



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**PROYECCIONES DE SEQUÍA EN LA ISLA DE RAPA NUI USANDO SERIES GCM
ESCALADOS CON EL MÉTODO ESTADÍSTICO MULTIVARIADO MBC_n BAJO UN
ESCENARIO PESIMISTA SSP.**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

DAYNA RUTH SHELDON OLIVARES

PROFESORA GUÍA:

XIMENA VARGAS MESA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

EDUARDO MUÑOZ CASTRO

CATALINA JEREZ TOLEDO

FRANCO RICCHETTI CAMPOS

SANTIAGO DE CHILE

2024

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL
POR: DAYNA RUTH SHELDON OLIVARES
FECHA: 2024
PROF. GUÍA: XIMENA VARGAS MESA

PROYECCIONES DE SEQUÍA EN LA ISLA DE RAPA NUI USANDO SERIES GCM ESCALADOS CON EL MÉTODO ESTADÍSTICO MULTIVARIADO MBCn BAJO UN ESCENARIO PESIMISTA SSP.

Según el Informe Especial sobre el Calentamiento Global de 1,5°C del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC), se estima que la temperatura promedio global ha aumentado aproximadamente en 1°C debido a actividades humanas, lo que ha incrementado la frecuencia e intensidad de eventos climáticos extremos, como olas de calor, sequías e inundaciones. En la Isla Rapa Nui, por su condición aislada y la ausencia de cursos de agua superficial permanente, se han visto enfrentados históricamente a la necesidad de asegurar el abastecimiento de agua fresca. Su principal fuente de agua dulce, el acuífero, es particularmente vulnerable a las variaciones climáticas que afectan la recarga de agua subterránea.

El presente estudio tuvo como objetivo principal analizar las proyecciones de sequía en la Isla de Rapa Nui bajo un escenario climático de altas emisiones como lo es el SSP5-8.5, y compararlas con el escenario RCP 8.5 utilizado en investigaciones previas. La metodología se basó en la revisión de literatura especializada, el análisis de datos climáticos históricos, la selección y escalamiento de series temporales a través del método MBCn, y la generación de índices de sequía. Como base se utilizó la información histórica de las forzantes meteorológicas, escaladas a una resolución espacial de 0,01° (latitud, longitud) y, en particular, se emplearon modelos climáticos globales de la fase 6 del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP6).

El análisis de proyecciones meteorológicas para la Isla de Rapa Nui estima, para el periodo futuro lejano (2071-2100), un incremento de 2,1°C en la temperatura media anual, y una disminución del 29% en la precipitación anual media. A nivel de sequía, el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) con escala de 12 meses proyecta para el futuro lejano un incremento en la frecuencia de eventos de sequía severa a excepcional, estimando que estas condiciones de sequía se presentarían entre el 21% y el 82% del tiempo. Al incluir la temperatura, el Índice de Precipitación y Evapotranspiración Estandarizado (SPEI) proyecta que esta frecuencia se extendería entre el 29% y 100% del tiempo.

Finalmente, la comparación entre escenarios muestra que, especialmente en el futuro lejano, el escenario SSP5-8.5 proyecta una mayor disminución en la precipitación anual media (29% frente a 17% del RCP 8.5) y un incremento de temperatura (2,1°C frente a 1,8°C del RCP 8.5). En el mismo periodo de análisis, el escenario SSP5-8.5 proyecta mayores frecuencias de eventos de sequía severa a excepcional frente al escenario RCP8.5, un 15% superior para el SPI12 y un 7% para el índice SPEI12.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, porque más allá de motivarme en mis estudios, me han transmitido la responsabilidad y respeto, valores que me han guiado para ser una persona más humana y comprometida. Su amor incondicional y su resiliencia en la vida han sido un ejemplo a seguir.

El camino ha tenido varios desafíos y cambios en los que el apoyo de mi familia y amigos ha sido fundamental. Durante mi experiencia en la universidad, tuve la oportunidad de conocer a personas maravillosas, tanto al inicio como al final de la carrera, grandes amig@s que valoro profundamente y con quienes espero seguir compartiendo en el futuro.

Agradezco también a una persona muy especial que ha llegado a mi vida en uno de los momentos más importantes, brindándome su apoyo y aliento en esta etapa final.

Al departamento de geología por la oportunidad de sumarme a sus prácticas profesionales, junto a la ayuda del departamento de ingeniería civil, que permitió tener un acercamiento a la isla que fue de suma importancia para el desarrollo de la memoria. A CONAF y a la comunidad indígena Ma'u Henua mi más profundo agradecimiento, por su amabilidad y cálido recibimiento en mi experiencia en la isla. Destaco y aprecio su dedicación y esfuerzo por preservar el bienestar de la isla, su entorno natural y cultura.

A la profesora Ximena quiero expresarle mi más sincero agradecimiento por todo el apoyo brindado durante el desarrollo de mi memoria. Su vocación y paciencia para enseñar han sido fundamentales para mi progreso académico y personal, siempre le estaré agradecida por haberme dado la oportunidad de aprender bajo su dirección.

Finalmente, agradezco a Nicolás Vásquez, Ignacio Toro y a mi comisión por su disposición y paciencia para ayudarme en cada momento.

TABLA DE CONTENIDO

1	Introducción.....	1
1.1	Motivación.....	1
1.2	Objetivos.....	3
1.2.1	Objetivo General.....	3
1.2.2	Objetivos Específicos.....	3
1.3	Estructura del documento.....	3
2	Revisión de antecedentes.....	4
2.1	Cambio Climático.....	4
2.2	Escenarios de cambio climático.....	6
2.3	Modelos de Circulación General (GCM).....	8
2.4	Escalamiento (Downscaling).....	9
2.5	Sequías.....	10
3	Zona de estudio.....	12
3.1	Antecedentes Generales.....	12
3.2	Población y actividades económicas.....	13
3.3	Geomorfología y uso de suelo.....	14
3.3.1	Origen volcánico.....	14
3.3.2	Tipo de suelo.....	15
3.3.3	Cobertura de suelo.....	17
3.3.4	Humedales.....	18
3.3.5	Topografía.....	18
3.4	Clima e Hidrología.....	19
3.5	Servicio de Agua Potable.....	22
4	Metodología.....	23
4.1	Cálculo de evapotranspiración.....	24
4.2	Modelos de Circulación General del CMIP6.....	24
4.3	Corrección de series mediante el método de escalamiento MBCn.....	25
4.4	Distribución Espacial.....	26
4.4.1	Distribución Precipitación.....	26

4.4.2	Distribución Temperatura Máxima y Mínima	27
4.5	Determinación de índices de sequía.....	28
4.5.1	Clasificación y caracterización de Índices	29
4.6	Selección de modelos de circulación general	30
5	Resultados y Discusión.....	31
5.1	GCM.....	31
5.1.1	Curvas de Variación Estacional	32
5.1.2	Curvas de duración.....	35
5.1.3	Selección de GCM	36
5.1.4	Proyección de las forzantes	39
5.1.5	Clima proyectado	40
5.2	Distribución Espacial	41
5.2.1	Distribución Precipitación.....	41
5.2.2	Distribución Temperatura	42
5.3	Análisis de índices de sequía	43
5.3.1	Índices en el tiempo	43
5.3.2	Frecuencia de Índices de Sequía	45
5.3.3	Variaciones.....	48
5.4	Comparación RCP y SSP.....	53
5.5	Discusión de selección de modelos.....	55
6	Conclusiones.....	56
	Bibliografía.....	59
	ANEXO A : METODOLOGÍA	64
A.1.	EVAPOTRANSPIRACIÓN.....	64
A.2.	ÍNDICES	65
	ANEXO B : RESULTADOS	66
B.1.	GCM.....	66
B.2.	DISTRIBUCIÓN ESPACIAL.....	73
B.3.	ÍNDICES	78

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Índices de sequía junto a las forzantes necesarias para su cálculo. Adaptado de (Organización Meteorológica Mundial [OMM] y Asociación Mundial para el Agua, 2016)	11
Tabla 3-1: Población Rapa Nui y no Rapa Nui, construido a partir de datos del CENSO (INE, 2017).	13
Tabla 3-2: Porcentaje de cobertura de suelo Isla Rapa Nui, a partir de datos de CONAF (2019).	17
Tabla 3-3: Información Estación Mataveri. DMC.cl	19
Tabla 4-1: Nombres y resolución espacial de GCM utilizados para obtención de índices de sequía.	24
Tabla 4-2: Información producto satelital IMERG.	26
Tabla 4-3: Ecuación del coeficiente de determinación R^2 y del error cuadrático medio RMSE.	27
Tabla 4-4: Clasificación índice SPI para condiciones de sequía. Fuente: Adaptado de (National Drought Mitigation Center, 2024).	29
Tabla 5-1: Variación de precipitación, temperatura máxima y mínima anuales respecto al periodo histórico 1991-2020.	39
Tabla 5-2: Promedio de proyecciones de precipitación y temperatura para GCM seleccionados.	39
Tabla 5-3: Valores de temperatura máxima y mínima para distribución de las zonas homogéneas.	42
Tabla 5-4: Frecuencias porcentuales de meses bajo umbral -1,3 de GCM seleccionados para índices SPI y SPEI.	47
Tabla 5-5: Valores máximos, mínimos y promedio de las frecuencias bajo umbral -1,3 de GCMs los seleccionados en los tres periodos de análisis.	48
Tabla 5-6: N° de sequías, duración, severidad e intensidad de SPI12 para los GCM seleccionados.	49
Tabla 5-7: Promedios y variaciones de precipitación corregidos del escenario RCP 8.5 calculado a partir de datos de 75 modelos de Gatica y Toro, y datos SSP5-8.5 de GCM seleccionados (CanESM5, GFDL-ESM4, y MRI-ESM2-0) en el periodo histórico, futuro cercano y futuro lejano.	53
Tabla 5-8: Frecuencias porcentuales de meses bajo umbral -1,3 para índices SPI12 y SPEI12 con el método de Thornthwaite para los tres periodos de análisis calculado a partir de datos de los 75 modelos de Gatica y Toro.	53

