IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA AERONÁUTICA

RAPA NUI | JUAN FERNÁNDEZ

Dirección Meteorológica de Chile
Sección climatología
Oficina Cambio Climático

ÍNDICE

1. Introducción

2. Datos y metodología

2.1 - Delimitación geográfica
2.2 - Datos y métodos

3. Características climáticas de la zona

4. Análisis de las variables que afectan la navegación aérea

4.1 - Anomalías y tendencias de temperaturas extremas y precipitación
4.2 -Tendencia de los índices climáticos extremos que afectan la aeronáutica
4.3 - Altitud de densidad
4.4 - Viento
4.5 - Base de la altura de la nube
4.6 - Visibilidad
4.7 - Tiempo presente

5. Discusión y resultados

6. Referencias

INTRODUCCIÓN

Las condiciones meteorológicas juegan un papel crucial en la seguridad y eficiencia de la navegación aérea, especialmente en regiones aisladas como Rapa Nui y Juan Fernández, donde las características climáticas únicas presentan desafíos significativos. Estas islas, situadas en medio del Océano Pacífico, están sujetas a la influencia de patrones meteorológicos marinos, lo que las convierte en entornos complejos para la aviación.

Este informe tiene como objetivo analizar detalladamente las condiciones meteorológicas que impactan las operaciones aéreas en estas áreas. Se ha recopilado y analizado datos históricos desde 1990 hasta 2023, provenientes de las estaciones meteorológicas de Mataveri en Rapa Nui y La Punta en Juan Fernández, utilizando, principalmente, información proveniente de los reportes METAR.

El análisis aborda cómo los cambios en la temperatura, precipitación y las tendencias climáticas están afectando las operaciones aéreas en estas regiones. En particular, se examinan las tendencias de temperatura y la ocurrencia de eventos extremos de precipitación, junto con otros factores como la altitud de densidad y la intensidad del viento. El objetivo es entender como estos elementos influyen en la seguridad y la eficiencia de las operaciones aeronáuticas, proporcionando información valiosa para mejorar la toma de decisiones en la planificación y ejecución de vuelos.

DATOS Y METODOLOGÍA

DELIMITACIÓN GEOGRÁFICA

La estación de Mataveri, Rapa Nui se encuentra emplazada a los 27º 09' 53'' S, 109º 25' 19'' O a 3700 km al oeste de Chile continental. Juan Fernández 33º 39' 57'' S, 78º 55' 45'' W y a 670 km al oeste de la costa. El limite vertical inferior es tierra y/o agua y el superior el nivel de vuelo máximo permitido.

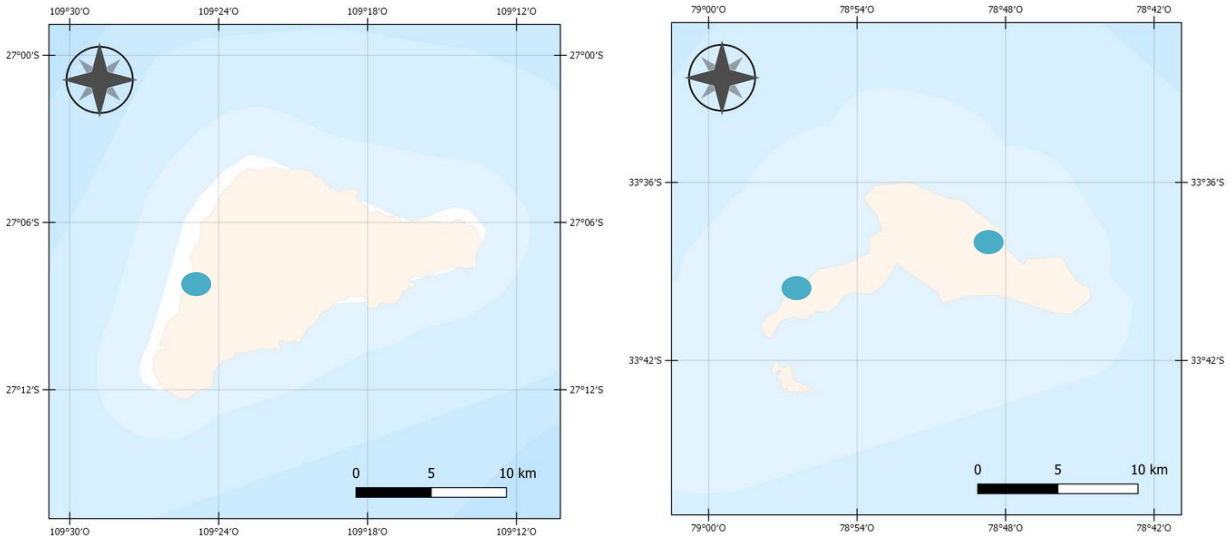

Figura 1: Distribución espacial de las estaciones de Mataveri – Rapa Nui y La Punta y Estación Meteorológica – Juan Fernández.

DATOS Y MÉTODOS

Las estaciones meteorológicas utilizadas en este estudio son: Mataveri Isla de Pascua Ap., La Punta, Juan Fernández Ad. y Juan Fernández, Estación Meteorológica, pertenecientes a la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) (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 2023. 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 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). Climatol entrega las series rellenadas, por lo tanto, se cuenta con todos los datos diarios durante el periodo de estudio.

La información aeronáutica de las variables visibilidad, tiempo presente y de tipo y altura de la base de la nube se obtuvieron del reporte meteorológico METAR (Meteorological Aerodrome Report) para el aeródromo de Mataveri en Rapa Nui y La Punta en Juan Fernández.

Finalmente, las tendencias lineales analizadas en todas las variables meteorológicas de este estudio fueron analizadas con modelos de regresión lineal y fueron evaluadas con el test T-Student para determinar su significancia estadística al nivel del 5% de confianza.

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

	LATITUD SUR	LATITUD OESTE	ALTITUD (M)	FUENTE
RAPA NUI	27°09'53"	109°25'19"	44	DMC
LA PUNTA, JUAN FERNÁNDEZ	33°39'57"	78°55'45"	126	DMC
ESTACIÓN METEOROLÓGICA, JUAN FERNÁNDEZ	33° 38' 8"	78° 49' 58"	40	DMC

CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS DE LA ZONA

La isla de Rapa Nui se caracteriza por un clima subtropical húmedo con una notable influencia marítima. Este clima presenta temperaturas moderadas durante todo el año y una distribución relativamente uniforme de las precipitaciones, aunque con una ligera disminución durante los meses de verano. Según la tabla 2, la precipitación anual promedio es de 1096.3 mm. Las temperaturas en Rapa Nui muestran un ciclo estacional menos marcado en

comparación con el continente. La temperatura media anual es de 20.9°C, con una temperatura mínima promedio de 17.8°C y una temperatura máxima promedio de 24°C. Este patrón refleja la estabilidad térmica aportada por la influencia marítima que rodea la isla.

La estación de Juan Fernández presenta un clima mediterráneo marítimo, influenciado significativamente por la corriente fría de Humboldt. Este clima se caracteriza por tener temperaturas moderadas y precipitaciones bien distribuidas a lo largo del año, con un aumento notable en los meses de invierno. La precipitación anual promedio en Juan Fernández es de aproximadamente 966.3 mm, concentrándose principalmente en los meses de mayo a agosto, como se observa en la figura 2. Las temperaturas en Juan Fernández también muestran un ciclo estacional, aunque más atenuado que en el continente. La temperatura mínima promedio es de 13.1°C, mientras que la temperatura máxima promedio es de 17.9°C. Este patrón es consistente con la influencia oceánica que modera las variaciones térmicas extremas, proporcionando un clima templado y húmedo durante todo el año.

Tabla 2: Temperatura y precipitación media entre 1990-2023 para las estaciones meteorológicas del estudio.

	TEMPERATURA MÁXIMA (°C)	TEMPERATURA MEDIA (°C)	TEMPERATURA MÍNIMA (°C)	PRECIPITACIÓN (MM)
RAPA NUI	24.0	20.9	17.8	1096.3
JUAN FERNÁNDEZ	17.9	15.5	13.1	966.3

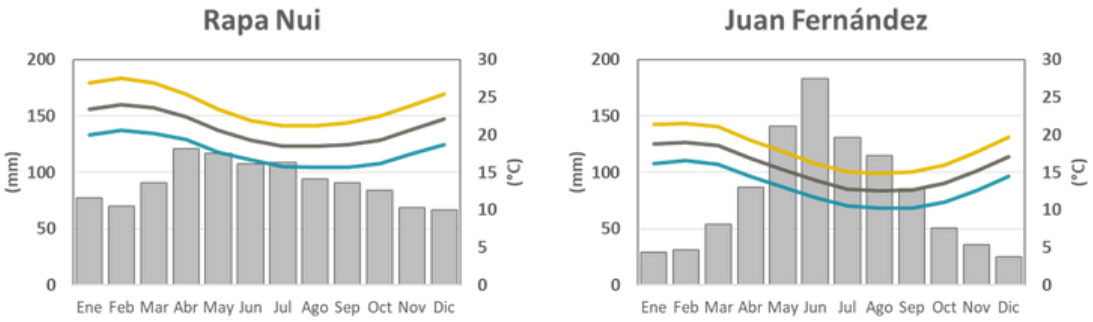

Figura 2: Climogramas de las estaciones utilizadas. Barras grises indican precipitación, línea amarilla temperatura máxima, línea calipso temperatura mínima y línea gris oscuro temperatura media entre 1990 y 2023.

ANÁLISIS DE LAS VARIABLES QUE AFECTAN LA NAVEGACIÓN AÉREA

Recientes investigaciones han demostrado que el incremento de las temperaturas a nivel del suelo puede afectar las operaciones aéreas. Este fenómeno genera una reducción en la densidad del aire, lo que disminuye la fuerza de sustentación en las alas de las aeronaves en el despegue. Además, el cambio climático ha provocado un aumento en el nivel medio del mar, amenazando a los aeropuertos situados en zonas costeras y de baja altitud (Puempel y Williams, 2016). Variables como la precipitación, visibilidad, velocidad y dirección del viento, condiciones de hielo y la altitud de densidad también pueden tener un impacto en las operaciones de vuelo y en la seguridad de las aeronaves, por lo tanto, se realizará un análisis de estas variables y se estudiarán sus tendencias.

Las condiciones meteorológicas dentro de estas áreas pueden afectar las operaciones aéreas debido a cambios en los patrones de circulación atmosférica, influenciados por el Anticiclón del Pacífico. Este sistema de alta presión produce variaciones en variables climáticas como nubosidad, temperatura, viento y precipitación. La presencia constante del océano alrededor de Rapa Nui y Juan Fernández también contribuye a la variabilidad climática, ya que el mar modera las temperaturas, pero puede aumentar la humedad y la formación de nubosidad.

Una de las herramientas clave para monitorear estos cambios meteorológicos son los reportes METAR, que se emiten rutinariamente en cada aeródromo o aeropuerto para garantizar la seguridad en las operaciones aéreas. Los reportes METAR se actualizan cada hora e incluyen información específica sobre el viento, temperatura, visibilidad, altura de la base de las nubes y fenómenos meteorológicos en el instante de la observación. Esta información es vital para adaptarse a las condiciones dinámicas impuestas por la interacción entre el océano y el Anticiclón del Pacífico.

ANOMALÍAS Y TENDENCIAS DE TEMPERATURAS EXTREMAS Y PRECIPITACIÓN

Al analizar el comportamiento de las temperaturas extremas en la estación de Rapa Nui se puede observar que, la temperatura máxima muestra periodos de anomalías positivas y negativas, sin embargo, desde el año 2017 se observó un aumento con respecto al promedio climatológico, a excepción del año 2020 y 2023. Mientras que Juan Fernández muestra anomalías negativas durante los últimos años (Figura 3). En cuanto a la temperatura mínima, se observa que, en ambas estaciones ha ido disminuyendo la temperatura desde el año 2019 aproximadamente (Figura 4).

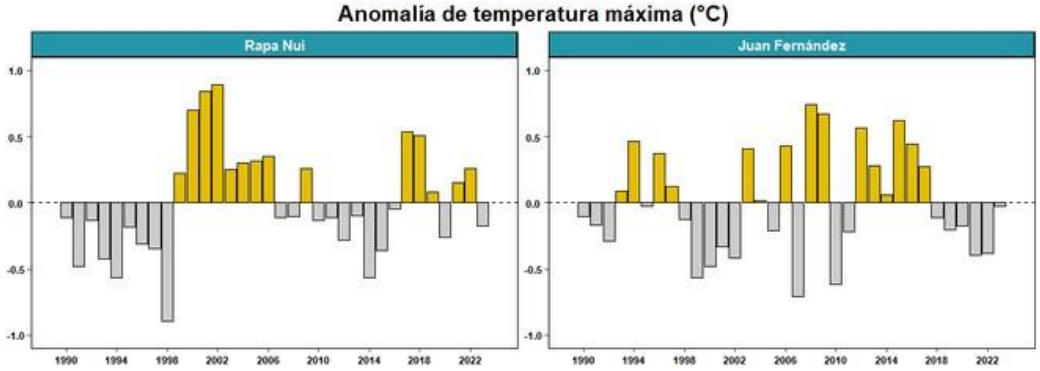

Figura 4: Anomalías de temperatura máxima (°C) desde el año 1990 al 2023, calculado en base al período climatológico 1990.2010, para las estaciones de Rapa Nui y Juan Fernández.

