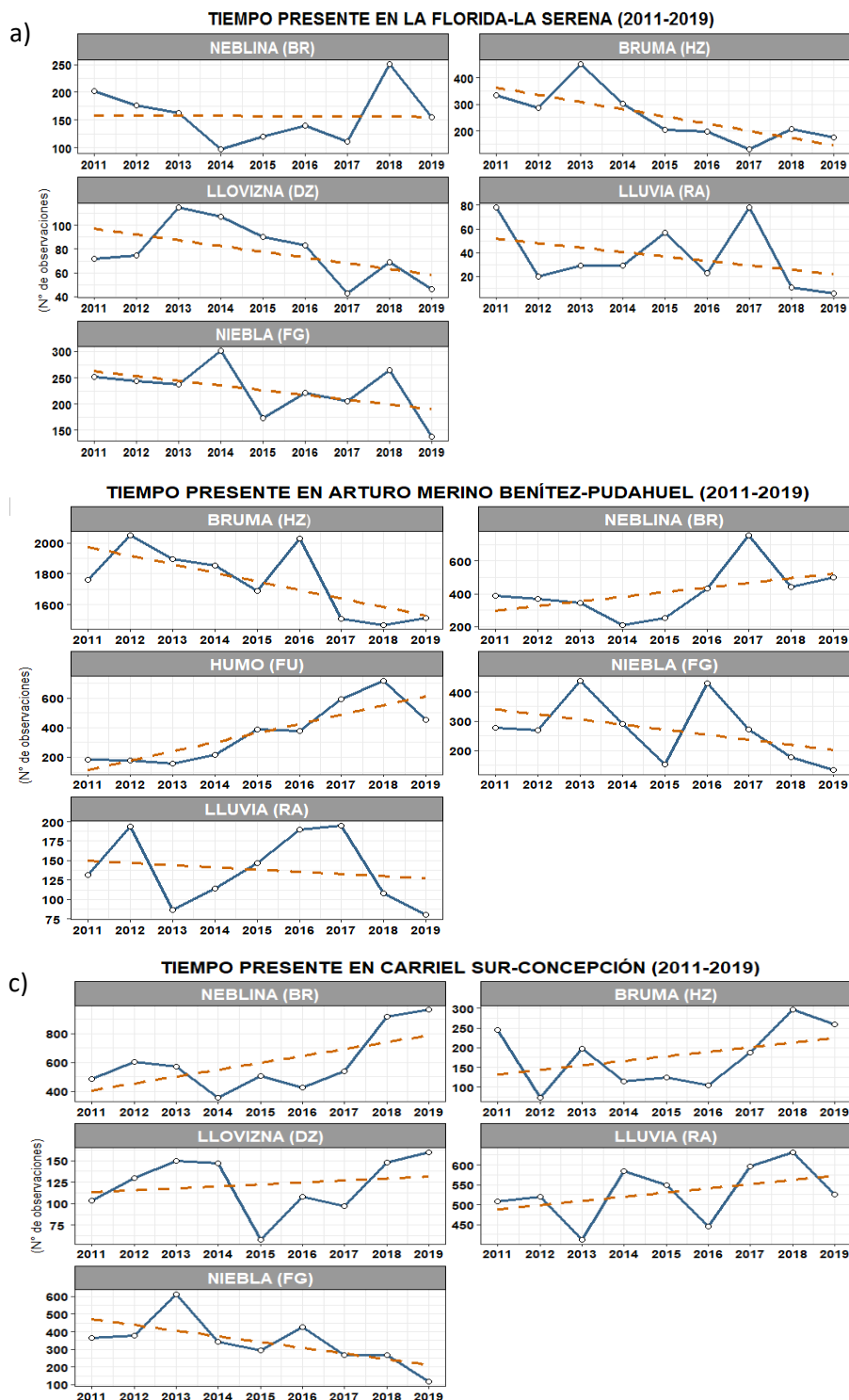


Figura 288: Número de observaciones de los fenómenos tiempo presente más frecuentes, desde el 2011 hasta el 2019 en a) La Florida, b) AMB y c) Carriel Sur (línea azul continua) y sus respectivas tendencias (línea punteada naranja).