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Síntesis de cambios significativos observados en el sistema climático durante las últimas décadas. Las flechas hacia arriba, hacia abajo y en círculos indican aumentos, disminuciones y cambios, respectivamente. Fuente: Adaptado de (IPPC, 2021b).	5
Figura 2-2: Cambios regionales proyectados en la temperatura (izquierda) y precipitación (derecha) en relación con el clima de 1850-1900, basado en 31 modelos del CMIP6 y escenario SSP3-7.0. Fuente: Adaptado de (IPPC, 2021c).	6
Figura 2-3: Esquemas de escenarios SSP y forzamiento radiativo para el año 2100 utilizadas en el Escenario MIP. Fuente: Adaptado de (Government of Canada, 2023).	7
Figura 2-4: Proyecciones climáticas relativas al período 1985-2014 bajo escenarios SSP de la temperatura media global de la superficie (TAS) y la precipitación anual global (PR). Fuente: Adaptado de (Tebaldi et al., 2021).	8
Figura 2-5: Escalamiento espacial. Adaptado de Viner (2012).	9
Figura 2-6: La secuencia general de los diferentes tipos de sequía. Fuente: Adaptado (Zargar et al., 2011).	10
Figura 3-1: Mapa de la Isla de Rapa Nui con lugares característicos.	12
Figura 3-2: Imágenes de sectores en Isla de Rapa Nui. Imagen a) Bovino en la isla b) y c) Tuberías abandonadas aledañas y dentro de cauce Ava Ranga Uka.	13
Figura 3-3: Mapa geológico de la Isla de Rapa Nui, basado en el análisis de campo. Fuente: (Vezzoli & Acocella, 2009).	14
Figura 3-4: Cobertura de suelo en la Isla de Rapanui, a partir de datos de CONAF (2019).	17
Figura 3-5: Curva hipsométrica de la Isla de Rapa Nui construido con DEM perteneciente a la USGS.	19
Figura 3-6: Climograma construido a partir de observaciones de la Estación Mataverí. Periodo 1991-2020.	20
Figura 3-7: Precipitaciones anuales estación Mataverí 1970-2023. Línea segmentada indica la línea de tendencia de las precipitaciones anuales.	20
Figura 3-8: Curvas de variación estacional de la precipitación, temperatura media, máxima y mínima de datos de la estación Mataverí en el periodo 1991-2020.	21
Figura 3-9: Curvas de duración a partir de observaciones de la Estación Mataverí.	22
Figura 4-1: Esquema metodológico.	23
Figura 4-2: Archivo netCDF de precipitación modelo MIROC6 en la resolución original (a) y escalado espacialmente a 0,01° con el método bilineal (b), junto a la geometría de la Isla Rapa Nui. Punto azul en figura b) corresponde a la ubicación de la estación Mataverí.	25

Figura 4-3: Esquema duración, intensidad, severidad y n° de eventos de índices de sequía.	29
Figura 5-1: Valores anuales de precipitación, temperatura máxima y mínima. Línea azul corresponde a la estación Mataveri, línea negra el promedio de los GCM, y área celeste la envolvente de los GCM (máximo y mínimo).	31
Figura 5-2: Evapotranspiración potencial anual acumulada con método de Thornthwaite y Hargreaves. Línea azul corresponde a la estación Mataveri, línea negra el promedio de los GCM, y área celeste la envolvente de los GCM (máximo y mínimo).	32
Figura 5-3: CVE de precipitación para el periodo histórico (1991-2020), futuro cercano (2031-2060) y futuro lejano (2071-2100). La línea azul corresponde a datos de la estación Mataveri, la línea negra el promedio de los GCM y el área celeste la envolvente de los GCM (valores máximos y mínimos).....	33
Figura 5-4: CVE de Evapotranspiración potencial con Thornthwaite y Hargreaves para el periodo histórico (1991-2020), futuro cercano (2031-2060) y futuro lejano (2071- 2100). La línea azul corresponde a datos de la estación Mataveri, la línea negra el promedio de los GCM y el área celeste la envolvente de los GCM (valores máximos y mínimos).	34
Figura 5-5: Curva de variación estacional con diagrama de caja para los GCMs junto a Mataveri en el periodo histórico 1991-2020.	34
Figura 5-6: Curva de duración de precipitación diaria para todos los GCMs y los datos observados de Mataveri en el periodo 1991-2020.	35
Figura 5-7: Curva de duración de precipitación diaria para todos los GCMs en el futuro cercano (2031-2060) y lejano (2070-2100).	35
Figura 5-8: Curvas de duración de temperatura mínima y máxima diaria para todos los GCMs y los datos observados de Mataveri en el periodo 1991-2020.	36
Figura 5-9: Curva de variación estacional con envolvente (valor máximo y mínimo) de los GCM y los seleccionados.....	37
Figura 5-10: Promedios y desviaciones estándar anuales de los GCM en el periodo histórico, futuro cercano y futuro lejano de forzantes. La línea roja punteada indica el promedio y desviación de la estación Mataveri.	38
Figura 5-11: Climograma de datos observados en el periodo histórico (1991-202) junto al promedio de GCMs seleccionados en el futuro cercano (2031-2060) y lejano (2071- 2100).	40
Figura 5-12: Mapa Isla Rapa Nui con zonas homogéneas definidas a partir del producto IMERG.	41
Figura 5-13: Mapa del mes de febrero y julio de temperaturas máximas mensuales normalizadas en función del pixel de la ubicación de la estación Mataveri.	42
Figura 5-14: CVE de precipitación, ETP Thornthwaite y Hargreaves para cada zona homogénea en el periodo 1991-2020.	43

Figura 5-15: Índices SPI para la estación Mataveri en el periodo 1991-2020 con umbral de sequía -1,3.	43
Figura 5-16: Índice SPEI12 con Thornthwaite y Hargreaves en el periodo 1991-2100... ..	44
Figura 5-17: Sequías con índice SPI12 en el periodo 1991-2100 para los modelos seleccionados: CanESM5, GFDL-ESM4 y MRI-ESM2-0.	44
Figura 5-18: Sequías con índices SPEI12 con Thornthwaite (columna izquierda) y con Hargreaves (columna derecha) para CanESM5 (fila superior), GFDL-ESM4 (fila central) y MRI-ESM2-0 (fila inferior) en el periodo 1991-2100.....	44
Figura 5-19: Frecuencia de sequías según índices SPI-12, SPEI-12 Harg. y SPEI-12 Thorn. periodo 1991-2020.	45
Figura 5-20: Frecuencias de sequías según índices SPI12 y SPEI12 con Thornthwaite y Hargreaves en los periodos de análisis para los GCM seleccionados: CanESM5, GFDL-ESM4 y MIR-ESM2-0.	46
Figura 5-21: Frecuencias de sequías según índices SPI9 y SPEI9 con Thornthwaite y Hargreaves en los periodos de análisis para los GCM seleccionados: CanESM5, GFDL-ESM4 y MIR-ESM2-0.	47
Figura 5-22: Variación respecto al periodo histórico de N° de eventos, duración, intensidad y severidad de GCM con SPI-12, bajo un umbral de -1,3.....	50
Figura 5-23: Variación respecto al periodo histórico de N° de eventos, duración, intensidad y severidad de GCM con SPEI-12 con Thornthwaite, bajo un umbral de -1,3.....	51
Figura 5-24: Variación respecto al periodo histórico de N° de eventos, duración, intensidad y severidad de GCM con SPEI-12 con Thornthwaite, bajo un umbral de -1,3.....	51
Figura 5-25: Frecuencias de sequías según índices SPI12 y SPEI12-T con método de Thornthwaite con escenario RCP 8.5 y SSP5-8.5 bajo un umbral de -1,3, para los tres periodos de análisis: periodo histórico 1991-2020, futuro cercano 2031-60 y lejano 2071-2100.	54

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

El cambio climático representa un desafío global urgente, y la evidencia científica así lo confirma. Según el Informe Especial sobre el Calentamiento Global de 1,5°C del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) (2018), se estima que la temperatura promedio global ha aumentado aproximadamente en 1°C por encima de los niveles preindustriales debido a actividades humanas. Este aumento ha llevado a un incremento significativo en la frecuencia e intensidad de eventos climáticos extremos, como olas de calor, sequías e inundaciones. El informe advierte que, si no se implementan medidas efectivas y se sigue con el ritmo actual, el calentamiento global podría superar los 1,5°C entre 2030 y 2052, con consecuencias irreversibles para los ecosistemas y las sociedades humanas.

Recientemente, el Informe de Síntesis del Sexto Informe de Evaluación del IPCC (AR6) (2023), ha señalado que, para mantener el aumento de la temperatura global por debajo de 1,5°C, es importante reducir las emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI) en al menos un 43% para 2030 en comparación con los niveles de 2019. Para limitar el calentamiento a 2°C, las emisiones deben reducirse entre un 21% y un 64% para el mismo periodo.

El comportamiento futuro de la humanidad es incierto, las acciones y decisiones humanas tienen un impacto crucial en la evolución del cambio climático. De esta forma, las proyecciones climáticas se basan en diversos escenarios futuros que cubren una gama de posibles elecciones y resultados humanos (Government of Canada, 2021). Actualmente, la sexta fase del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP6, por sus siglas en inglés), utiliza las trayectorias socioeconómicas compartidas (SSPs, por sus siglas en inglés) que combinan elementos del desarrollo social futuro con las trayectorias de cambio en las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero definidas en la iteración anterior de escenarios, conocida como Trayectorias de Concentración Representativas (RCP) (Government of Canada, 2023).

En este contexto, el Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados tiene el objetivo de entender el clima pasado, presente y futuro. Los Modelos de Circulación General (GCM, por sus siglas en inglés) utilizados en el CMIP proyectan cómo el clima podría cambiar en respuesta a diferentes forzantes radiativas, tanto naturales como antropogénicas, permitiendo a los científicos explorar múltiples escenarios futuros y ayudar en la toma de decisiones sobre mitigación y adaptación al cambio climático (WRCP, 2024).

Los GCM utilizados en el CMIP se generan con resoluciones espaciales gruesas (100-300 km), escalas que pueden no ser suficientes para estudios hidrológicos, que requieren de resoluciones más finas (Seria Ríos, 2023). Para abordar esta limitación, se han desarrollado métodos de escalamiento o downscaling, que se dividen en dos grandes categorías: escalamiento dinámico (*regional climate models*, RCMs) y escalamiento estadístico (*statistical downscaling*, SD) (Chen et al., 2011).

En el escalamiento estadístico se pueden encontrar métodos de corrección de sesgo sistemático como el *Quantile Delta Mapping* (QDM) y el *Multivariate quantile mapping bias correction*

(MBCn). Estos métodos se enfocan en ajustar las proyecciones del modelo para que coincidan mejor con las observaciones históricas. Por un lado, el algoritmo QDM es útil para trabajar con solo una variable, mientras que el MBCn es un enfoque más complejo que considera múltiples variables simultáneamente (Cannon et al., 2015; Cannon et al., 2018).

La Isla de Rapa Nui, ubicada en el océano Pacífico, es un territorio de profundo valor histórico, cultural y medioambiental. Con una extensión de 164 km², el acceso a agua fresca para satisfacer las necesidades de consumo humano, ganadería y agricultura ha sido una preocupación constante en esta región. Esta inquietud se debe a que, además de su tamaño limitado, la isla carece de ríos o cursos de agua permanente. Su principal fuente de agua dulce, el acuífero, es particularmente vulnerable a las variaciones climáticas que afectan la recarga de agua subterránea. (DGA, 2010; Gatica y Toro;2020). Dado que estas islas son destinos turísticos muy populares, la gran afluencia de visitantes incrementa significativamente las demandas de agua para consumo. Lamentablemente, esto también genera un incremento en la generación de residuos, lo que eleva el riesgo de contaminación del acuífero y podría disminuir la disponibilidad de agua para consumo humano (Milad, 2010).