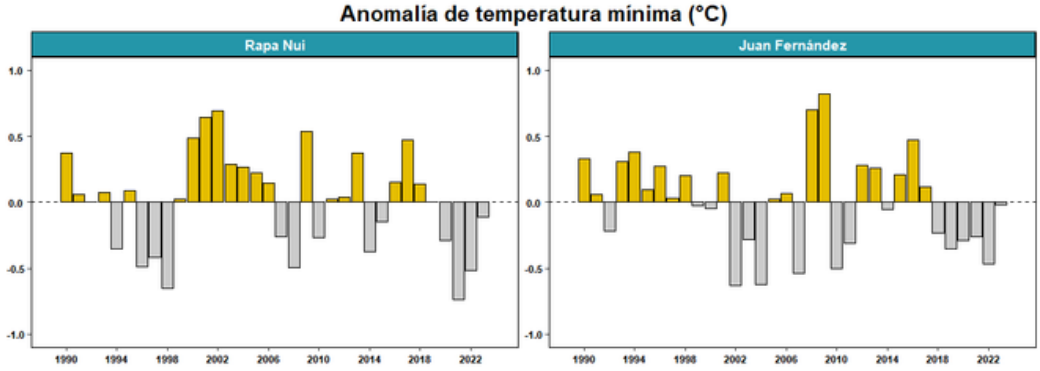

Figura 3: Anomalías de temperatura mínima (°C) desde el año 1990 al 2023, calculado en base al período climatológico 1990-2010, para las estaciones de Rapa Nui y Juan Fernández.

En la región del sureste del Pacífico las precipitaciones están influenciadas por El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) (Mann et al. 2008; Stenseth and Voje 2009), cambios en los vientos alisios y la celda de Walker (Bridgman 1983;

McCall 1993), cambios en el anticiclón del Pacífico sur, cambios en la zona de convergencia del Pacifico sur (SPCZ) y cambios en la fuerza y posición latitudinal de la trayectoria del cinturón de vientos del oeste (Sáez et al. 2009; Cañellas-Boltà et al. 2013).

La mega-sequia que se ha venido desarrollando en gran parte del país (CR2, 2015) también se observa en las anomalías de precipitación de Rapa Nui y Juan Fernández, mostrando un déficit en ambas estaciones desde el año 2010 en adelante, con una tendencia de -16.6% en Rapa Nui, la cual es estadísticamente significativa con un valor p de 0.0002344. Mientras que en Juan Fernández la tendencia observada fue de -4.46%, aunque, el valor de p asociado fue de 0.1759, por lo tanto, no es estadísticamente significativa (Figura 5).

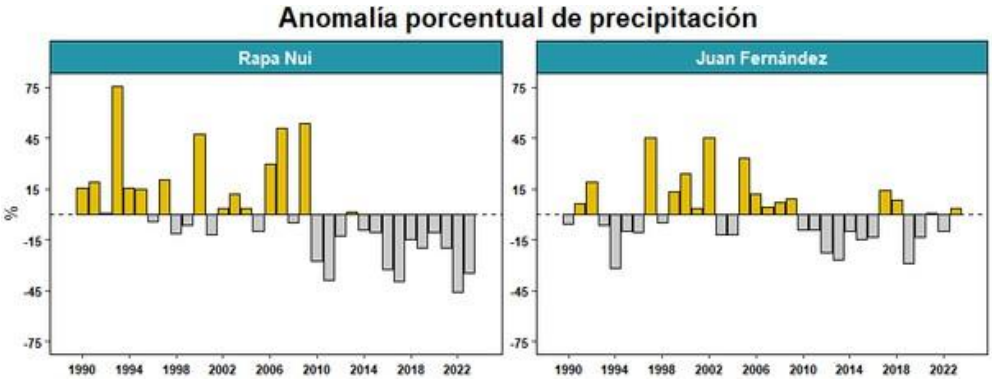

Figura 5: Anomalías de precipitación (mm) desde el año 1990 al 2023, en base al período 1990-2010, para la estación de Rapa Nui y Juan Fernández.

Con respecto a las tendencias de temperaturas extremas, la temperatura máxima muestra un ligero aumento, sobre todo en la estación de Rapa Nui que ha aumentado a razón de 0.1 °C por década. Mientras que la temperatura mínima se observan tendencias negativas que no superan los -0.1 °C en ambas estaciones (Figura 6).

Al analizar las tendencias estacionales se observa que en la temperatura máxima ambas estaciones muestran una gran tendencia, sin embargo, Rapa Nui muestra una tendencia positiva más marcada en la estación de otoño, mientras que la temperatura mínima destaca por leves tendencias negativas en la estación de invierno y primavera en Rapa Nui y primavera y verano en Juan Fernández (Figura 7).

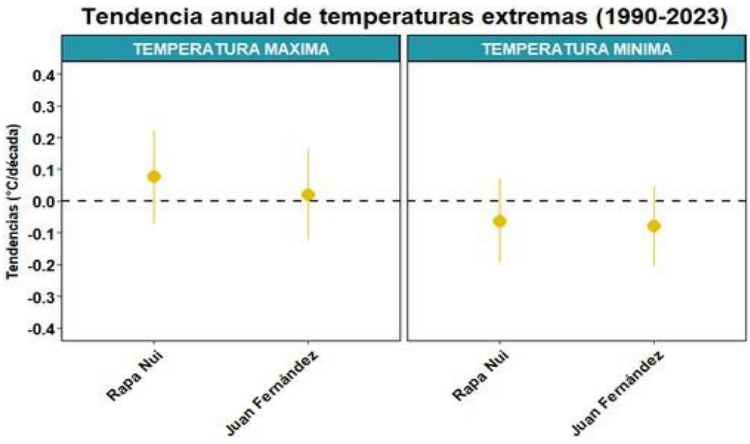

Figura 6: Tendencia anual de las temperaturas extremas (°C/década) en el período 1990-2023 para las estaciones de Rapa Nui y Juan Fernández. Las barras indican intervalos de confianza al 95%.

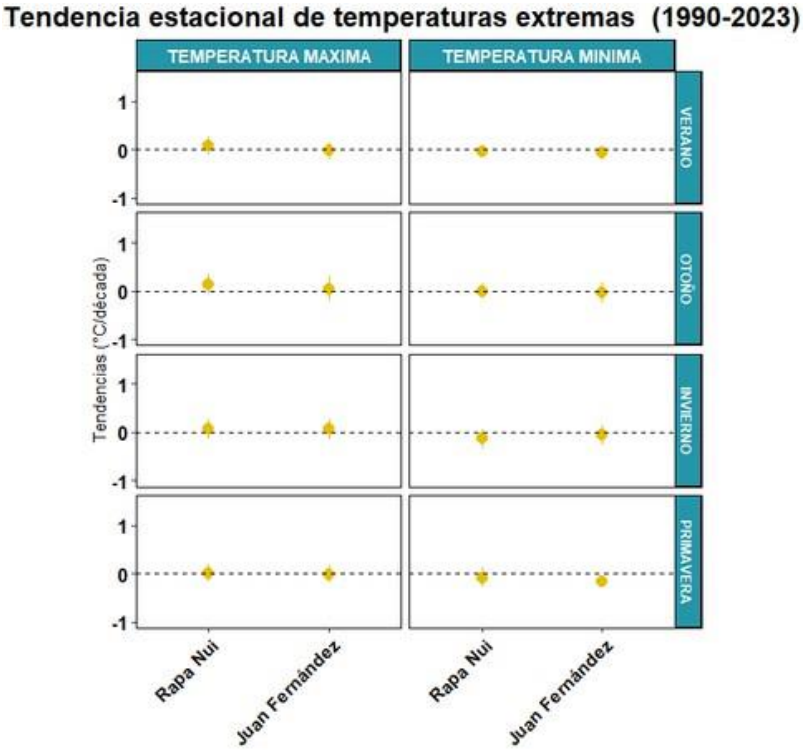

Figura 7: Tendencia estacional de temperaturas extremas (°C/década) en el período 1990-2023 para las estaciones de Rapa Nui y Juan Fernández. Las barras indican intervalos de confianza al 95%.

En la última década, una sequía severa ha impactado varias partes del país, generando numerosos impactos ambientales y socioeconómicos, como el agotamiento de las reservas de agua, el aumento del riesgo de incendios forestales y efectos negativos en la agricultura.

Las regiones insulares no han sido inmunes a estas condiciones, en donde, las tendencias anuales de precipitación confirman lo anterior, mostrando tendencias negativas en Rapa Nui de -182 mm (valor de p: 0.0002344, por lo que la tendencia es estadísticamente significativa) por década y de -43 mm por década en Juan Fernández (valor de p: 0.1759, por lo que la tendencia no es estadísticamente significativa) (Figura 8).

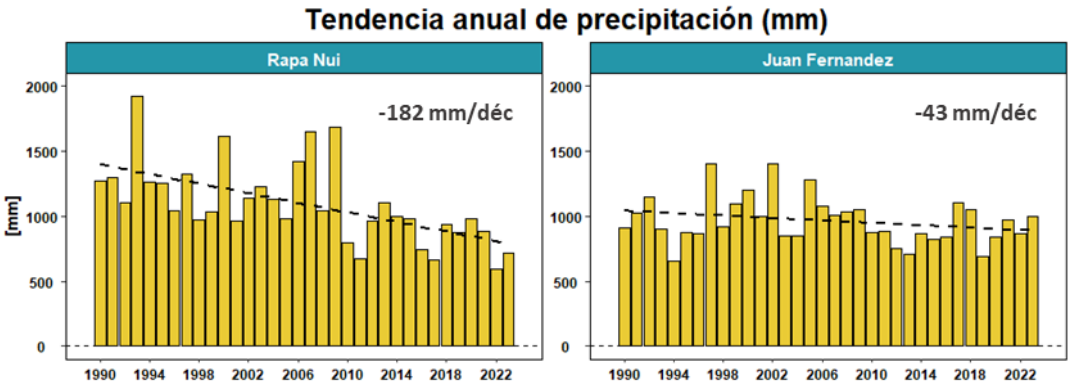

Figura 8: Tendencia anual de la precipitación (mm) en el período 1990-2023, para la estación de Rapa Nui y Juan Fernández.

TENDENCIA DE LOS ÍNDICES CLIMÁTICOS EXTREMOS QUE AFECTAN LA AERONÁUTICA

Los índices de eventos extremos de cambio climático se refieren a una serie de indicadores que se utilizan para evaluar, comparar y medir eventos climáticos extremos o anómalos que están relacionados con el cambio climático. Se basan en percentiles, umbrales y duración, y permiten ver los cambios en la frecuencia, intensidad y duración de estos eventos (Karl et al., 1999). En el Anexo 1 se describe cada índice.

El análisis de las tendencias observadas en los índices climáticos de temperatura y precipitación para Rapa Nui y Juan Fernández revela patrones significativos en ambas localidades. En cuanto a la temperatura (Figura 9), Rapa Nui muestra un incremento en la duración de los períodos cálidos con un aumento de 0.7 días consecutivos sobre 25°C (CSD) por década, aunque la frecuencia de días extremadamente cálidos (SU30) y olas de calor (OC) disminuye a razón de 0.4 días por década y 1.2 eventos por década, respectivamente. Por otro lado, Juan Fernández no muestra cambios significativos en los períodos cálidos, registrando también una reducción de 1.2 eventos por década en las olas de calor. Ambos lugares experimentan una disminución en los días cálidos y un aumento en las noches cálidas, indicando una tendencia hacia un clima más cálido durante las noches. Sin embargo, las noches frías y los días fríos muestran un comportamiento mixto, con Rapa Nui presentando una ligera disminución, de 0.2% por década, y Juan Fernández un aumento en días fríos de 0.6% por década. También destacan los días con temperatura máxima sobre el percentil 50 (TXgt50p), donde en Rapa Nui disminuyen en 0.7% por década, mientras que en Juan Fernández lo hace en un 2% por década.