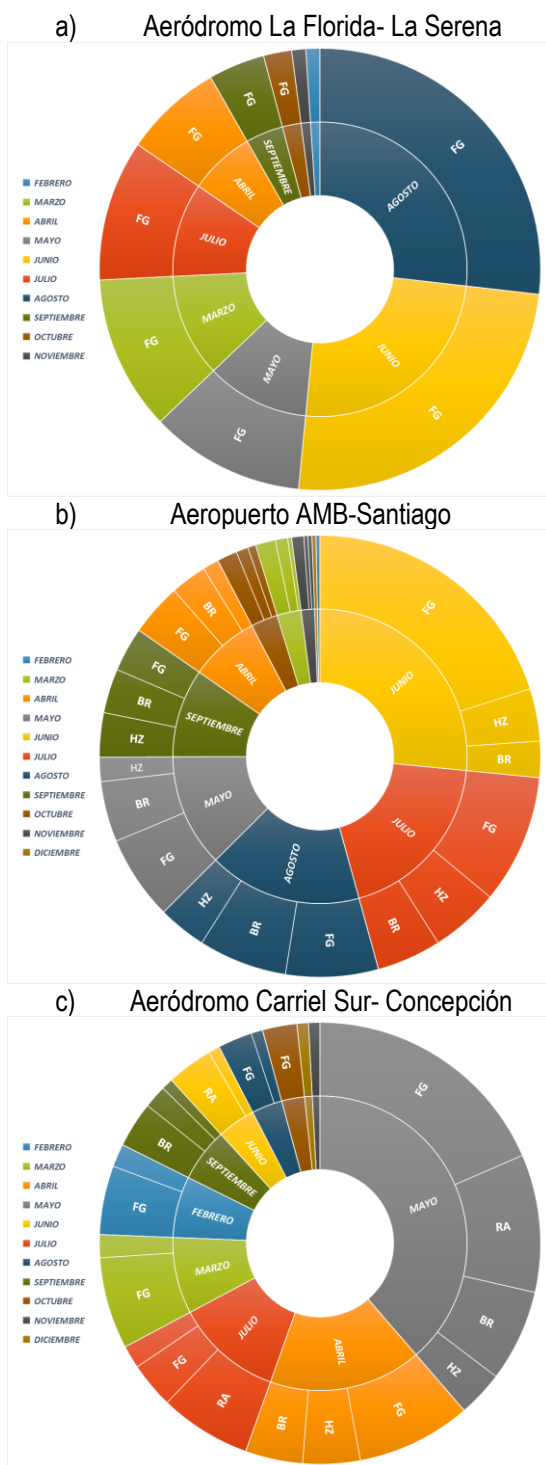


Figura 29: Resumen mensual en porcentaje (%) de las variables aeronáuticas que tienen mayor frecuencia en La Florida, AMB y Carriel Sur.

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 obtiene que, en La Florida, en el mes en que se cumple ambas restricciones con mayor frecuencia es en agosto seguido de junio, lo cual se atribuye en un 100% al fenómeno significativo de niebla. (Figura 29a).

Por su parte en AMB, durante junio se reportan más casos de visibilidad menor a 800 metros junto con techos de nubosidad menor a 200 pies, los cuales se asocian en su gran mayoría a la niebla y en menor medida a bruma y llovizna (Figura 29b). En Carriel Sur, durante los meses de otoño (mayo y abril), son más frecuentes los casos con restricción de visibilidad y techos de nubes bajos, los cuales se asocian a fenómenos de tiempo presente como la niebla, la neblina, bruma y durante mayo en algunos casos a lluvia (Figura 29c).

En resumen, en el aeropuerto y en los principales aeródromos del FIR Santiago, la operatividad por fenómenos meteorológicos se ve más afectada durante los meses de otoño e invierno, asociados principalmente a la niebla, la bruma y a lluvia.

5. DISCUSIÓN Y RESULTADOS

La topografía y el factor latitudinal juegan un rol fundamental en la distribución de las precipitaciones en cada localidad del FIR Santiago, en donde se registra una mayor cantidad de precipitación en estaciones costeras y ubicadas más al sur de la zona central, como es el caso de Concepción con un total anual de 985 (mm), sin embargo en estaciones como Vallenar y Pudahuel (que representan estaciones del valle-interior emplazadas más al norte) las precipitaciones disminuyen considerablemente con montos de 38 (mm) y 221 (mm), respectivamente. Desde el año 2010 se viene evidenciando un déficit en el régimen de precipitaciones en todas las estaciones de la zona, en el cual se destaca el año 2019 como el más seco de la última década. Este déficit también se manifiesta en los índices de eventos extremos, ya que son categóricos en manifestar la sequía que afecta al FIR Santiago, mostrando una disminución en los días lluviosos en todas las estaciones, los cuales además han sido menos intensos.

En cuanto a las temperaturas extremas; máxima y mínima se observa que desde el año 2012 han tenido un aumento sostenido respecto al promedio 1990-2019, en las estaciones del valle-interior del FIR Santiago, sin embargo, en la isla Juan Fernández, si bien las temperaturas extremas también han aumentado desde 2012, durante los dos últimos años 2018 y 2019 ambas temperaturas se han presentado más bajas que el promedio. Los eventos extremos de temperatura por su parte, como los días y noches cálidas muestran un aumento en gran parte de las estaciones del FIR Santiago, especialmente en Embalse Cogotí con un 7% por década. Por el contrario, los días fríos muestran una disminución, sobre todo en estaciones al norte y en el centro del FIR Santiago, como Ovalle y Valparaíso. Con respecto a temperaturas máximas sobre 25°C, se han hecho más frecuentes, principalmente en estaciones del valle-interior, lo mismo ocurre con las temperaturas

sobre 30°C, en donde las tendencias más altas se aprecian en la zona centro y sur del FIR Santiago con un aumento de 10 días por década en Santiago y Curicó.