Gatica y Toro (2020) evaluaron la frecuencia de eventos de sequía proyectadas en la Isla de Rapa Nui utilizando 75 Modelos de Circulación General (GCM) del CMIP5. Estas proyecciones se realizaron bajo dos escenarios de emisiones de gases de efectos invernaderos o trayectorias de concentración representativas (RCP), RCP 4.5 y RCP 8.5. Sus resultados, indican que para el futuro lejano (2061-2100) se espera una disminución en la precipitación anual media entre un 5,4% y 15,5%, junto con un aumento de la temperatura media anual entre 1,0°C y 1,8°C. Además, las proyecciones sugieren que las sequías extremas para una escala de 48 meses, históricamente raras (ocurrencia de 1 cada 30 años), podrían convertirse en frecuentes (1 cada 4 años) en el futuro cercano (2021-2060) y en la condición predominante (>50% del tiempo) en el futuro lejano, bajo el escenario RCP 8.5. Aunque se menciona una alta incertidumbre en las proyecciones de los eventos de sequía, los autores destacan que el conjunto de los modelos indica consistentemente un aumento en la frecuencia sequía severas (Gatica & Toro, 2020).

Teniendo en consideración la incertidumbre de la evolución del cambio climático en el futuro y los nuevos escenarios del CMIP6, se considera fundamental realizar estudios que permitan analizar si se mantienen las tendencias de sequía en el mundo y en especial en esta región. Por ello, para proporcionar información adicional que respalde la toma de decisiones y la formulación de estrategias en esta región insular única y vulnerable y generar una mayor comprensión del posible contexto futuro con respecto al cambio climático en la región, el propósito del presente trabajo de título es abordar la posible escasez hídrica en la Isla de Rapa Nui, mediante un análisis de la evolución de sequías bajo un escenario de altas emisiones como el SSP5-8.5.

Para dichos efectos se seleccionan series de Modelos de Cambio Climático Globales (GCM) del proyecto CMIP6 escalados mediante el método de escalamiento multivariado MBCn (Cannon, 2018) y, teniendo en consideración las características de la isla, se seleccionan los índices de sequías a utilizar. Finalmente, se analizan los cambios proyectados y sus rangos de incertidumbre, estableciendo las variaciones en los índices de sequía respecto a los escenarios RCP establecidos por Gatica y Toro (2020).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Analizar índices de sequía hidrometeorológica para el futuro cercano y lejano bajo un escenario pesimista SSP en la Isla de Rapa Nui.

1.2.2 Objetivos Específicos

1. Determinar las proyecciones de forzantes meteorológicas en la isla Rapa Nui aplicando el método de escalamiento estadístico MBCn bajo un escenario pesimista como el SSP5-8.5.
2. Obtener índices de sequía en el período histórico y futuros cercano y lejano con los modelos GCMs del proyecto CMIP6, bajo el escenario pesimista.
3. Contrastar cambios en los índices de sequía entre escenarios previos RCP y los actuales SSP en la zona de interés.

1.3 Estructura del documento

El presente documento se inicia con la revisión de antecedentes bibliográficos en el Capítulo 2, donde se introducen los conceptos básicos que se aplican en la memoria. En el Capítulo 3 se caracteriza la región de estudio, incluyendo aspectos como la hidrometeorología, geomorfología, cobertura de suelo y otros. En el capítulo 4 se presenta la metodología utilizada para alcanzar los objetivos establecidos. A continuación, en el capítulo 5 se exponen los resultados obtenidos y el análisis de los modelos escalados y corregidos, la distribución espacial e índices de sequía. Finalmente, en el Capítulo 6, se concluye con un análisis de los resultados obtenidos y de la memoria en general.

2 REVISIÓN DE ANTECEDENTES

El presente capítulo busca contextualizar y presentar los principales conceptos que se abordan en el desarrollo de la memoria de trabajo de título. Este apartado se divide en cinco subsecciones: Cambio Climático, Escenarios, Modelos de Circulación General (GCM), Escalamiento y Sequías.

2.1 Cambio Climático

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), establecido en 1988, define el cambio climático como una alteración significativa y duradera en el clima de la Tierra. Estas variaciones son identificables por medio de pruebas estadísticas que evidencian cambios en los valores medios y/o en la variabilidad de las propiedades climáticas. Estas alteraciones pueden originarse en procesos internos naturales o forzamientos externos, como lo son las erupciones volcánicas, variaciones solares, o cambios antropogénicos que alteran la composición de la atmósfera y el uso de suelo (IPCC, 2018).

Los cambios observados en el sistema climático desde finales del siglo XIX reflejan un planeta sin duda más cálido. Entre 2011 y 2020, la temperatura media global de la superficie terrestre fue aproximadamente 1,1 °C más alta que la temperatura promedio registrada durante el siglo XIX. Este incremento forma parte de una tendencia observada durante las últimas cuatro décadas, donde cada una ha sido más cálida que la anterior desde 1850 (IPCC, 2021a).

El cambio climático no se manifiesta únicamente como un aumento global de las temperaturas (calentamiento global), extendiéndose sus efectos a diversos aspectos del sistema terrestre. La evidencia del cambio climático se basa en una amplia gama de indicadores que en conjunto llevan a la conclusión de que se están presenciando cambios rápidos en múltiples componentes del clima global; cambios que son evidentes en la atmósfera, los océanos, la criósfera (agua en estado sólido) y la biosfera. Por ejemplo, entre 1901 y 2018, el nivel medio global del mar ha aumentado en aproximadamente 20 cm, un cambio significativo que afecta a las zonas costeras de todo el mundo (IPCC, 2021a). Además, se han observado patrones alterados de precipitación, una notable disminución en la extensión del manto nival, el retroceso de los glaciares, así como la migración de especies hacia nuevos hábitats debido al cambio en las condiciones climáticas (IPCC, 2021b). La Figura 2-1 sintetiza los cambios observados en las últimas décadas, reflejando los aumentos, disminuciones y variaciones en la atmósfera, el océano, el hielo y superficie terrestre.



Figura 2-1: Síntesis de cambios significativos observados en el sistema climático durante las últimas décadas. Las flechas hacia arriba, hacia abajo y en círculos indican aumentos, disminuciones y cambios, respectivamente. Fuente: Adaptado de (IPPC, 2021b).

Los efectos del cambio climático no se manifiestan de manera homogénea en todo el mundo, sino que presentan patrones de cambio regionales relacionados con el aumento de la temperatura global. El Ártico experimenta un calentamiento más intenso que otras regiones, el hemisferio norte se calienta más que el sur, y la superficie terrestre se calienta más que el océano. De manera similar, las precipitaciones aumentan en las latitudes altas y los trópicos, pero disminuyen en las regiones subtropicales. Estos patrones de cambio se vuelven más evidentes a medida que el calentamiento global aumenta, permitiendo prever consecuencias regionales específicas basadas en el nivel de calentamiento alcanzado (IPCC, 2021c). La Figura 2-2 muestra estas variaciones regionales en temperatura y precipitación, comparando los periodos en los que la temperatura media global ha aumentado en 1,5°C (arriba) y 3°C (abajo) respecto al clima de 1850-1900, utilizando proyecciones de 31 modelos CMIP6 bajo el escenario de altas emisiones SSP3-7.0.

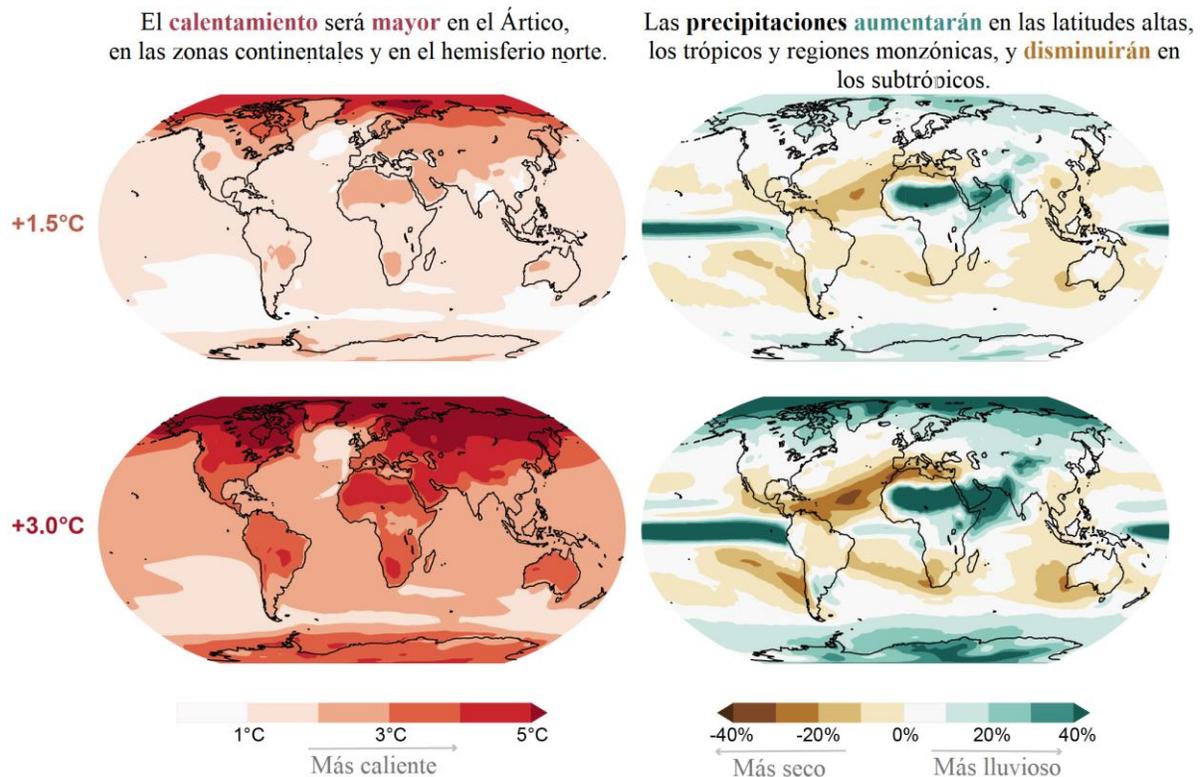


Figura 2-2: Cambios regionales proyectados en la temperatura (izquierda) y precipitación (derecha) en relación con el clima de 1850-1900, basado en 31 modelos del CMIP6 y escenario SSP3-7.0. Fuente: Adaptado de (IPPC, 2021c).

2.2 Escenarios de cambio climático

Si bien, el clima experimenta una variabilidad de origen natural, el cambio climático actual se ve en gran magnitud impulsado por actividades humanas, dadas principalmente por emisiones de gases de efecto invernadero. Las emisiones son el resultado de una serie de factores socioeconómicos, tecnológicos y demográficos (Government of Canada, 2021).