En términos de precipitación (Figura10), ambas localidades experimentan una disminución en la cantidad total anual, con Rapa Nui observado una reducción de 27.1 mm/década en precipitaciones sobre 10 mm (PRCP10TOT) y 25 mm/década en la precipitación total anual (PRCPTOT), mientras que Juan Fernández presenta disminuciones de 12.4 mm/década y 22.3 mm/década, respectivamente. Sin embargo, la cantidad máxima de precipitación en un día (Rx1day) y durante cinco días consecutivos (Rx5day) aumenta en ambas estaciones, con Rapa Nui mostrando incrementos de 2mm/década y 1.1 mm/década, y Juan Fernández de 1.7 mm/década y 1.3 mm/década, respectivamente.

Por lo tanto, Rapa Nui y Juan Fernández están experimentando cambios climáticos que incluyen un aumento en la intensidad y variabilidad de los eventos extremos, junto con una tendencia general hacia temperaturas nocturnas más cálidas y una reducción en la cantidad total de precipitación anual.

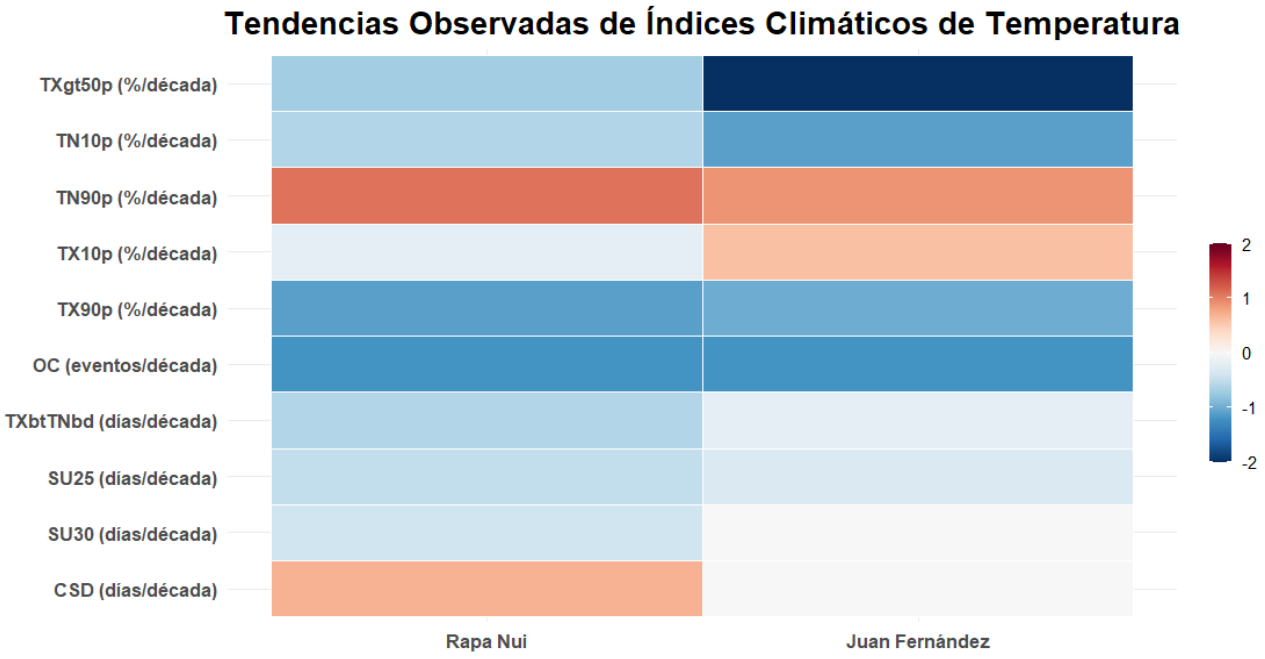

Figura 9: Tendencias de índices climáticos de temperatura, en las estaciones de Rapa Nui y Juan Fernández. Tendencias negativas en azul y positivas en rojo.

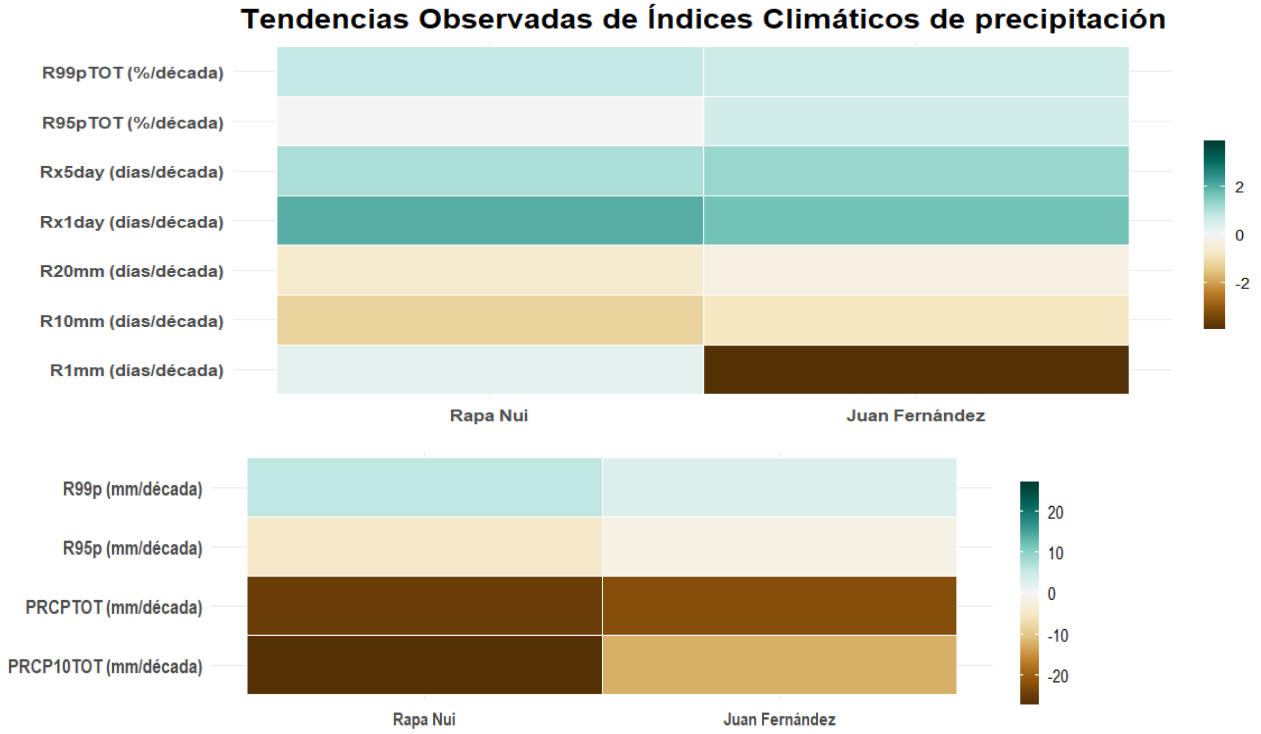

Figura 10: Tendencias de índices climáticos de precipitación, en las estaciones de Rapa Nui y Juan Fernández. Tendencias negativas en café y positivas en calipso.

TENDENCIA DE PRECIPITACIÓN EXTREMA

El análisis de los eventos de precipitación extrema da cuenta de una disminución en la frecuencia de extremos de precipitación tanto para el umbral de 10 mm como para el de 20 mm en un periodo de 6 horas. Para los eventos con precipitación sobre 10 mm o más en 6 horas, se observa una disminución significativa en su frecuencia, en donde, en promedio se registran -3.87 eventos menos por década, con un valor p de 0.001641. En cuanto a los eventos con precipitaciones sobre 20 mm o más en 6 horas, también se evidencia una tendencia decreciente, aunque menos pronunciada, de -1.65 eventos por década, con un valor p de 0.01203, indicando una significancia estadística considerable (Figura 11).

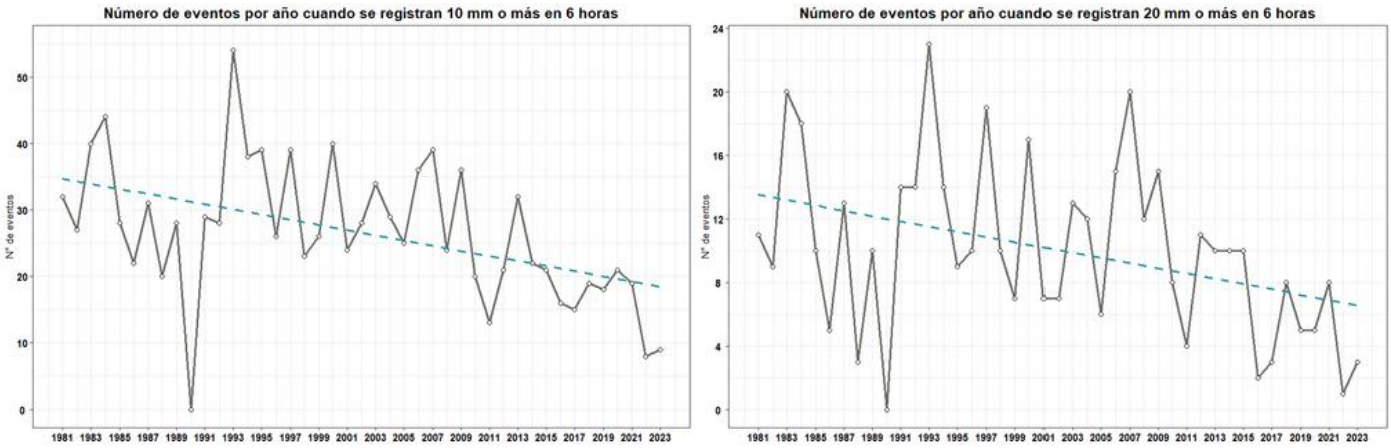

Figura 11: Número de eventos por año cuando se registran 10 mm o más en 6 horas y 20 mm o más en 6 horas (línea gris oscuro) y sus respectivas tendencias (línea segmentada calipso).

El análisis estacional da cuenta que, para los eventos de 10 mm o más en 6 horas todas las estaciones del año muestran tendencias negativas, sin embargo, la tendencia más pronunciada y estadísticamente significativa se produce en invierno, con valores de -1.5 eventos/década (con un valor p de 0.0047) (Figura 12). En los eventos extremos de 20 mm o más en 6 horas (Figura 13) se observa la misma tendencia decreciente acentuada en la estación de invierno con un valor de -0.6 eventos/década (con un valor p de 0.042). Tanto para los eventos de 10 mm como para los de 20 mm o más las tendencias en otras estaciones del año no son significativas, lo que indican la variabilidad estacional que presentan estos eventos extremos.

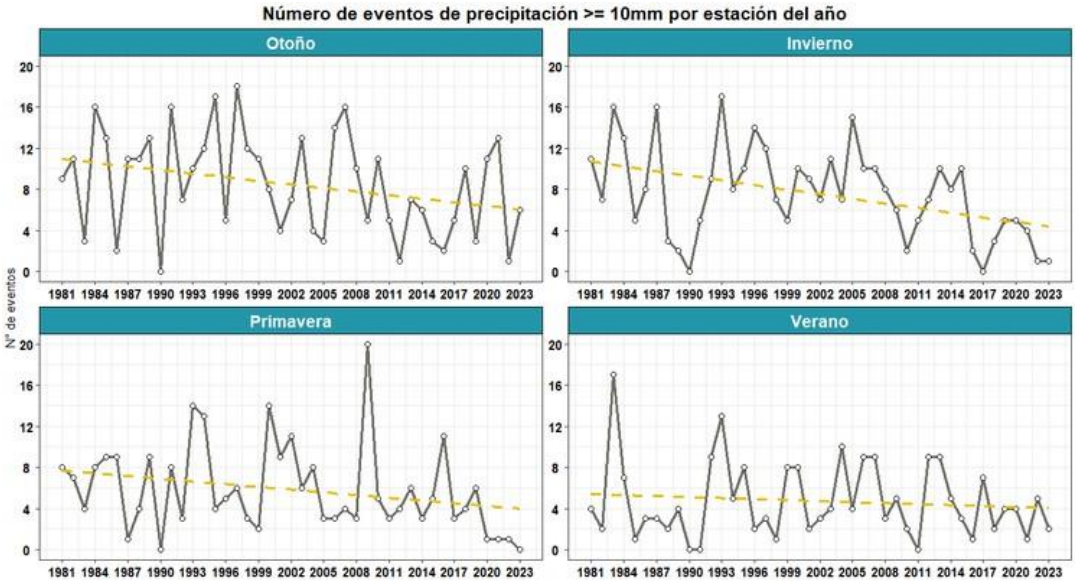

Figura 12: Número de eventos por año cuando se registran 10 mm o más en 6 horas por estación del año (línea gris oscuro) y su respectiva tendencia (línea segmentada amarilla).