La variable aeronáutica utilizada para medir el rendimiento de los aviones; altitud de densidad demuestra la influencia costera y latitudinal que existe en la temperatura máxima ya que, en La Serena y Concepción no supera los 2000 pies durante el verano, mientras que en Santiago sobrepasa los 3500 pies durante la misma época del año. Sin embargo, los tres coinciden en la tendencia positiva de la altitud de densidad entre 1990 y 2019, por lo cual sería de mucha importancia vigilar esta variable especialmente cuando se espera el aumento progresivo de los eventos de calor extremo en los próximos años.

El viento también ha sido una variable que ha aumentado en la última década en Santiago, del orden de 4 nudos, principalmente durante las tardes de los meses más cálidos. En Concepción, por el contrario, se ha observado una disminución de los vientos en la última década, la cual se hace más evidente en los meses de verano durante las tardes en que la intensidad es mayor que en el resto del año.

En cuanto a las observaciones proporcionadas por el reporte meteorológico METAR, se encontró que las operaciones podrían verse afectadas con mayor frecuencia durante agosto, producto de eventos de niebla que reducen la visibilidad a 800 metros en el aeródromo La Florida. En AMB por su parte, las restricciones se asocian a fenómenos de niebla, neblina y bruma, los cuales disminuyen la visibilidad con mayor frecuencia durante el invierno. Finalmente, en Carriel Sur, durante mayo se observan la mayor cantidad de restricciones por fenómenos meteorológicos los cuales se asocian principalmente a lluvia junto con niebla y neblina.

6. REFERENCIAS

- Burt, W., Enfield, D.B., Smith, R.L., Crew, H., 1973. The surface wind over an upwelling area near Pisco, Peru. *Boundary-Layer Meteorology* 3, 385–391.
- Coffel, E., Horton, R., (2015) "Climate Change and the Impact of extreme temperatures on aviation". Departamento Earth and Environmental Sciences, Columbia University, New York, USA.
- CR2 (2015), "Informe de la Megasequía 2010-2015" Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia, Universidad de Chile.
- Cruz C., J. Calderón (2008). "Guía Climática Práctica". Subdepartamento de Climatología y Meteorología Aplicada, Dirección Meteorológica de Chile (DMC).
- DMC (2008). "Climatología sinóptica para el sur de Chile". Subdepartamento de Climatología y Meteorología Aplicada, Dirección Meteorológica de Chile.
- Federal Aviation Administration, (2010). "Performance and Accountability Report". (FAA).
- Garreaud, R. and Rutllant J. (2006). Meteorological factors of the air pollution in Santiago (in Spanish). In *Critical episodes of air pollution in Santiago*, Chapter 2, Morales, R. (Ed.). Editorial Universitaria, pp. 36–53.
- Goodman, C., & Small Griswold, J., (2018). "Climate Impacts on Density Altitude and Aviation Operations". Atmospheric Sciences Department, University of Hawai'i at Mānoa, 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.
- Miller, A., 1976: The climate of Chile. *Climates of Central and South America*, W. Schwerdtfeger, Ed., World Survey of Climatology, Vol. 12, Elsevier Scientific, 113–145
- Ministerio Medio Ambiente: Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático 2017 - 2022. MMA (2017).
- Muñoz R. et al "Coastal Clouds at the Eastern Margin of the Southeast Pacific: Climatology and Trends" Departamento de Geofísica, Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Pizarro P., and Rondanelli R. "Frecuencia de neblina y nubosidad baja en el valle central de Chile" Tesis Postgrado en Meteorología y Climatología, Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Procedimientos Aeronáuticos DAP, 2008. "Evaluación de la Visibilidad y Alcance Visual en la Pista (RVR). Dirección General de Aeronáutica Civil.
- 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.
- QUINTANA, J. (2004). "Estudio de los factores que explican la variabilidad de la precipitación en Chile en escalas de tiempo interdecadal". Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias mención Geofísica. Universidad de Chile.
- Reglamentos Aeronáuticos DAR, (2017). "Operaciones de Aeronaves" DAR 08. Dirección General de Aeronáutica Civil.
- Weischet, W., 1970: Chile: Seine Länderkundliche Individualität und Struktur (Chile: Its Geographical Individuality and Structure). Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 618 pp.



DIRECCIÓN METEOROLÓGICA DE CHILE
Av. Portales 3450, Estación Central-Santiago
Contacto: [comunicacional dmc@meteochile.cl](mailto:comunicacional@dmc.meteochile.cl)
Teléfono +562-24364538 – Fax +562-24378212