Ante la incertidumbre de estas proyecciones a futuro, es de utilidad generar una variedad de escenarios que representen diferentes trayectorias de emisiones y cambios en el uso del suelo futuro. Estas trayectorias futuras (escenarios) se consideran equiprobables, ya que ni el IPCC ni el CMIP les asigna una probabilidad específica. De esta forma, estos escenarios sirven como entrada para los modelos de cambio climático, proporcionando una visión de cómo las acciones antrópicas actuales y futuras podrían afectar al clima en la tierra (Government of Canada, 2021).

Los escenarios para las proyecciones futuras han pasado por varias actualizaciones, siendo la última iteración de escenarios, las Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSPs, por sus siglas en inglés), utilizadas para CMIP6 (2016-2021) y el Sexto informe del IPCC (AR6) (2021). Los escenarios SSP combinan elementos del desarrollo social futuro con las trayectorias de concentraciones definidas en la iteración anterior de escenarios, conocida como Trayectorias de Concentración Representativas (RCP) (Government of Canada, 2023). Los escenarios RCPs describen las trayectorias de cambio en las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero y aerosoles a lo largo del tiempo. Por otro lado, los escenarios SSPs, presentan

panoramas alternativos sobre cómo podría desarrollarse el mundo en el próximo siglo sin considerar una política climática (Government of Canada, 2023).

Los escenarios como el RCP o SSP, presentan un número asociado (ejemplo: RCP8.5) que indica el nivel de forzamiento radiativo para el año 2100. Este valor se mide en Watt por metro cuadrado y varía entre los 1,9 a 8,5 [W/m²] (Government of Canada, 2023). El primer número en el escenario SSP representa la trayectoria socioeconómica. En la Figura 2-3 se observan los cinco escenarios SSP enumerados junto a algunas combinaciones posibles, además de los escenarios RCP asociados a estos.

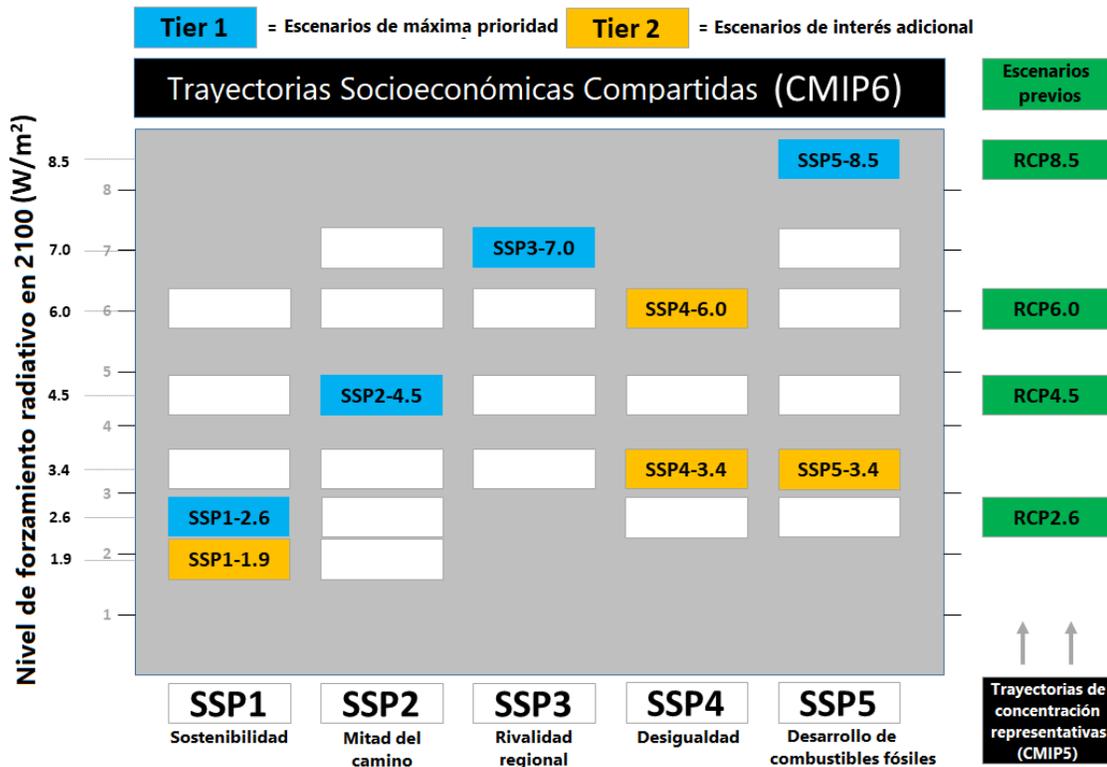


Figura 2-3: Esquemas de escenarios SSP y forzamiento radiativo para el año 2100 utilizadas en el Escenario MIP. Fuente: Adaptado de (Government of Canada, 2023).

En este contexto, se puede denominar “pesimista” a escenarios como el SSP5-8.5 o RCP-8.5 en relación con un futuro de altas emisiones de gases de efecto invernadero sin acciones significativas de mitigación. Esto puede reflejar un contexto desfavorable para algunas variables climáticas, como el aumento de la temperatura. Sin embargo, en otros aspectos, como los caudales o ciertos parámetros hidrológicos, el impacto podría ser diferente y no necesariamente negativo.

En la Figura 2-4 se pueden observar las proyecciones climáticas bajo escenarios SSPs, tomando la línea de base histórica entre 1995-2014, de la temperatura media global de la superficie (TAS por sus siglas en inglés) y la precipitación anual global (PR). Las líneas gruesas representan las medias del conjunto y la zona sombreada representa un aproximado del intervalo de confianza del 5 % al 95 % alrededor de la media de una distribución normal (Tebaldi et al., 2021).

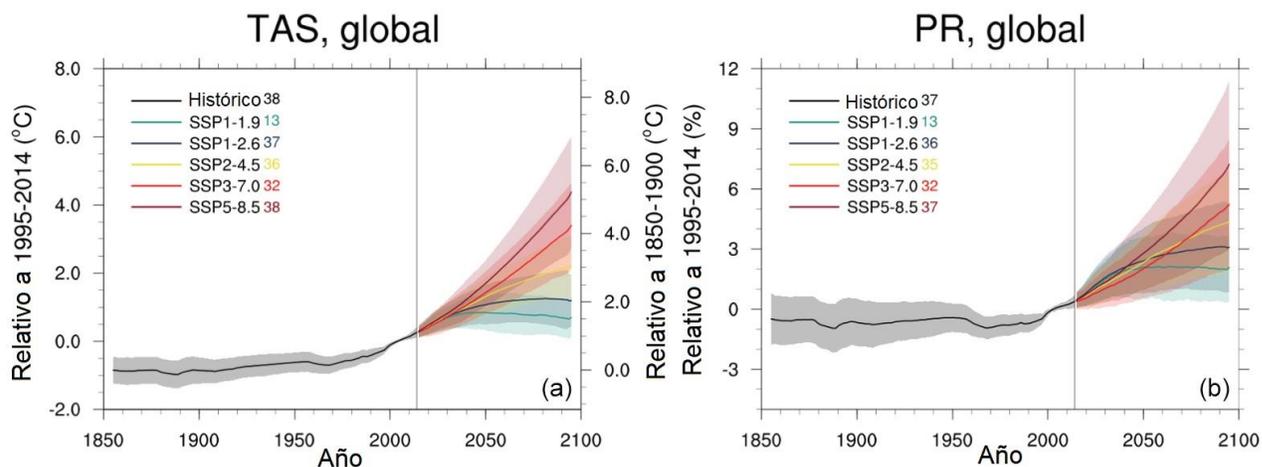


Figura 2-4: Proyecciones climáticas relativas al período 1985-2014 bajo escenarios SSP de la temperatura media global de la superficie (TAS) y la precipitación anual global (PR). Fuente: Adaptado de (Tebaldi et al., 2021).

2.3 Modelos de Circulación General (GCM)

Con el fin de enfrentar los desafíos de los diferentes escenarios previstos frente al cambio climático global, es que se realizan distintos estudios hidrológicos para estimar la disponibilidad hídrica a futuro. Para ello, se generan proyecciones climáticas a partir de modelos de circulación general, desarrollados por diferentes instituciones alrededor del mundo (Copernicus, 2024; IPCC, 2021).

Dentro del ámbito de los modelos climáticos, el Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP, por sus siglas en inglés) cumple un papel de gran importancia. El CMIP es un proyecto que inició en 1995 y pertenece al Programa Mundial de Investigaciones Climáticas (WCRP, por sus siglas en inglés). Este provee proyecciones climáticas con el objetivo de entender el pasado, presente y futuro del cambio climático (WCRP, 2024). Dentro de estos existen varias fases del proyecto como lo son el CMIP3, CMIP5 y CMIP6, siendo esta última, comunicada en el 2021, la más reciente. Actualmente, se está trabajando en una séptima fase del CMIP, siempre en búsqueda de una mejor estimación de las proyecciones.

Un modelo climático es una herramienta informática para prever y representar el comportamiento presente y futuro del clima en la tierra. Utiliza datos sobre la atmósfera, el océano, superficie terrestre, entre otros, para simular cómo interactúan estos componentes y cómo podrían cambiar en el futuro debido a diversos factores, como actividades humanas y fenómenos naturales. Esto proporciona una mejor comprensión de las posibles consecuencias de estos cambios bajo diferentes escenarios (WCRP, 2024). Es importante destacar que, debido a la complejidad de representar todas las variables atmosféricas, se requieren simplificaciones que permitan realizar los cálculos.

2.4 Escalamiento (Downscaling)

Los GCM trabajan con resoluciones espaciales gruesas (100-300 km) en comparación a escalas requeridas en estudios hidrológicos locales (Figura 2-5), por lo que considerando las complejidades topográficas o de otra índole en cada zona de estudio, surge la necesidad de contar con resoluciones más finas (Seria Ríos, 2023). De esta forma, se han desarrollado métodos de escalamiento o Downscaling los que se pueden dividir en dos grandes tipos: escalamiento dinámico (*regional climate models*, RCMs) y escalamiento estadístico (*statistical downscaling*, SD) (Chen et al., 2011). La elección de cada método depende de los requerimientos y recursos disponibles para su ejecución. El escalamiento dinámico permite tener una resolución mayor de los GCM, pero el principal problema de este es su alto costo computacional. Por otra parte, el escalamiento estadístico es más económico y fácil de implementar (Chen et al., 2011).