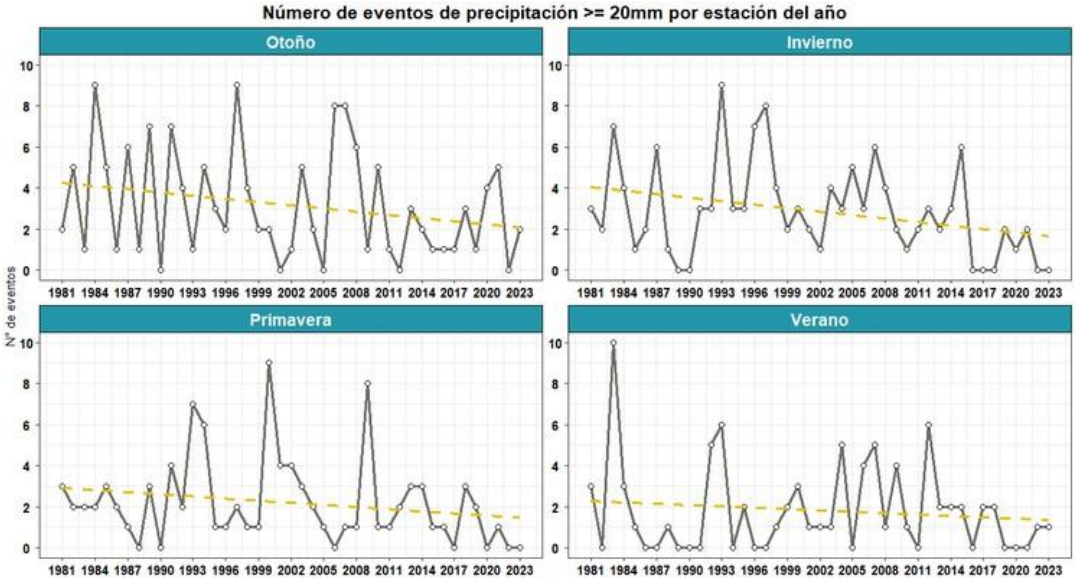

Figura 13: Número de eventos por año cuando de registran 20 mm o más en 6 horas por estación del año (línea gris oscuro) y su respectiva tendencia (línea segmentada amarilla).

ALTITUD DE DENSIDAD

La altitud de densidad (DA) es un concepto utilizado en aeronáutica relacionado con el rendimiento de los aviones, especialmente en términos de potencia del motor y rendimiento aerodinámico. 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]. Cuando la densidad del aire es baja, la altitud de densidad aumenta, afectando en el rendimiento del avión, en donde las alas generan menos sustentación, afectando la capacidad de elevación del avión.

La DA varía con las condiciones meteorológicas y puede cambiar con las horas del día, la estación del año o incluso a lo largo de los años, por lo que esta evaluación se realiza durante los meses más cálidos (diciembre, enero y febrero) desde el año 1990 hasta el 2023, en los aeródromos de Mataveri en Rapa Nui y La Punta en Juan Fernández, 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) $PA = (P_0 - P_{ALT}) * 1000 + H_{AEROPUERTO}$
(1b) $DA = PA + 120(T - T_S)$

Donde PA es la altitud de presión, P_0 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 observvada en °C, $T_S = T_0 - 0.002 * H_{AEROPUERTO}$ y T_0 = 15°C (atmósfera estándar).

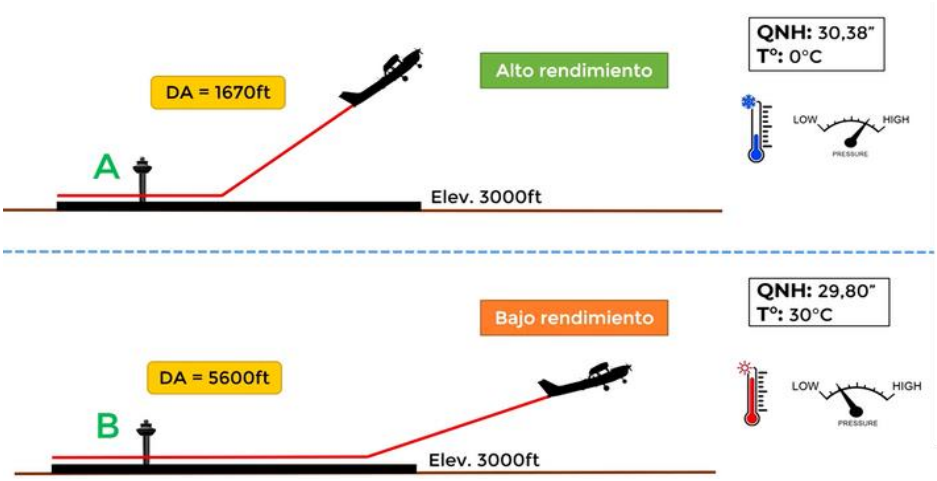

Figura 14: Figura explicativa de la altitud de densidad y su efecto en el rendimiento en los aviones.

Al analizar la altitud de densidad en el aeródromo de La Punta en Juan Fernández se observa una tendencia negativa de -91 pies/década, destacando el año 2023 como el valor más bajo de DA con 919.3 pies. Cabe destacar que el periodo de tiempo analizado en este aeródromo es acotado (desde el año 2014 al 2023), y es por esto que muestra una tendencia tan abrupta. En cuanto al aeródromo de Mataveri en Rapa Nui se observa una tendencia negativa de -5.5 pies/década con un valor p de 0.65, mostrando una leve disminución de la DA, aunque no estadísticamente significativa (Figura 15).

La combinación de altitud de los aeródromos y la temperatura local determina la altitud de densidad en ese momento y lugar específicos, por lo que se consideran factores relevantes en el cálculo de esta variable, ya que, al ser islas, la temperatura se ve fuertemente regulada por el mar, permitiendo que los valores de DA sean más bajos.

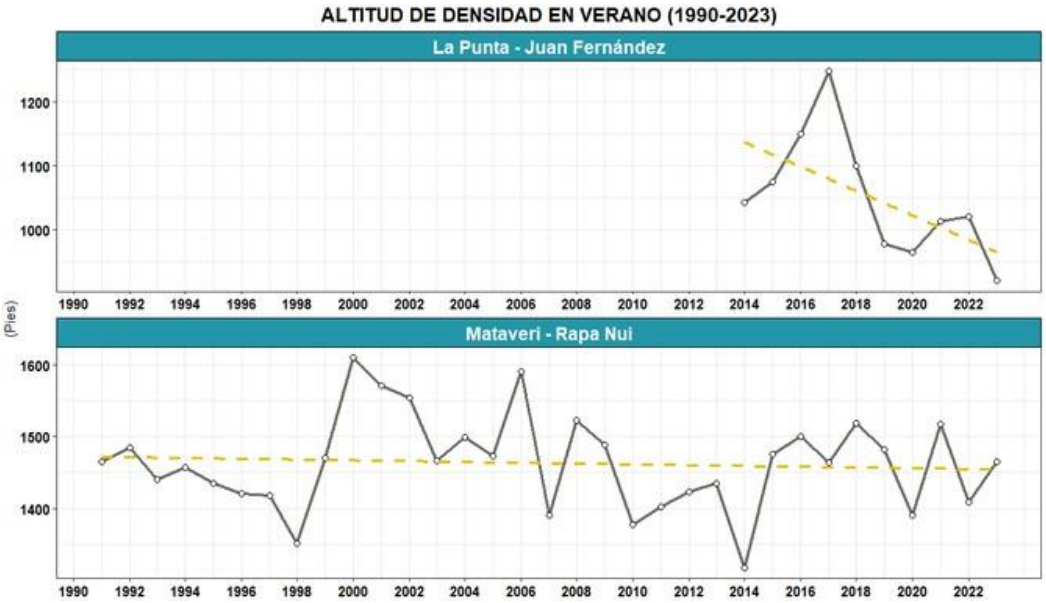

Figura 15: Altitud de densidad en pies (línea gris oscuro) y su respectiva tendencia (línea segmentada amarilla), durante los meses de verano (diciembre, enero y febrero), desde 1990 a 2023.

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, se separó la información en dos períodos decadales; 1990-1999 y 2014-2023 para el aeródromo Mataveri, Rapa Nui, en La Punta, Juan Fernández no se realizó este análisis debido a que la estación solo contaba con datos de viento desde el año 2014. Además, se realizó una representación del ciclo diario y anual de la intensidad del viento y se calculó el promedio estacional de la dirección e intensidad del viento en ambos aeródromos.

En Mataveri se observa un ciclo marcado, donde la intensidad del viento aumenta hasta los 12 nudos en los meses más cálidos de verano y en horas de la tarde, y disminuye a 5 nudos en horas de la madrugada en los meses de verano y otoño (Figura 16a). En cuanto al aeródromo La Punta, no se registran datos de viento desde las 0 hasta las 10 horas, sin embargo, al igual que en Mataveri, se observa un aumento en la intensidad del viento en los meses más cálidos (enero y febrero) y durante la tarde y la noche (Figura 16b).

Con respecto a la variación de la intensidad del viento en la última década, se aprecia que en Mataveri no ha cambiado significativamente, a excepción de algunos meses como septiembre, octubre, noviembre y diciembre en horas de la tarde, donde se aprecia un leve aumento en la intensidad de 1 a 2 nudos. Destaca también el mes de marzo donde además del aumento de la intensidad del viento en horas de la tarde, también se aprecia en horas de la madrugada, con un aumento de 1 a 2 nudos (Figura 17).

Por otro lado, la rosa de los vientos de la Figura 18 muestra que en Mataveri, en todas las estaciones del año predominan los vientos del este y del estesudeste con intensidades inferiores a los 20 nudos, sin embargo, en invierno también se presentan vientos de componente noroeste. En La Punta en las estaciones de otoño, primavera y verano predominan vientos de componente sureste con intensidades de hasta 35 nudos, mientras que, en invierno, además de la componente sureste, también se presentan vientos del noroeste, también con intensidades máximas de 35 nudos.

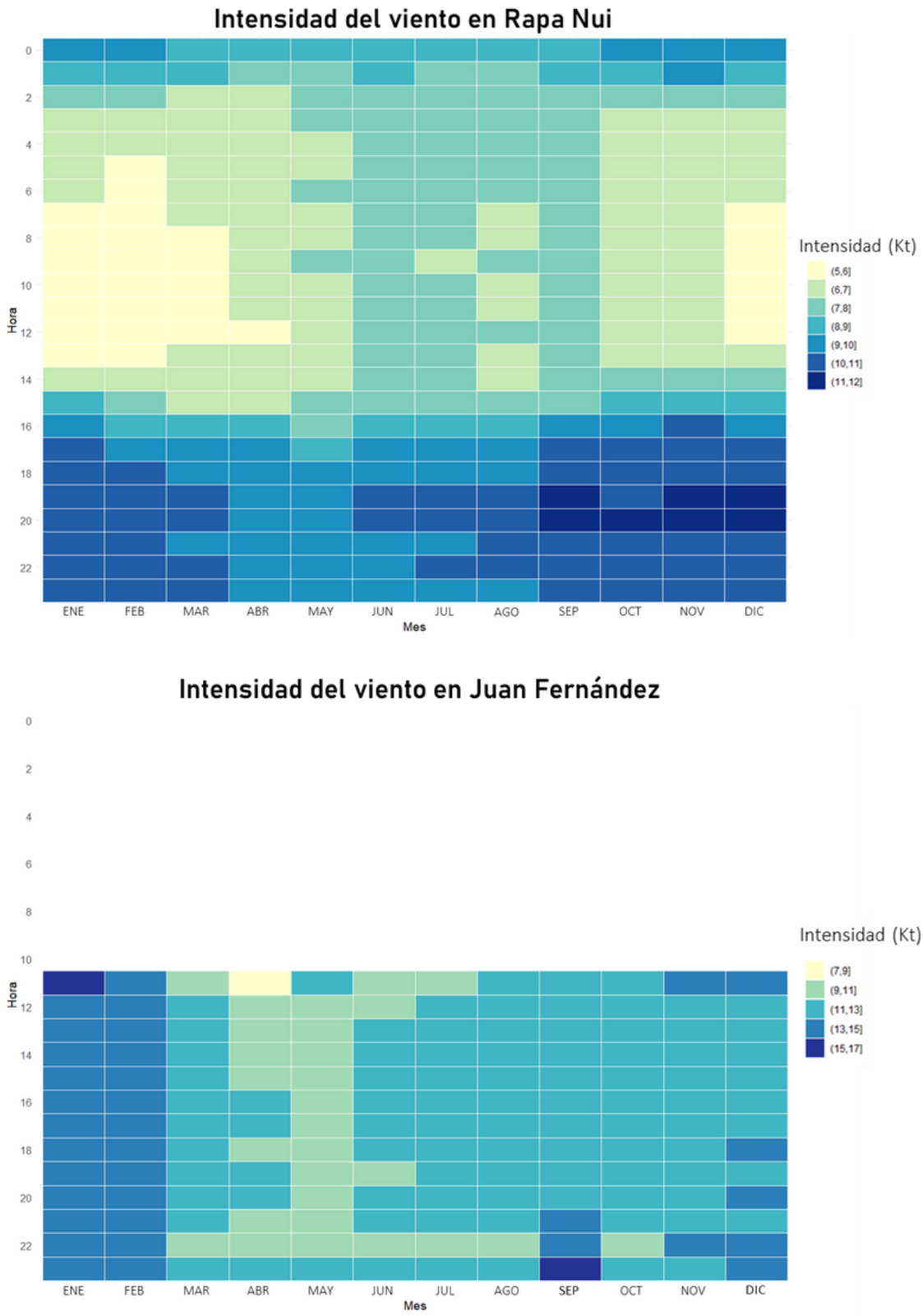

Figura 16: Ciclo anual y horario (UTC) de la intensidad del viento en nudos para a) Mataveri – Rapa Nui (1990-2023) y b) La Punta – Juan Fernández (2014-2023).