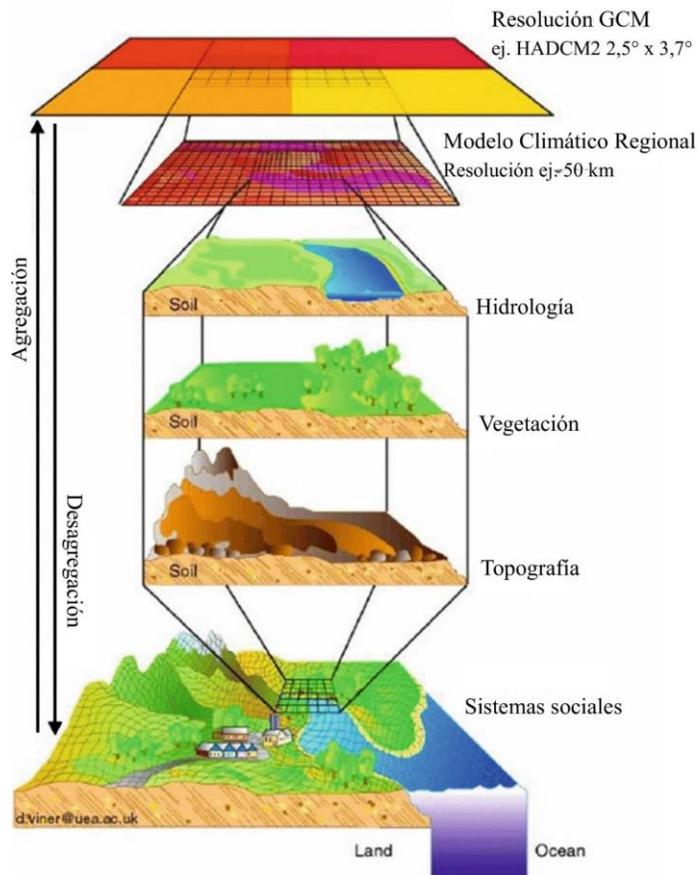


Figura 2-5: Escalamiento espacial. Adaptado de Viner (2012).

Dentro del escalamiento estadístico se pueden encontrar métodos de corrección de sesgo sistemático como el *Quantile Delta Mapping* (QDM) y el *Multivariate quantile mapping bias correction* (MBCn). El algoritmo del QDM ajusta las propiedades de las distribuciones de probabilidad de las series de datos climáticos proyectados para que sean más similares a las observaciones históricas. Se basa en la diferencia entre los cuantiles de las proyecciones del modelo y los datos observados (Cannon, Sobie, & Murdock, 2015), siendo útil para trabajar con solo una variable climática, como la temperatura o la precipitación. Por otro lado, el MBCn es una técnica más compleja que corrige el sesgo en los datos climáticos modelados al considerar múltiples

variables simultáneamente. A diferencia del QDM, este método no solo ajusta las distribuciones individuales de cada variable, sino que también tiene en cuenta las relaciones y dependencias entre estas variables (Cannon, 2018).

2.5 Sequías

Las sequías son fenómenos naturales con consecuencias significativas tanto para las personas como para el entorno, con impactos negativos en los ámbitos social, económico y ecológico. El cambio climático está incrementando la frecuencia de estos eventos al alterar el ciclo hidrológico, lo que resulta en escasez de precipitaciones y aumento en la ocurrencia de eventos climáticos extremos (Ndayiragije & Li, 2022). La definición de sequía abarca una amplia variedad de percepciones, como se refleja en la diversidad de índices disponibles. Esto dificulta la tarea de definir de manera precisa el concepto de sequía. No obstante, la mayoría de las personas definen la sequía como una escasez extrema de precipitaciones (Zargar et al., 2011).

Según Zargar, en base a una definición operativa de sequía, esta se puede clasificar en tres tipos: meteorológica, agrícola e hidrológica. Así, indican que estas siguen una secuencia específica (Figura 2-6), ocurriendo primero déficit de precipitación que inicia la sequía meteorológica, la que posteriormente impacta al contenido de humedad del suelo (conocida como sequía agrícola). De esta manera, la baja recarga de agua del suelo a elementos hídricos provoca una sequía hidrológica retardada. Además de la clasificación antes mencionada, Zargar indica que las sequías se pueden caracterizar en tres dimensiones: severidad, duración y distribución espacial.

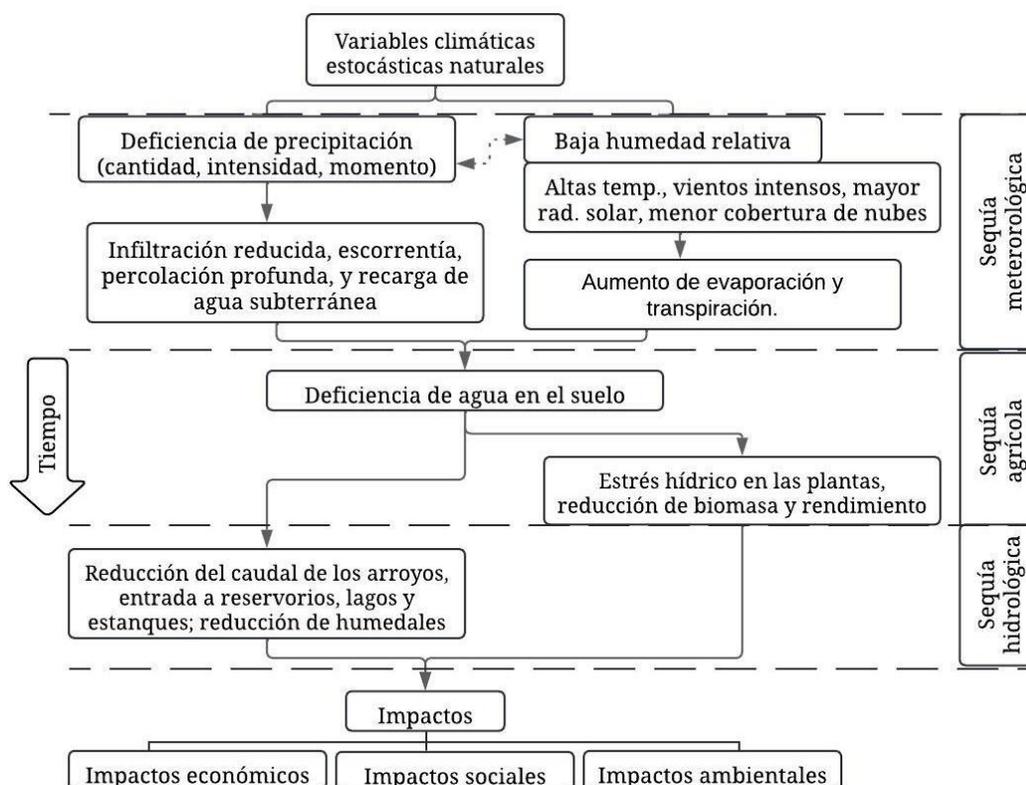


Figura 2-6: La secuencia general de los diferentes tipos de sequía. Fuente: Adaptado (Zargar et al., 2011).

En la actualidad existe una gran variedad de índices de sequías, como los son el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI, por sus siglas en inglés), Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración (SPEI, por sus siglas en inglés), Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés), Porcentaje de Precipitación Normal (PPN), Índice de Severidad de Sequía de Palmer (PDSI, por sus siglas en inglés), Índice de Sequía Hidrológica de Palmer (PHDI, por sus siglas en inglés), entre otros, los que son mencionados por diferentes autores (Ndayiragije & Li, 2022; Zargar et al., 2011).

En la Tabla 2-1 se presentan algunos índices junto a las variables/forzantes necesarias para su cálculo construidos a partir de la información de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y la Asociación Mundial para el Agua (2016). La organización clasifica los indicadores o índices según la “facilidad de uso” a partir de criterios definidos, donde la facilidad se representa en el siguiente orden de colores partiendo por el más simple: verde, amarillo y rojo.

Tabla 2-1: Índices de sequía junto a las forzantes necesarias para su cálculo. Adaptado de (Organización Meteorológica Mundial [OMM] y Asociación Mundial para el Agua, 2016)

Índices de sequía	Facilidad	Variables
SPI	Verde	Precipitación.
Deciles	Verde	Precipitación.
NDVI	Verde	Satélite (Banda visible roja (R), bandas cercanas al infrarrojo (NIR))
SPEI	Amarillo	Precipitación y temperatura.
PDSI	Amarillo	Precipitación, temperatura y contenido de agua disponible.
PHDI	Amarillo	Precipitación, temperatura, contenido de agua disponible.

3 ZONA DE ESTUDIO

3.1 Antecedentes Generales

La Isla de Rapa Nui, está ubicada en medio del Océano Pacífico Sur (Lat. -27.119° , Lon. -109.354°) y, administrativamente, forma parte de la Región de Valparaíso, Chile. Con una extensión territorial de 164 km², ubicada a 3.760 km de Caldera, Rapa Nui se destaca por su origen volcánico y su forma triangular, definida por la presencia de tres volcanes inactivos en sus extremos (Milad, 2010). El volcán Ma'unga Terevaka, situado en el extremo norte de la isla, es el punto más alto de Rapa Nui, alcanzando una altitud de 507 metros sobre el nivel del mar. En los otros dos vértices se encuentran los volcanes Poike, en el extremo este, y Rano Kau, en el extremo suroeste. Estos tres volcanes conforman la estructura geomorfológica principal de la isla (Figura 3-1).

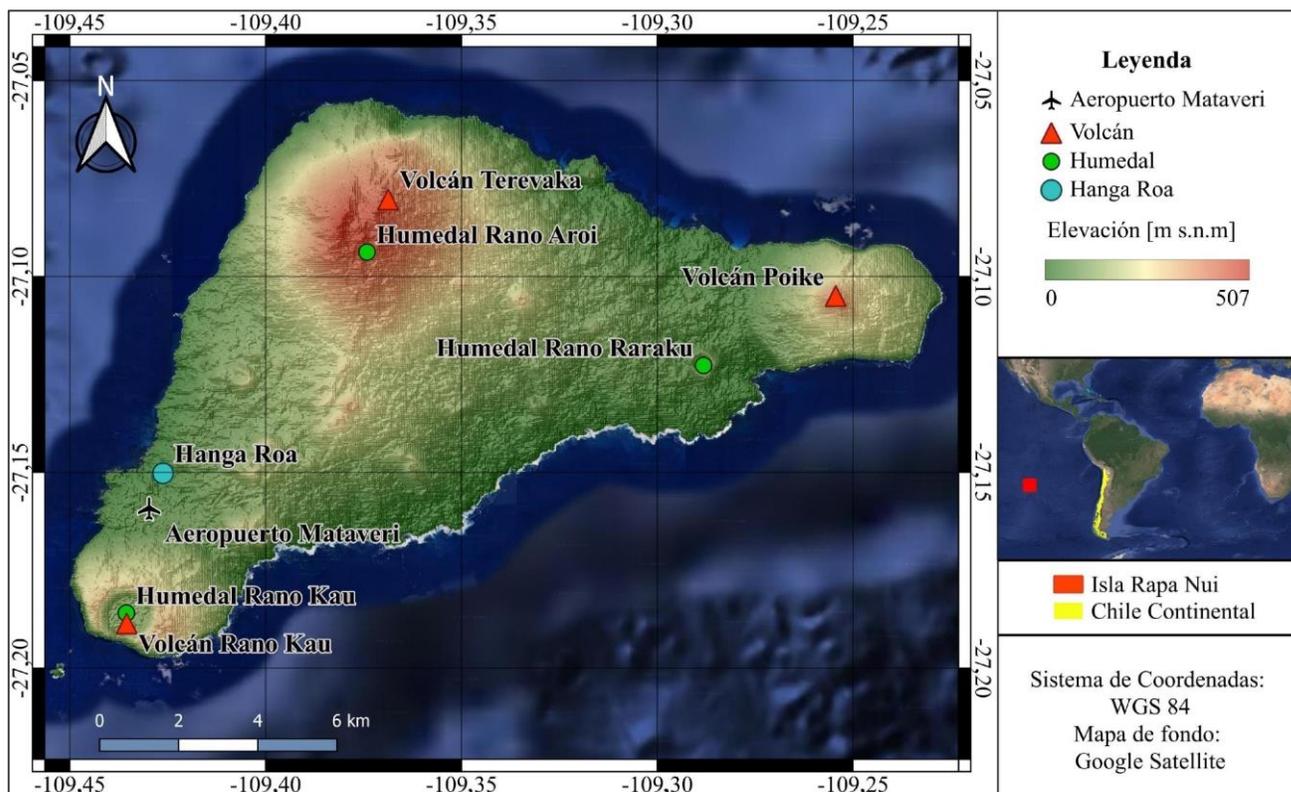


Figura 3-1: Mapa de la Isla de Rapa Nui con lugares característicos.