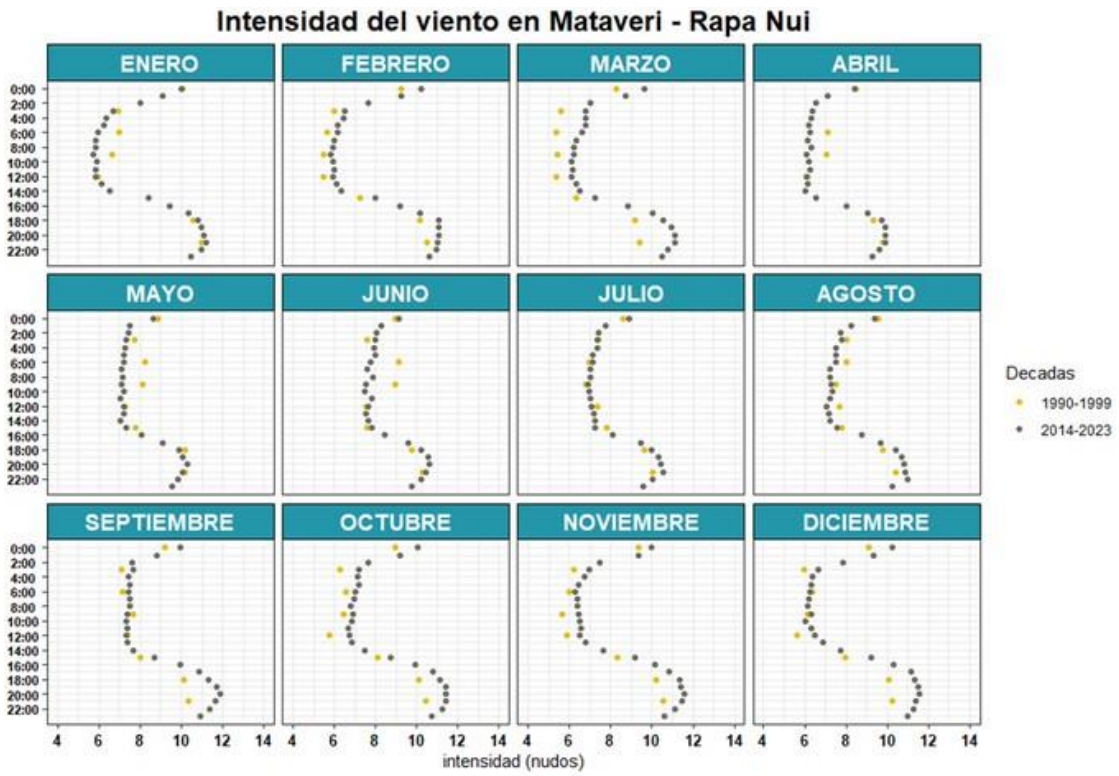

Figura 18: Comparación de la intensidad horaria del viento entre las décadas 1990-1999 (puntos amarillos) y 2014-2023 (puntos negros) para Mataveri – Rapa Nui.

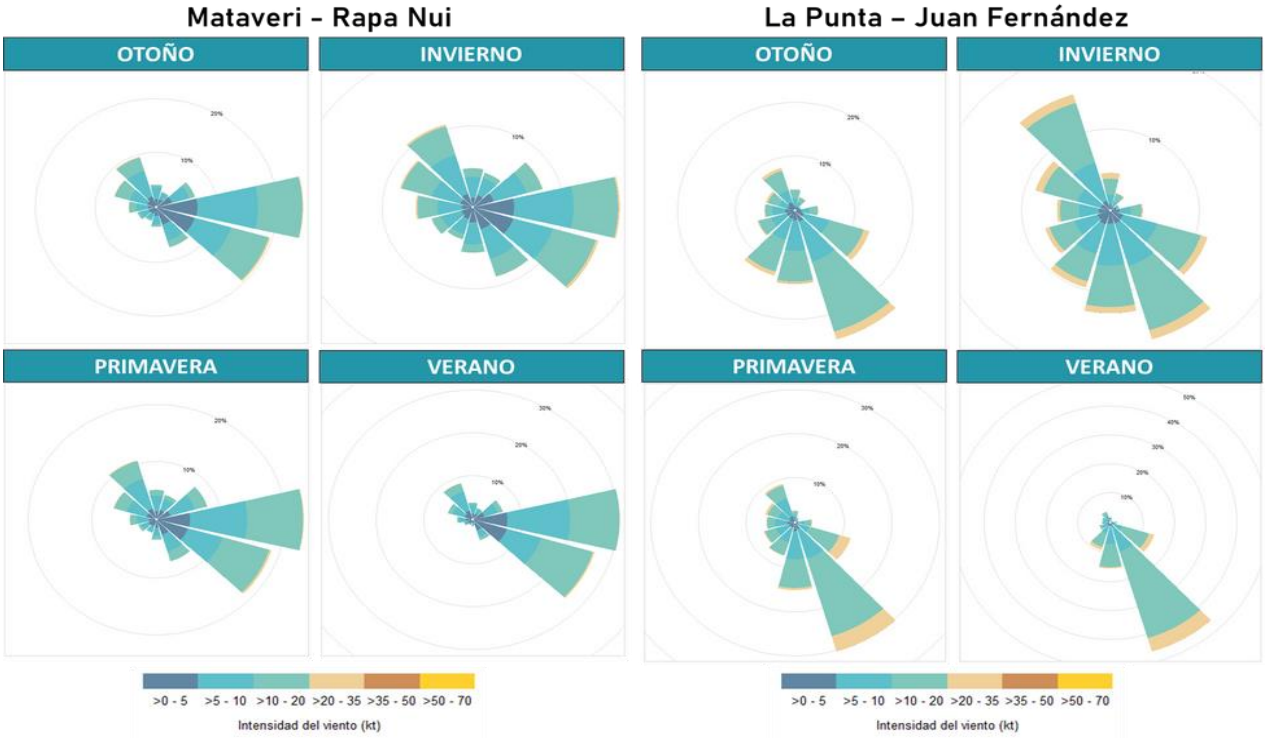

Figura 17: Promedio estacional de la dirección e intensidad del viento en Mataveri – Rapa Nui (1990-2023) y La Punta – Juan Fernández (2014-2023).

BASE DE LA ALTURA DE LA NUBE

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 aeródromo Mataveri y La Punta (Figura 19).

En el aeródromo Mataveri predomina la nubosidad tipo cúmulo (CU) en un 95%, seguidos por estratocúmulos (SC) con un 4% y estratos (ST) con 1%. Mientras que en La Punta es más frecuente la nubosidad estratocúmulos con un 61%, seguida por cúmulos (26%) y estratos (13%) (Figura 19). La diferencia del tipo de nubes más frecuentes está relacionada al Anticiclón Subtropical del Pacífico Sur (ASPS) y a la ubicación geográfica en la cual se encuentran las dos islas, ya que, Rapa Nui queda al oeste del ASPS y Juan Fernández al este (Ancapichún, S., & Garcés-Vargas, J., 2015), en donde la inversión de subsidencia asociada al ASPS, aumenta en altura hacia el oeste con una capa límite marina relativamente estable al este de los 93°O, donde predomina la nubosidad tipo estratocúmulos y relativamente inestable al oeste con nubosidad mayormente del tipo cúmulos (Carrasco, J. F., & Quintana, J. (2007).

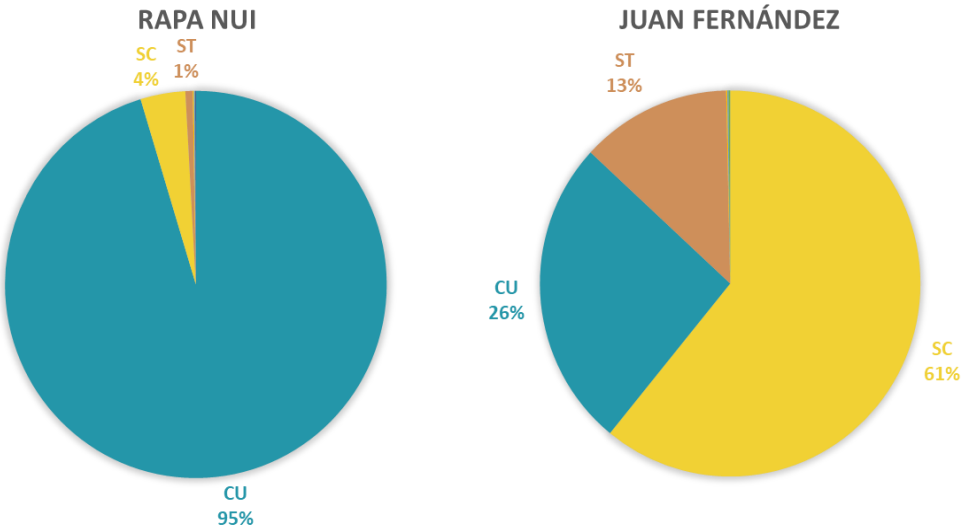

Figura 19: Frecuencia del tipo de nubosidad bajo los 5000 pies en Mataveri – Rapa Nui y La Punta – Juan Fernández.

En cuanto al comportamiento mensual del tipo de nubosidad (Figura 20), en el aeródromo Mataveri predominan en todos los meses del año la nubosidad tipo cúmulo en más de un 90%, siendo aún más frecuente en los meses más cálidos desde diciembre a marzo, aun que en invierno comienzan a

ser un poco más frecuentes los estratocúmulos. En La Punta la nubosidad se muestra más uniforme a través del año siendo más frecuentes los estratocúmulos sobre todo en los meses de verano en casi un 60%.

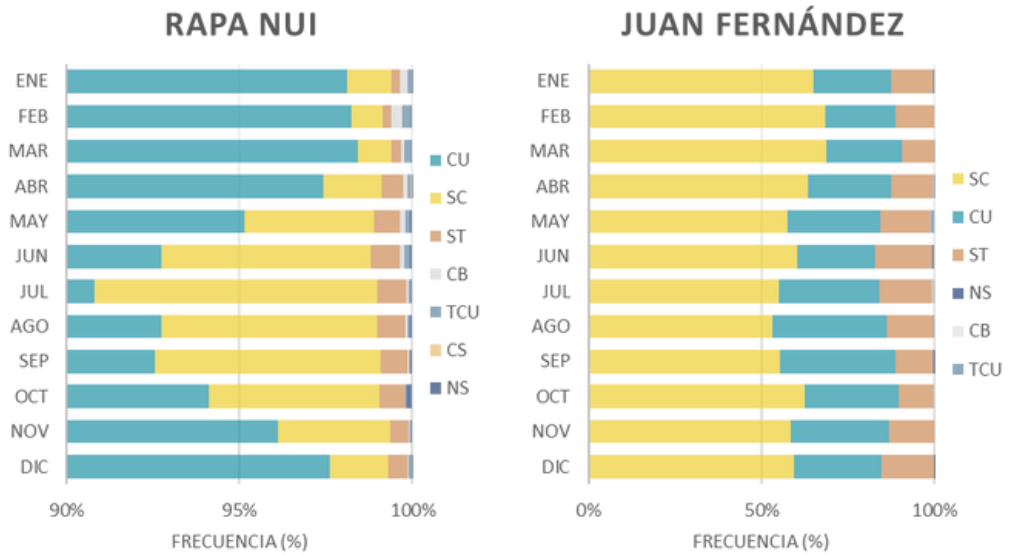

Figura 20: Frecuencia del tipo de nubosidad bajo los 5000 pies por mes en Mataveri – Rapa Nui y La Punta – Juan Fernández.