En la práctica profesional realizada en febrero del año 2024¹ se pudieron reconocer los siguientes problemas:

- Erosión significativa del suelo, especialmente en la zona de Poike, donde se ha producido un desprendimiento notable de la capa superficial
- Salinidad elevada en el agua de los pozos, lo que sugiere una posible intrusión salina.

¹ Práctica profesional III a cargo del Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

- Presencia generalizada de plantas invasoras, que son poco nutritivas. Además, la isla está habitada por animales introducidos, como bovinos y equinos, que se alimentan de estas plantas.
- Tuberías abandonadas, entre otras, ubicadas en puntos circundantes a los humedales.



Figura 3-2: Imágenes de sectores en Isla de Rapa Nui. Imagen a) Bovino en la isla b) y c) Tuberías abandonadas aledañas y dentro de cauce Ava Ranga Uka.

3.2 Población y actividades económicas

La población de Rapa Nui, compuesta por aproximadamente 7.750 habitantes según el Censo 2017 (Instituto Nacional de Estadísticas, 2017), se concentra mayoritariamente en la ciudad de Hanga Roa. De este total, el 94% vive en área urbanas y el 6% restante reside en zonas rurales. Además, es importante señalar que una gran parte de la población está compuesta por personas no originarias de Rapa Nui (Tabla 3-1).

Tabla 3-1: Población Rapa Nui y no Rapa Nui, construido a partir de datos del CENSO (INE, 2017).

CENSO 2017	Población
Rapa Nui	3.512 (45,3%)
No rapa nui	4.238 (56,0%)
Total	7.750

Nota: La población No rapa nui corresponde a la resta entre la población total y la población Rapa Nui.

La economía local se basa en la pesca y, en particular, en el turismo, que ha experimentado un crecimiento significativo desde la década de 1960, alcanzando un número de 149.915 visitantes en el año 2018. Este aumento de visitantes no solo ha aportado en el desarrollo económico de la zona, sino que también ha aumentado la población flotante, compuesta principalmente por turistas y trabajadores continentales (Gundermann & Rojas, 2021), Sin embargo, el flujo turístico provoca un aumento en las necesidades de agua para consumo y un incremento en la generación de residuos. Esta situación aumenta el riesgo de contaminación del acuífero, lo que podría disminuir la disponibilidad de agua para consumo humano (Milad, 2010).

3.3 Geomorfología y uso de suelo

3.3.1 Origen volcánico

La isla Rapa Nui es de origen volcánico y, en términos geológicos, catalogada como “muy joven”. Dataciones radiométricas de rocas volcánicas indican que los eventos eruptivos más antiguos son de tan solo 3 millones de años (Ingeniería Agrícola Ltda., 1998). La formación de la isla puede dividirse en dos fases principales: submarina y aérea. La fase submarina se refiere a la acumulación de lava en el fondo marino debido a la interacción de la Placa Nazca con puntos calientes (hotspots), dando lugar al levantamiento volcánico submarino (González-Ferrán et al., 2004). Posteriormente, en la fase subaérea, los volcanes emergieron sobre el nivel del mar formando la configuración actual de la isla.

Como se puede observar en el Mapa Geológico de la isla de Rapa Nui (Figura 3-3), la zona se caracteriza por la presencia de tres volcanes principales: Terevaka, Rano Kau y Poike. El volcán Terevaka es el más joven y extenso en términos de superficie y volumen emitido. Compuesto por un sistema de fracturas orientadas en dirección norte-sur, el Terevaka está formado por sucesivas coladas de lava laminares y depósitos piroclásticos, constituyendo un total de alrededor de 104 centros volcánicos (Ingeniería Agrícola Ltda., 1998).

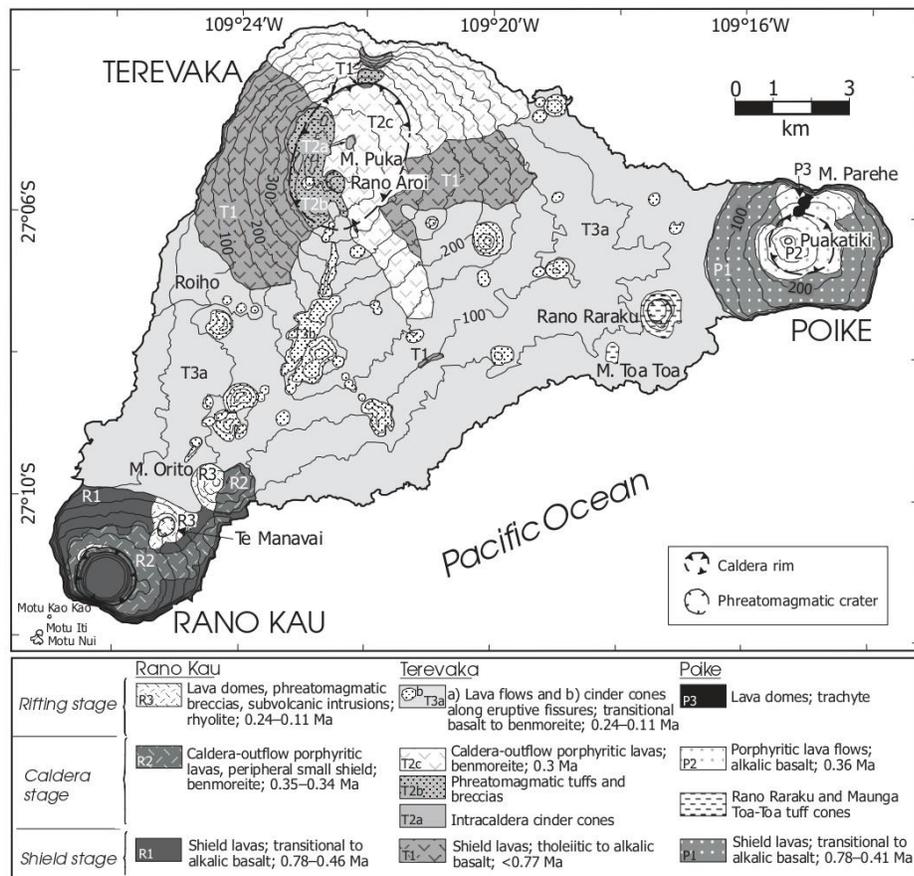


Figura 3-3: Mapa geológico de la Isla de Rapa Nui, basado en el análisis de campo. Fuente: (Vezzoli & Acocella, 2009).

En el extremo sur de la isla se encuentra el volcán Rano Kau, conocido por su caldera circular de aproximadamente 1000 metros de diámetro. En este se alberga una zona semi-pantanososa con masas de agua y vegetación, el humedal Rano Kau (Ingeniería Agrícola Ltda., 1998).

Poike, ubicado al noreste, es el volcán más antiguo y presenta una composición de lavas basales principalmente de basaltos olivínicos y hawaiitos, alternadas con niveles de piroclastos (González-Ferrán et al., 2004). Tiene una forma cónica típica y contiene un cráter circular de unos 145 m (Ingeniería Agrícola Ltda., 1998).

Al sur de Poike se encuentra el volcán Rano Raraku, que se cree producto de una erupción fisural subacuática de este. Este volcán es conocido por su cantera de toba, lugar de extracción de bloques de piedra para esculpir los famosos moái (Imagen 3-1). El cráter de Rano Raraku tiene un diámetro de unos 250 m (Ingeniería Agrícola Ltda., 1998) y contiene al humedal Rano Raraku, actualmente seco.



Imagen 3-1: Fotografía de moái en laderas del volcán Rano Raraku.

3.3.2 Tipo de suelo

Los suelos superficiales en la mayor parte de la isla son de un carácter limo arenoso, evolucionados a partir de depósitos de ceniza volcánica. Estos suelos son similares a los Andisoles (o trumaos) del sur de Chile y se caracterizan por una tonalidad de castaño a rojizo ferruginoso, con espesores que varían de 1,5 a 2,5 mm. Este tipo de suelo es suelto y poco compacto, cuando está seco se vuelve polvoriento, mientras que en condiciones húmedas es ligeramente plástico (Edmunds, 2007).

A pesar de que el suelo superficial se forma por sedimentos no consolidados (arcillas, limos y arenas), una gran parte del suelo de la isla se encuentra formado por lavas altamente porosas y fracturadas (DGA, 2010). Esta composición influye en la permeabilidad del suelo, que en la

mayoría de la isla es de media a alta, facilitando la infiltración y almacenamiento del agua (DGA, 2010).

El origen volcánico de la Isla determina las características del subsuelo, compuesto mayoritariamente por coladas de lava de tipo basáltico. Las lavas, al ser de baja viscosidad y alta fluidez, forman capas delgadas y de poca pendiente, lo que genera un suelo con numerosas vesículas y fracturas, resultado de su rápido enfriamiento (DGA, 2010).

Es relevante señalar que la isla experimenta un proceso generalizado de erosión que afecta severamente ciertos sectores como Poike, Maunga Tea Tea, Rano Raraku y en la zona norte de los faldeos del volcán Rano Kau. La erosión, impulsada principalmente por la lluvia y el viento, desgasta los suelos expuestos y altera su estructura (Ministerio de Agricultura, 2021). La Imagen 3.1 muestra una fotografía del suelo cercano a Rano Raraku y, en la parte superior, en específico en la zona de los acantilados, el área de Poike, donde se aprecia el tono rojizo del suelo, resultado de la erosión del lugar.