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 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]. Por lo tanto, la figura 21 muestra las observaciones con la altura de la base de la nube menor a 200 pies, donde, en Mataveri solo existían 85 observaciones con esta restricción desde 1981 al 2023, y se concentraban mayoritariamente en el mes de septiembre, octubre y diciembre con un 28%, 13% y 14%, respectivamente, mostrando una tendencia ligeramente positiva de 0.4 número de obs/década, aunque con un valor de p de 0.41, por lo que no sería significativa. En La Punta (Figura 22) se registraron 228 observaciones desde el año 2014 al 2023 y fueron más frecuentes en los meses de abril, julio y agosto con un 16, 18, 20%, respectivamente, con una tendencia negativa de -23.5 obs/década y un valor p de 0.26, por lo que el valor de la tendencia tampoco sería significativo.

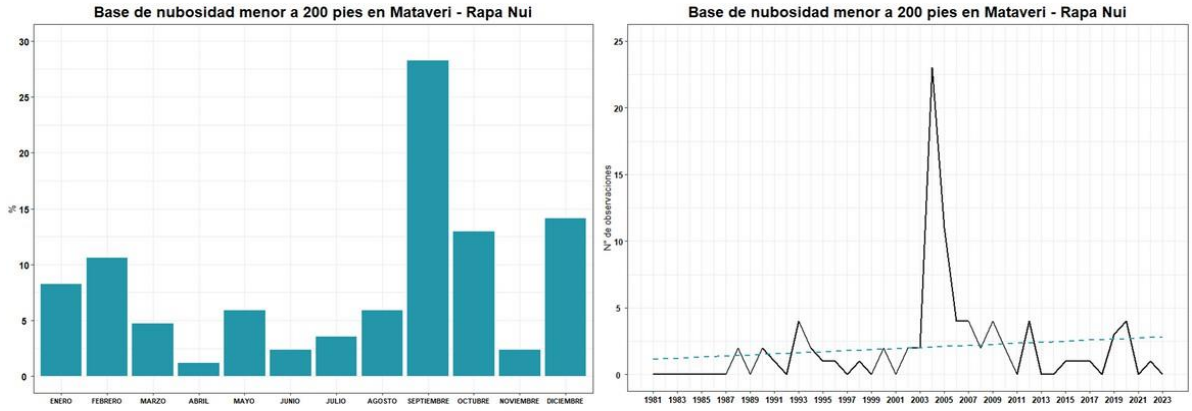

Figura 21: Porcentaje de observaciones (%) con base de la nubosidad menor a 200 pies (panel izquierdo) y número de observaciones con base de nubosidad menor a 200 pies (panel derecho) en línea negra en Mataveri – Rapa Nui. Tendencia en línea punteada celeste.

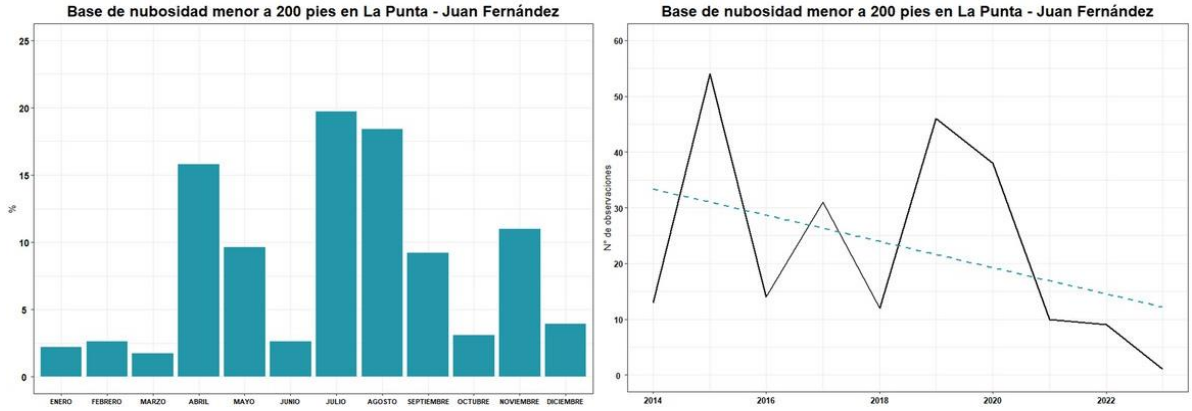

Figura 22: Porcentaje de observaciones (%) con base de la nubosidad menor a 200 pies (panel izquierdo) y número de observaciones con base de nubosidad menor a 200 pies (panel derecho) en línea negra en La Punta – Juan Fernández. Tendencia en línea punteada celeste.

VISIBILIDAD

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

a) 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.
b) 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.

Se analizó la visibilidad reinante (máximo de visibilidad al que se llega dentro de un circulo 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]. En Rapa Nui solo se registraron 5 observaciones bajo esta condición, por lo que no se realizo el análisis. Mientras que, en Juan Fernández, se registraron 462 observaciones con visibilidad menor a 800 metros, las cuales se concentran, mayormente, en los meses de junio, julio, agosto y septiembre (aproximadamente el 65%), mostrando un leve aumento de 1.9 obs/década, aunque con un valor p de 0.94, por lo que no sería estadísticamente significativa (Figura 23).

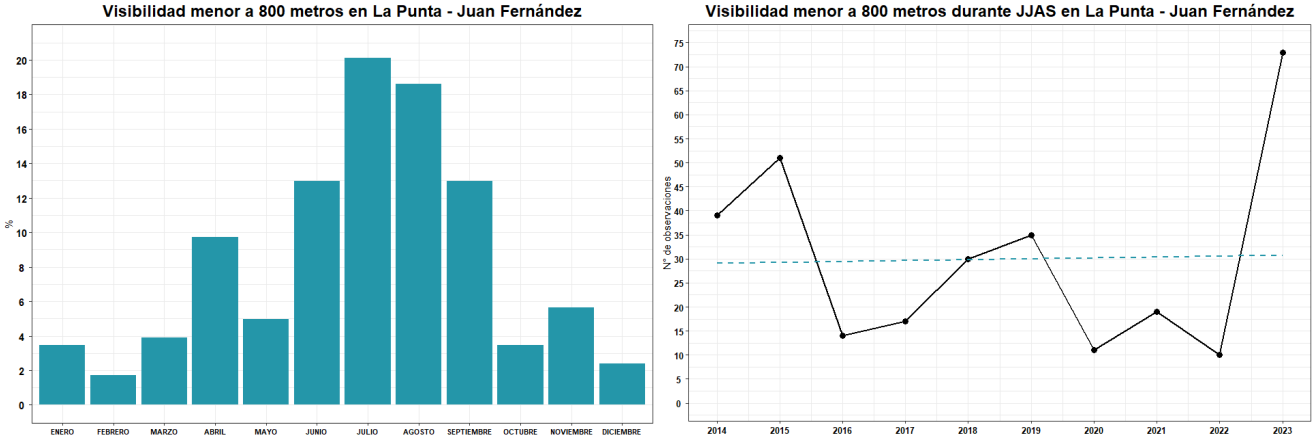

Figura 23: Porcentaje de observaciones con visibilidad menor a 800 m, en todos los meses de año (panel izquierdo) y número de observaciones con visibilidad menos a 800 m en junio, julio, agosto y septiembre en La Punta – Juan Fernández (panel derecho), en línea negra. Tendencia (obs/década) en línea punteada celeste.

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. En la figura 247 se puede apreciar que en Mataveri el fenómeno de tiempo presente más frecuente en casi un 98% es la lluvia, seguida por la llovizna con un escaso 2%. Mientras que en La Punta El fenómeno más frecuente es la bruma con un 39%, seguido por la neblina (18%), lluvia (17%), niebla (16%) y la llovizna (10%).

En cuanto al comportamiento mensual de los fenómenos de tiempo presente (Figura 25), se observa que, en Rapa Nui, de todos los fenómenos el más frecuente es la lluvia, sobre todo en los meses más cálidos (desde enero a abril), donde alcanza un 99% de frecuencia, seguido por la llovizna en aproximadamente un 2% desde mayo a enero. En Juan Fernández la bruma es el fenómeno más frecuente con casi un 50% en los meses de febrero, marzo y octubre, mientras que la lluvia alcanza un 30% el mes de mayo y un 25% los meses de junio y julio, al igual que la niebla en los meses de abril, julio y agosto.

En la figura 26 se puede ver cómo ha variado el número de observaciones en el tiempo de los fenómenos de tiempo presente más frecuentes en Rapa Nui, donde la lluvia, muestra una tendencia negativa de -72.8 obs/década, pero con un valor de p de 0.37, por lo que no sería significativa. Mientras que la llovizna presenta una tendencia positiva de 24.2 obs/década, la cual si es significativa (p =0.001). En Juan Fernández (Figura 27) las observaciones de lluvia, niebla y llovizna están siendo cada vez menos frecuente, ya que presentan tendencias negativas de -41.9, -11.3 y 25.6 obs/década, respectivamente, mientras que la neblina muestra un aumento en el número de observaciones a razón de 15 obs/década, aunque ninguna de las tendencias de fenómenos de tiempo presente en el aeródromo La Punta resultó ser significativa.

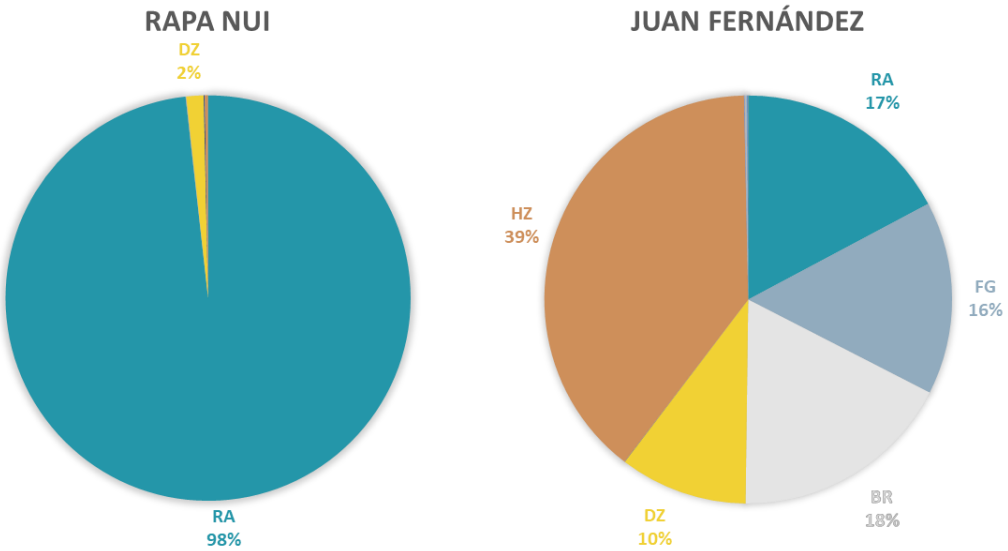

Figura 24: Frecuencia del fenómeno de tiempo presente. Lluvia (RA), niebla (FG), neblina (BR), llovizna (DZ), Humo (FU), Bruma (HZ), gránulos de nieve (SG). En Mataveri – Rapa Nui y La Punta – Juan Fernández.

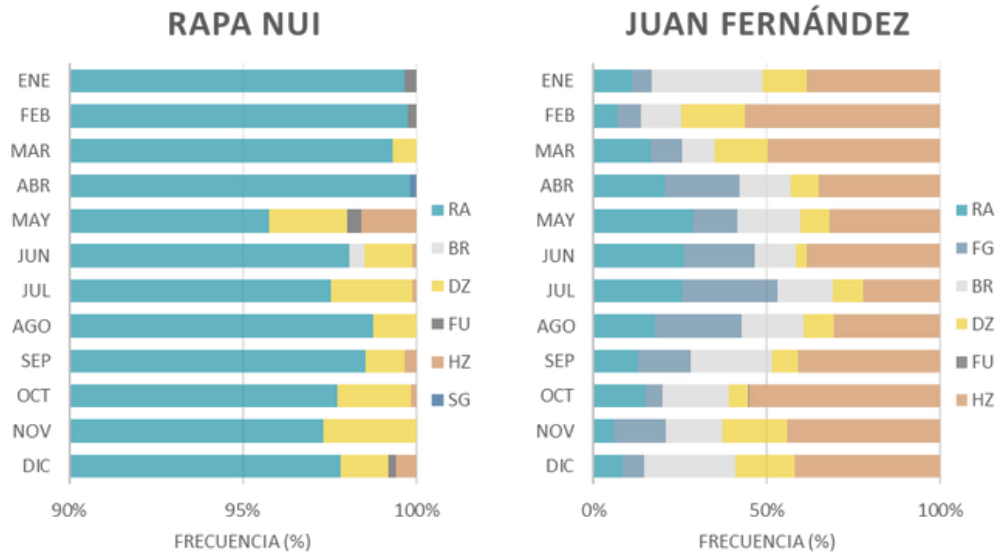

Figura 25: Frecuencia mensual del fenómeno de tiempo presente. Lluvia (RA), niebla (FG), neblina (BR), llovizna (DZ), Humo (FU), Bruma (HZ), gránulos de nieve (SG). En Mataveri – Rapa Nui y La Punta – Juan Fernández. Número de observaciones de los fenómenos de tiempo presenta más frecuentes en La Punta – Juan Fernández en línea gris oscura continua y su respectiva tendencia.