Imagen 3-2: Fotografía tomada en las laderas de volcán Rano Raraku donde se observa la costa de la isla, cercano al volcán Poike (al norte en la zona erosionada).

3.3.3 Cobertura de suelo

En la Figura 3-4 se presenta un mapa con la cobertura de suelo de la isla de Rapa Nui, construido a partir de la información de la Corporación Nacional Forestal (CONAF, 2019). Un 77% de la zona insular corresponde a praderas y matorrales, seguido de un 11% de terreno agrícola y un 6,6% de bosques. Existe aproximadamente un 0,6 % de cuerpos de agua, constituidos por los tres humedales, de los cuales uno de ellos se encuentra actualmente seco. El área urbana es de un 3,5%, donde la mayoría corresponde al sector poblado de Hanga Roa, por lo que el 96,5% restante es área rural.

En la Tabla 3-2 se muestra el detalle de los porcentajes de cobertura de suelo, obtenidos a partir de la información de la CONAF.

Tabla 3-2: Porcentaje de cobertura de suelo Isla Rapa Nui, a partir de datos de CONAF (2019).

Cobertura de suelo	Porcentaje de suelo [%]
Áreas Desprovistas de Vegetación	1,4
Áreas Urbanas e Industriales	3,5
Bosques	6,6
Cuerpos de Agua/ Humedales	0,6
Praderas y Matorrales	76,7
Terrenos Agrícolas	11,1

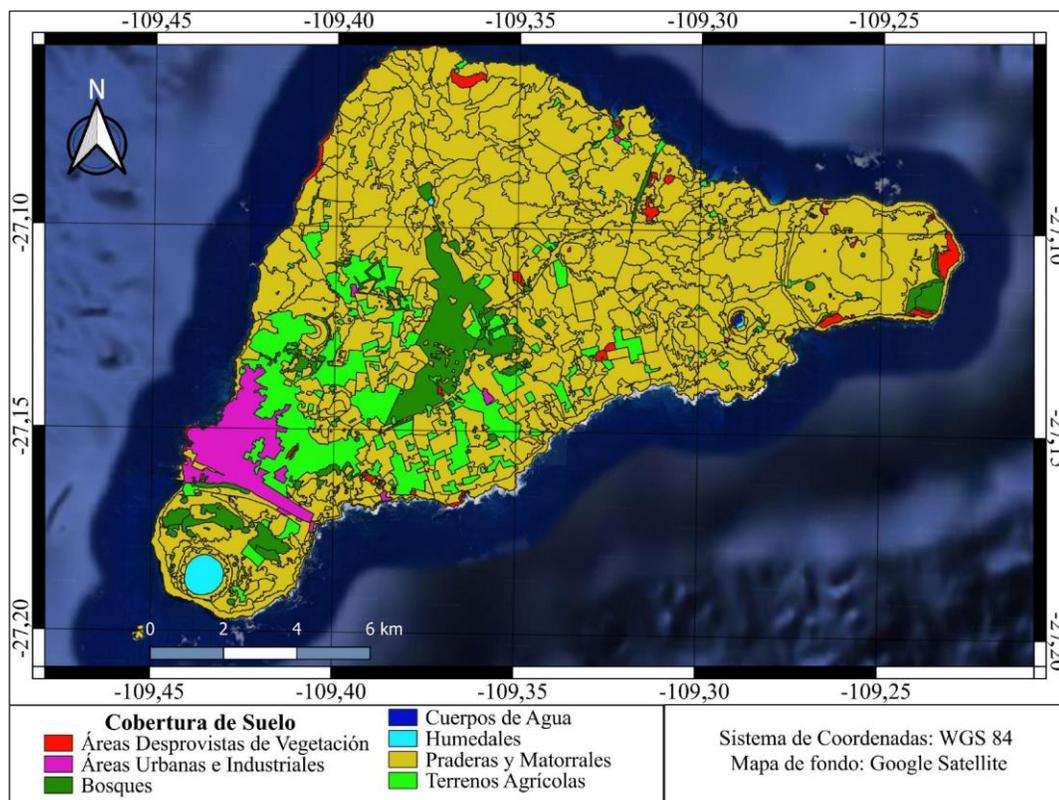


Figura 3-4: Cobertura de suelo en la Isla de Rapanui, a partir de datos de CONAF (2019).

3.3.4 Humedales

La isla presenta 3 humedales (Imagen 3-3): Rano Aroi (a), Rano Kau (b) y Rano Raraku (c).



Imagen 3-3: Humedales en la Isla de Rapa Nui (a) Rano Aroi, (b) Rano Kau y (c) Rano Raraku.

En octubre de 2022, un devastador incendio forestal intencional afectó a uno de los sectores más emblemáticos de la isla de Rapa Nui, el Humedal Rano Raraku, abarcando más de 250 hectáreas del Parque Nacional Rapa Nui. Esta tragedia representó la mayor catástrofe ecológica y patrimonial registrada en la isla en tiempos modernos, con pérdidas incuantificables y daños irreversibles a valiosos bienes arqueológicos (CONAF et al., 2024).

El humedal previo al evento catastrófico se secó por completo en marzo del año 2018, donde en mayo del mismo año, debido a fuertes lluvias el humedal se volvió a llenar. Sin embargo, la disminución de eventos de precipitación provocó que el año 2019 el humedal se secase nuevamente por completo (Edmunds, 2023). El humedal también ha sufrido de extracciones de agua dulce para la ganadería de predios cercanos, lo que se evidencia por la presencia de tuberías en las cercanías para la extracción de agua, afirmando una acción antrópica sobre el cuerpo de agua (Edmunds, 2023).

3.3.5 Topografía

La curva hipsométrica que se presenta en la Figura 3-5 representa el porcentaje de área de la superficie que existe por encima de cierta cota determinada. Esta fue construida a partir del modelo de elevación digital (DEM, por sus siglas en inglés) *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Arc-Second Global versión 3.0* (NASA JPL, 2013). La isla no presenta mayores alturas como las que se pueden observar en Chile continental, pero alrededor del 90% del área de la isla se encuentra sobre los 200 [m s.n.m.].

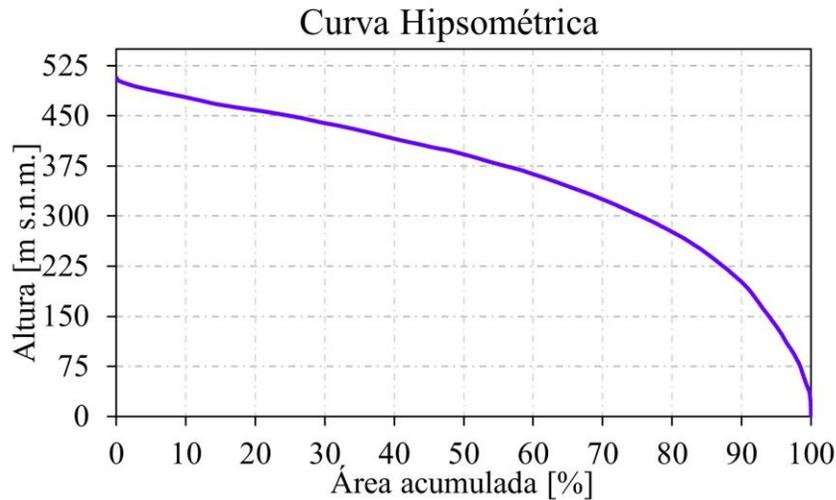


Figura 3-5: Curva hipsométrica de la Isla de Rapa Nui construido con DEM perteneciente a la USGS.

3.4 Clima e Hidrología

Las observaciones meteorológicas se basan en el registro de cuatro estaciones: Mataveri, Vaitea, Poike y Hanga Roa (DGA, 2019). Para el análisis, se eligió la Estación meteorológica Mataveri debido a la extensión y fácil accesibilidad de sus datos. La estación (Tabla 3-3) cuenta con mediciones diarias de diferentes variables meteorológicas, dentro de las que se tiene la precipitación, temperatura promedio, máxima y mínima, con un registro de datos bastante completo y sin grandes vacíos.

Tabla 3-3: Información Estación Mataveri. DMC.cl

Nombre Estación	Mataveri Isla de Pascua Ap.	
Código Nacional	270001	
Propietario	DMC	
Ubicación	Aeropuerto Mataveri	
Altitud [m s.n.m.]	69	
Latitud	27,16°	
Longitud	109,43°	

Imagen 3-4: Fotografía de Estación Mataveri

En la Figura 3-6 se presenta un climograma, que muestra la distribución promedio de la precipitación, temperatura máxima, mínima y media, construido a partir de los datos de la estación Mataveri durante el periodo 1991-2020. En términos climáticos se tiene una alta precipitación anual, con un promedio de 1127 mm, donde las lluvias son frecuentes a lo largo del año, aunque con algunas fluctuaciones. Las precipitaciones alcanzan sus valores máximos entre los meses de abril a julio con un valor máximo mensual promedio de 123 mm en el mes de abril, mientras que el valor mínimo se registra en febrero, con aproximadamente 67 mm. La temperatura media anual es de 20,6 °C, registrándose los valores más elevados en los meses de enero, febrero y marzo. Las

fluctuaciones estacionales de la temperatura son moderadas, oscilando entre 5 y 6 °C, sin que se presenten variaciones demasiado pronunciadas.

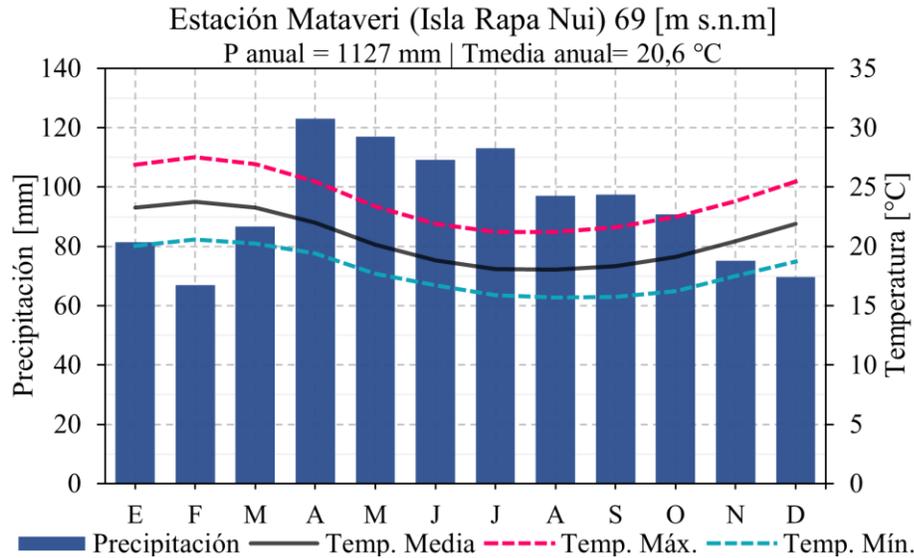


Figura 3-6: Climograma construido a partir de observaciones de la Estación Mataveri. Periodo 1991-2020.