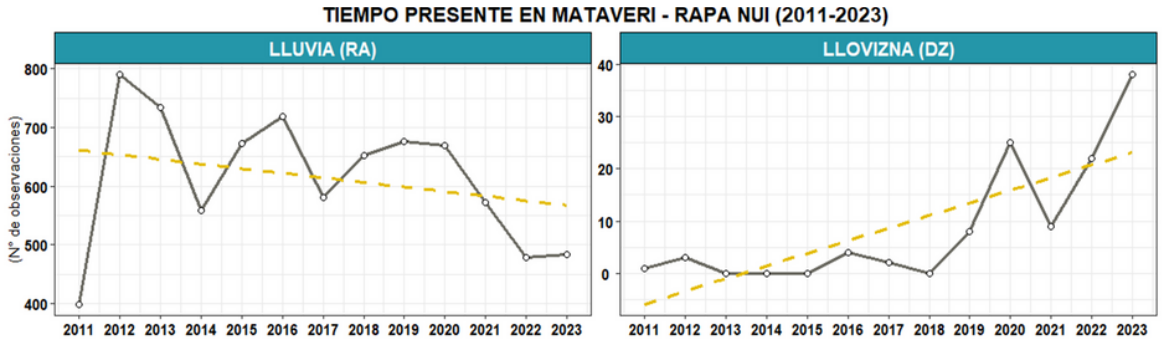

Figura 26: Número de observaciones de los fenómenos de tiempo presenta más frecuentes en Mataveri – Rapa Nui en línea gris oscura continua y su respectiva tendencia.

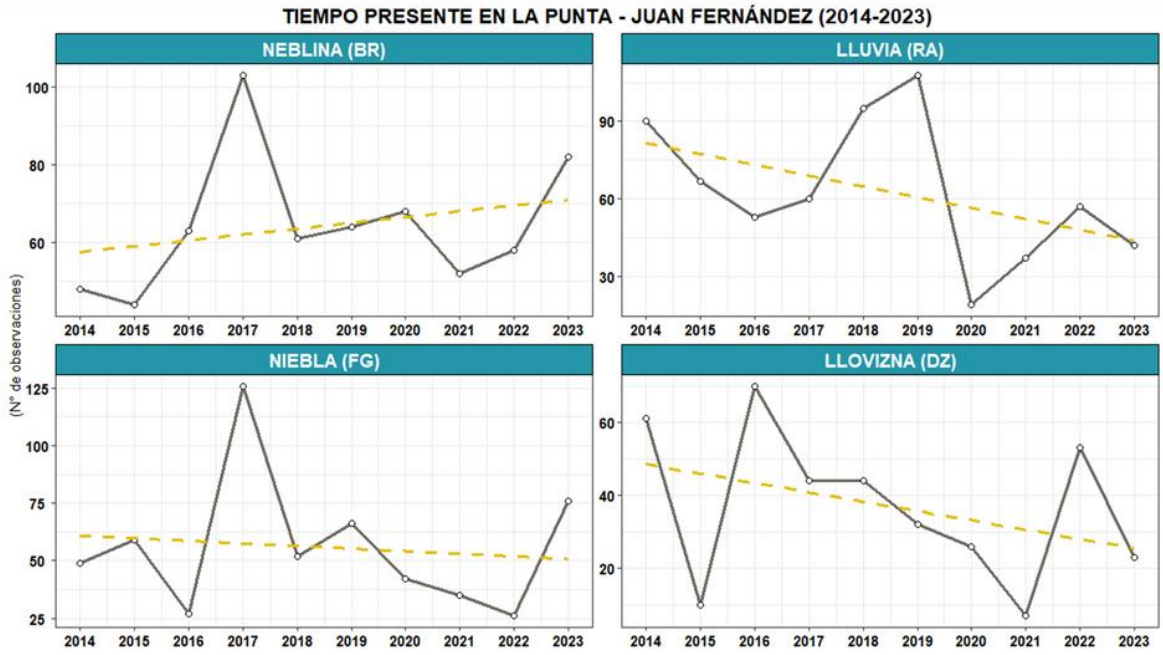

Figura 27: Número de observaciones de los fenómenos de tiempo presenta más frecuentes en La Punta – Juan Fernández en línea gris oscura continua y su respectiva tendencia.

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 se incluyen ambas restricciones, ya sea techos de nubosidad hasta 200 pies y visibilidad reinante inferior a 800 metros (Figura 28) se obtiene que, en Rapa Nui, no existen observaciones, donde se presenten ambas restricciones. Mientras que, en Juan Fernández, el mes que tiene una mayor frecuencia en cuanto a restricciones es agosto, la cual se atribuye a niebla en un 100%, seguido por el mes de julio, atribuido en un 85% a la niebla, un 12% a llovizna y un 3% a la lluvia.

Por lo tanto, en Juan Fernández la operatividad por fenómenos meteorológicos se ve más afectada durante los meses de invierno, asociados principalmente a fenómenos de niebla, llovizna y lluvia. No así Rapa Nui, donde la operatividad no se ve afectada por estas restricciones.

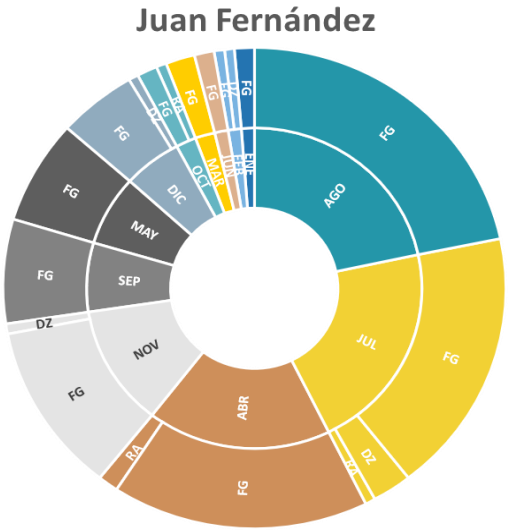

Figura 28: Frecuencia mensual (%) de las restricciones de visibilidad menor a 800 metros y techo de nubes inferior a 200 pies en Juan Fernández.

TENDENCIA DEL NIVEL DEL MAR

El aumento del nivel del mar, impulsado por el cambio climático, presenta un riesgo significativo para la navegación aérea, especialmente en aeropuertos costeros. Observaciones de satélites y mareógrafos muestran un ritmo acelerado en el aumento del nivel del mar, con proyecciones que indican un incremento de entre 0.3 y 1.2 metros para el año 2100 (IPCC, 2021). Este fenómeno puede causar inundaciones y daños a la infraestructura en aeropuertos costeros, interrumpiendo operaciones y aumentando los costos de mantenimiento. Para mitigar estos riesgos, es esencial que los aeropuertos desarrollen planes de contingencia, adapten sus infraestructuras con construcciones resilientes e implementen tecnologías avanzadas para el monitoreo del clima y el nivel del mar, asegurando la continuidad y seguridad de las operaciones aéreas en un clima cambiante.

En la isla de Rapa Nui (Figura 29), se observa una tendencia del nivel mar de 0.08 mm/año con un intervalo de confianza del 95% de +/- 0.82 mm/año con datos del período 1970-2020. Mientras que en Juan Fernández (Figura 30), la tendencia al aumento del nivel del mar es aún mayor, de 0.42 mm/año con un intervalo de confianza del 95% de +/- 1.39 mm/año con datos desde el año 1985 hasta 2022.

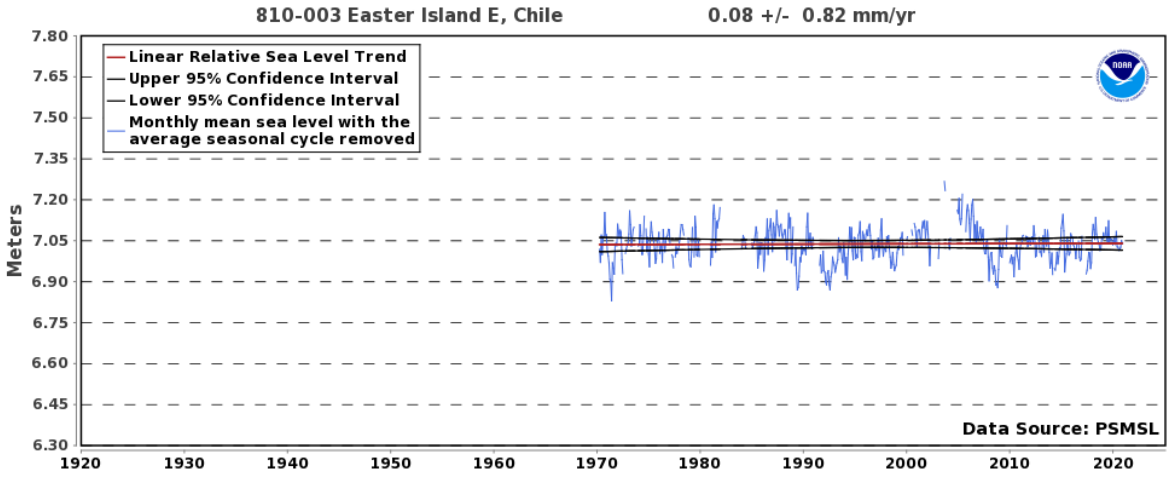

Figura 29: Nivel medio mensual del mar sin las fluctuaciones estacionales habituales debido a la temperatura, salinidad, viento, presión atmosférica y corrientes oceánicas de la costa (línea azul), tendencia lineal (línea roja) e intervalos de confianza al 95% (línea negra), en Rapa Nui. Fuente: NOAA/CO-OPS www.tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends.

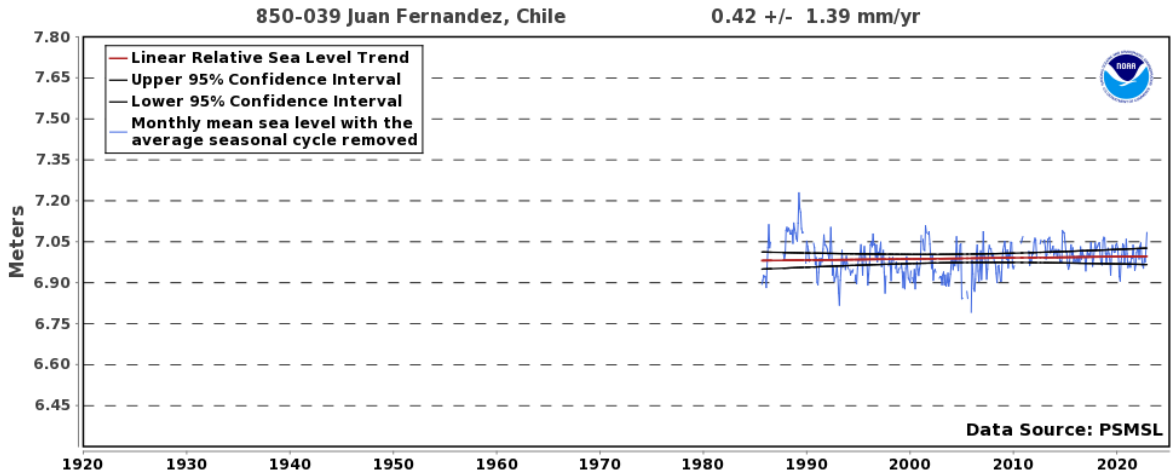

Figura 30: Nivel medio mensual del mar sin las fluctuaciones estacionales habituales debido a la temperatura, salinidad, viento, presión atmosférica y corrientes oceánicas de la costa (línea azul), tendencia lineal (línea roja) e intervalos de confianza al 95% (línea negra), en Juan Fernández. Fuente: NOAA/CO-OPS www.tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends.

ESCENARIOS Y PROYECCIONES

Las proyecciones climáticas para Rapa Nui y Juan Fernández fueron realizadas utilizando downscaling estadístico basado en los modelos CMIP6. Este método ajusta las proyecciones climáticas globales a escala local usando datos históricos (1981-2010) y escalando el período 2011-2100 en tres escenarios de emisiones: SSP1-2.6 (optimista), SSP2-4.5 (intermedio) y SSP5-8.5 (pesimista) (Anexo 2), para las variables de temperatura (media) y precipitación. Estos resultados son preliminares y están en proceso de verificación

La figura 31 muestra las proyecciones de temperatura para el año 2100 en Rapa Nui y Juan Fernández, bajo los tres escenarios de cambio climático, las cuales indican un aumento progresivo en las temperaturas máximas y mínimas anuales, con mayores incrementos bajo escenarios de emisiones altas. En Rapa Nui, se espera que la temperatura media aumente aproximadamente 0.7°C en el escenario optimista, 1.2°C en el intermedio y hasta 2.4°C en el pesimista, mientras que, en Juan Fernández, las temperaturas podrían incrementarse cerca de 0.8°C bajo el escenario optimista, 1.3°C en el intermedio y 2.4°C en el pesimista. Por lo tanto, ambas estaciones presentan una tendencia de aumento de temperaturas más acentuadas en escenarios de altas emisiones.

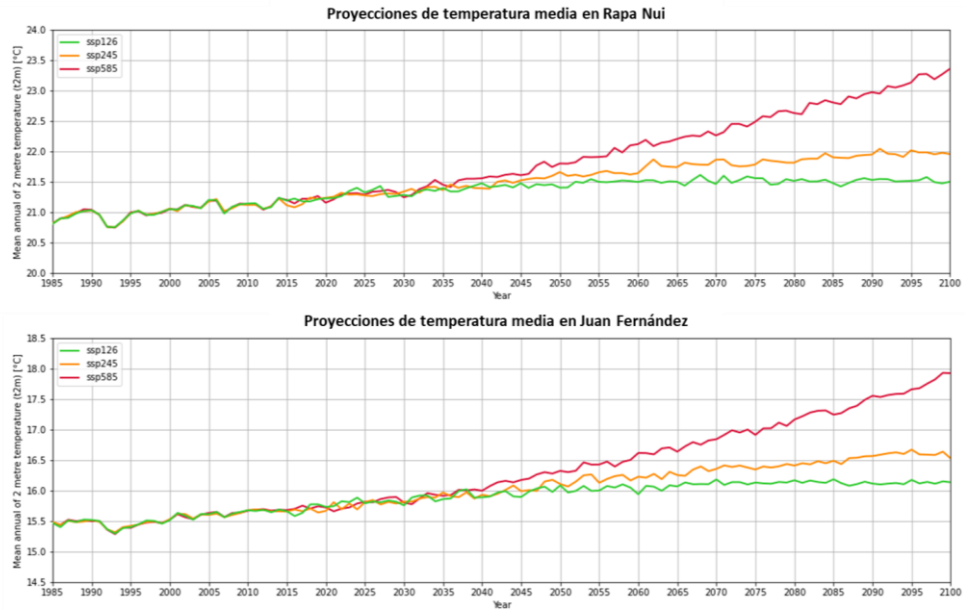

Figura 31: Proyecciones climáticas de temperatura media para Rapa Nui y Juan Fernández, donde SSP1-2.6 es el escenario optimista, SSP2-4.5 es el intermedio y SSP5-8.5 es el escenario pesimista.

En la figura 32 se muestran las proyecciones de precipitación, donde para la estación de Mataveri en Rapa Nui, se proyecta una disminución de -79.9 mm en el escenario optimista, -173.4 mm en el intermedio y -289.2 mm en el pesimista. En cuanto a Juan Fernández se proyecta una disminución de -31.1 mm en el escenario menores emisiones, -59.2 mm en el intermedio y -119.6 mm en el de mayores emisiones.

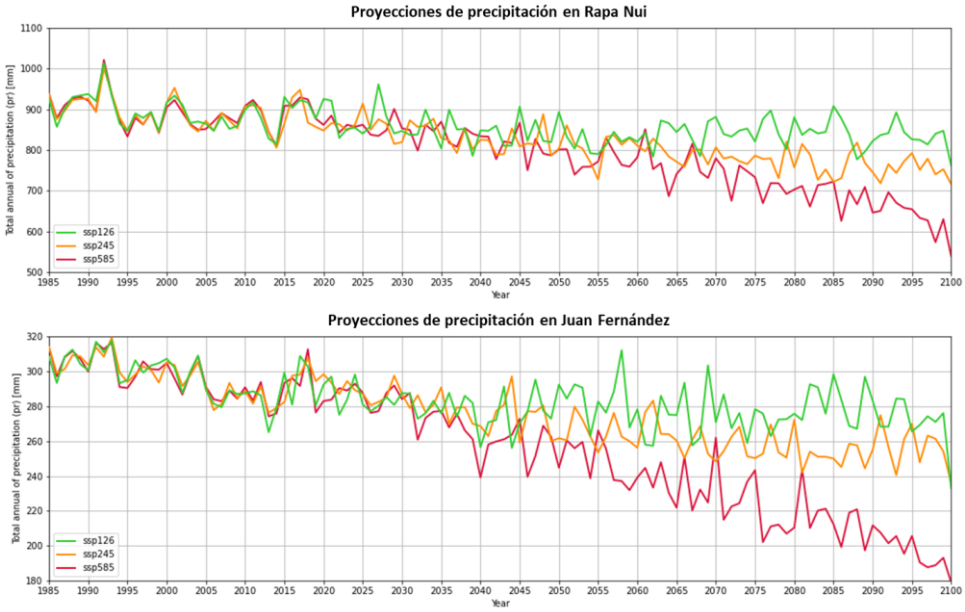

Figura 32: Proyecciones climáticas de precipitación para Rapa Nui, donde SSP1-2.6 es el escenario optimista, SSP2-4.5 es el intermedio y SSP5-8.5 es el escenario pesimista.

DISCUSIÓN Y RESULTADOS

Las condiciones meteorológicas en Rapa Nui y Juan Fernández son cruciales para la navegación aérea, debido a la singularidad de su ubicación geográfica y las características climáticas de cada región.

En ambas localidades, se observan patrones de aumento de las temperaturas nocturnas y una disminución en la precipitación total anual, lo que refleja un cambio hacia condiciones más cálidas y secas en general.

La altitud de densidad, un factor crítico en el rendimiento de las aeronaves, muestra tendencias negativas en ambas estaciones, implicando una leve mejora en las condiciones de vuelo debido a una menor densidad del aire.

El viento es un factor esencial para la seguridad en la aviación, y se observó un leve aumento en su intensidad en la última década en Rapa Nui, además, el viento predominante proviene del sureste, influenciado por los vientos alisios, con velocidades que pueden varias significativamente a lo largo del año. Durante la temporada de invierno la intensidad del viento puede aumentar, presentando desafíos adicionales para las operaciones aéreas. En Juan Fernández, los vientos son más variables debido a la interacción con la topografía montañosa, lo que puede generar ráfagas impredecibles y turbulencias, particularmente en las cercanías del aeródromo.

La altura de la base de la nube es otra de las variables importantes, particularmente en Juan Fernández, donde las nubes tienden a formarse a niveles más bajos. En Rapa Nui, aunque las nubes suelen formarse a mayores altitudes, la presencia de sistemas de baja presión en la región puede llevar a una reducción temporal en la altura de la base de las nubes, afectando la visibilidad y la maniobrabilidad de las aeronaves.

Con respecto al tiempo presente, en Rapa Nui, la lluvia es el principal fenómeno que afecta las operaciones, mientras que, en Juan Fernández, la bruma y la lluvia son los fenómenos más significativos. A pesar de las tendencias observadas en la frecuencia de estos fenómenos, la mayoría no son significativos, lo que indica la necesidad de continuar monitoreando y analizando las observaciones de tiempo presente. Las restricciones

meteorológicas impuestas por la normativa, como la altura de decisión y la visibilidad mínima, se ven más afectadas en los meses de junio, julio y agosto, destacando la importancia de una planificación más cautelosa durante este periodo.

Las tendencias del nivel del mar en estas regiones insulares también son un factor de preocupación creciente, pudiendo tener un impacto directo en la infraestructura aeroportuaria, especialmente en Rapa Nui, donde el aeropuerto Mataveri se encuentra cerca de la costa. A largo plazo, es posible que se requieran medidas de adaptación, como la elevación de pistas o la construcción de barreras costeras, para mitigar el riesgo de inundaciones y garantizar la operatividad del aeródromo.

Las proyecciones climáticas para las próximas décadas sugieren que tanto Rapa Nui como Juan Fernández podrían experimentar un aumento considerable de las temperaturas y una reducción de las precipitaciones bajo escenarios de altas emisiones. Por lo que es fundamental poder desarrollar estrategias para mitigar los impactos y poder adaptarnos para mejorar la resiliencia frente al cambio climático.

REFERENCIAS

Ancapichún, S., & Garcés-Vargas, J. (2015). Variabilidad del Anticiclón Subtropical del Pacífico Sudeste y su impacto sobre la temperatura superficial del mar frente a la costa centro-norte de Chile. Ciencias marinas, 41(1), 1-20.

Carrasco, J. F., & Quintana, J. (2007). Descripción meteorológica observada en el pacífico suroriental a lo largo de la transecta 27° s, durante el Crucero Cimar 5 del 1530 de octubre de 1999. Ciencia y Tecnología del Mar, 30(1), 1-21.

IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, In press, doi:10.1017/9781009157896.

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.

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.

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

ANEXOS

Anexo 1: Descripción de índices climáticos de temperatura y precipitación

ÍNDICE	DESCRIPCIÓN
TXgt50p	Porcentaje de días cuando la temperatura máxima supera el percentil 50%
TN10p	Porcentaje de días del año donde la temperatura mínima está bajo el percentil 10
TN90p	Porcentaje de días del año donde la temperatura mínima supera el percentil 90
TX10p	Porcentaje de días del año donde la temperatura máxima está bajo el percentil 10
TX90p	Porcentaje de días del año donde la temperatura máxima supera el percentil 90
OC	Número de olas de calor por temporada, definida como 3 días consecutivos o más con temperaturas máximas sobre el percentil 90 desde noviembre a marzo
TXbtTNbd	Número de días cuando TX y TN están bajo el percentil 10 por al menos 3 días consecutivos
SU25	Número de días del año donde la temperatura máxima supera los 25°C
SU30	Número de días del año donde la temperatura máxima supera los 30°C
CSD	Número máximo de días consecutivos sobre 25°C
R99pTOT	Porcentaje de precipitación respecto al total anual en días que superan el percentil 99
R95pTOT	Porcentaje de precipitación respecto al total anual en días que superan el percentil 95
Rx5day	Valor máximo de precipitación durante 5 días consecutivos
Rx1day	Valor máximo de precipitación en un día
R20mm	Número de días en el año con precipitación sobre 20 milímetros
R10mm	Número de días en el año con precipitación sobre 10 milímetros
R1mm	Número de días en el año con precipitación sobre 1 milímetro
R99p	Suma anual de precipitación en días que superan el percentil 99
R95p	Suma anual de precipitación en días que superan el percentil 95
PRCPTOT	Suma de la precipitación sobre 1 milímetro
PRCP10TOT	Suma de la precipitación sobre 10 milímetros

Anexo 2: Descripción de escenarios climáticos.

ESCENARIO	DESCRIPCIÓN
SSP1 "Sustentabilidad"	Este escenario posee los siguientes supuestos: bajo crecimiento de la población, alto crecimiento económico, altos niveles de educación, gobernabilidad, una sociedad globalizada, cooperación internacional, desarrollo tecnológico y conciencia ambiental. Bajo estos supuestos, este escenario representa bajos niveles de desafíos de mitigación y adaptación.
SSP2	Este es un escenario intermedio, donde los supuestos están entre los que corresponden a ka SSP1 y SSP3.
SSP3 "Fragmentación"	En este escenario se asumen: alto crecimiento poblacional y bajo desarrollo económico, niveles inferiores de educación, y una sociedad regionalizada y con poca conciencia ambiental, por lo que representan un nivel de desafíos para la adaptación y mitigación.
SSP4 "Desigualdad"	Bajo este escenario, la tecnología avanza en los países desarrollados, pero no toda la población logra beneficiarse de ello, lo cual representa un nivel de desafío para la mitigación.
SSP5	Este escenario asume que aún se tiene una muy alta dependencia de los combustibles fósiles, se tendría un bajo crecimiento en la población, un elevado crecimiento económico y un alto desarrollo humano; por lo que representa un elevado nivel de desafío para la mitigación.

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