Considerando que las temperaturas medias mensuales durante todo el año superan los 18°C y que la precipitación del mes más seco, correspondiente a febrero, es en promedio 66,9 mm siendo mayor a 60 mm, según la clasificación de Köppen (Arnfield, 2024), el clima de la isla se puede clasificar como tropical húmedo (Af).

En la Figura 3-7 se observa una tendencia a la disminución de las precipitaciones anuales en aproximadamente 7 mm/año durante el periodo 1970-2023, siendo 2022 el año más seco y 1979 el más lluvioso. En especial desde el año 2010, las magnitudes de precipitación varían entre aproximadamente los 600 a 1100 mm con un promedio de 850 mm entre 2010 y 2023. La precipitación promedio anual en el periodo 1981-2010 es de 1228 mm, es decir, 100 mm más que el promedio anual del periodo 1991-2020 de 1127 mm.

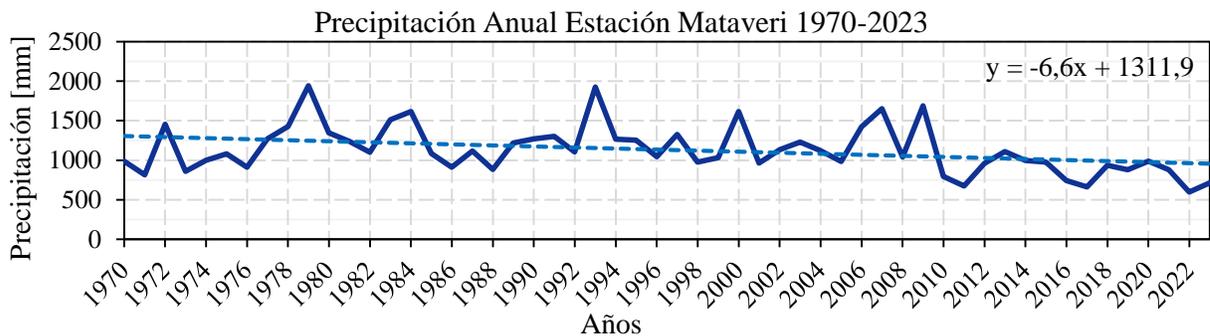


Figura 3-7: Precipitaciones anuales estación Mataveri 1970-2023. Línea segmentada indica la línea de tendencia de las precipitaciones anuales.

La precipitación presenta una variabilidad intermensual que se observa en el climograma previo y en la Figura 3-8, evidenciada por la dispersión de los valores. Además, se observa la presencia de

puntos atípicos (outliers) en diferentes meses, donde el mes de septiembre alcanza el máximo valor de aproximadamente 400 mm.

La Figura 3-8 presenta las curvas de variación estacional con diagramas de caja de la temperatura media, máxima y mínima. Complementado al climograma, se observa una clara estacionalidad, con las temperaturas más altas en verano (DEF) y las más bajas en invierno (JJA). La variabilidad de cada mes para los tres casos no es tan pronunciada, lo que sugiere un comportamiento más homogéneo en las temperaturas dentro de un mismo mes.

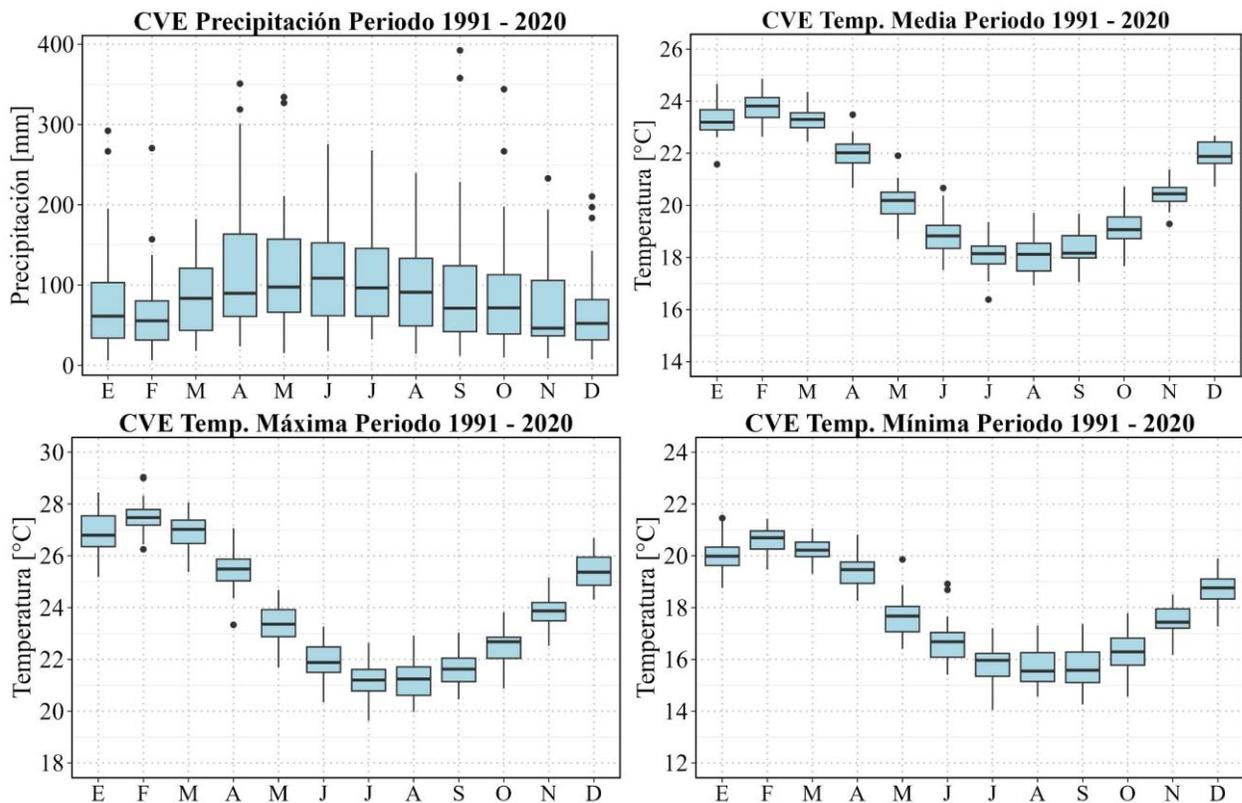


Figura 3-8: Curvas de variación estacional de la precipitación, temperatura media, máxima y mínima de datos de la estación Mataveri en el periodo 1991-2020.

La distribución de precipitación y temperaturas diarias se presentan en la Figura 3-9. Por un lado, la precipitación no muestra un gran cambio entre los periodos 1981-2010 y 1991-2020. Los valores de mayor magnitud presentan baja probabilidad de ocurrencia. Aun así, en el periodo 1981-2010 los valores mayores a 17,8 mm tienen una probabilidad por debajo del 5%, mientras que en el periodo 1991-2020 disminuyen a 15,6 mm para la misma probabilidad.

Por otra parte, las curvas de duración de las temperaturas exhiben un comportamiento similar respecto a la forma para las tres variables de temperatura (máxima, media y mínima). En todos los casos, los eventos extremos son poco frecuentes. Para la temperatura media los valores mayores a 24,2 °C tienen una probabilidad de excedencia del 5%, mientras que los valores inferiores a 16,6°C tienen una probabilidad de ocurrencia del 5%, lo que implica que el 95% del tiempo la temperatura media se encuentra por sobre este umbral.

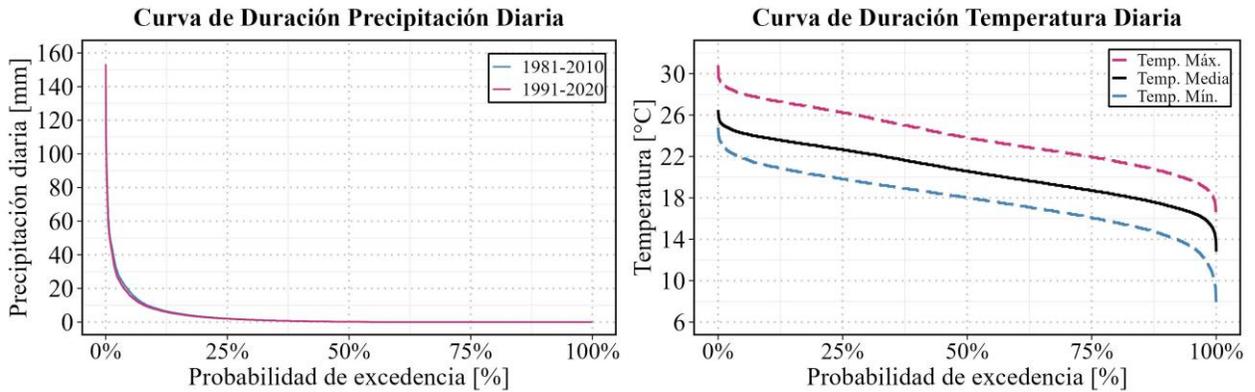


Figura 3-9: Curvas de duración a partir de observaciones de la Estación Mataveri.

3.5 Servicio de Agua Potable

La extracción, potabilización y distribución del agua subterránea en la isla está a cargo de la Sociedad Agrícola de Servicios Isla de Pascua SpA. (SASIPA). La isla no cuenta con un sistema de alcantarillado público, sino que más del 90% de las viviendas tiene pozos de filtración (pozos negros) (SASIPA, 2024). La producción de agua potable consta de seis pozos ubicados en diferentes puntos de la isla, donde el agua se extrae por bombas, pasa por un proceso de desinfección y se impulsa hacia siete estanques de acumulación (SASIPA, 2023).

Según el Reporte de sostenibilidad 2022-2023 de SASIPA (2023), durante el 2023 la empresa produjo 1.717 mil m³ de agua potable con un promedio mensual de 143 mil m³. La empresa indica que del total demandado de agua 856 mil m³ fueron vendidos a clientes y el restante corresponden a ventas internas y volumen de pérdidas (861 mil m³) que retornan al acuífero.

Además de los servicios de agua potable, SASIPA presta servicios en los ámbitos de la Generación y Distribución Eléctrica; Laboratorio Microbiológico y Carga y Descarga Marítima de las naves que operan con la ínsula.

4 METODOLOGÍA

Esta sección describe en detalle la metodología utilizada para la obtención de modelos GCM del CMIP6, corrección de series mediante el método de escalamiento MBCn, distribución espacial y cálculo de índices de sequía.

Para el análisis se define el periodo histórico 1991-2020, futuro cercano 2031-2060 (FC) y el futuro lejano 2071-2100 (FL). Estos periodos fueron seleccionados manteniendo un enfoque comparativo de 30 años climatológicos, donde el periodo histórico considera proyecciones futuras de los GCMs. En la Figura 4-1 se presenta un esquema general de la metodología.

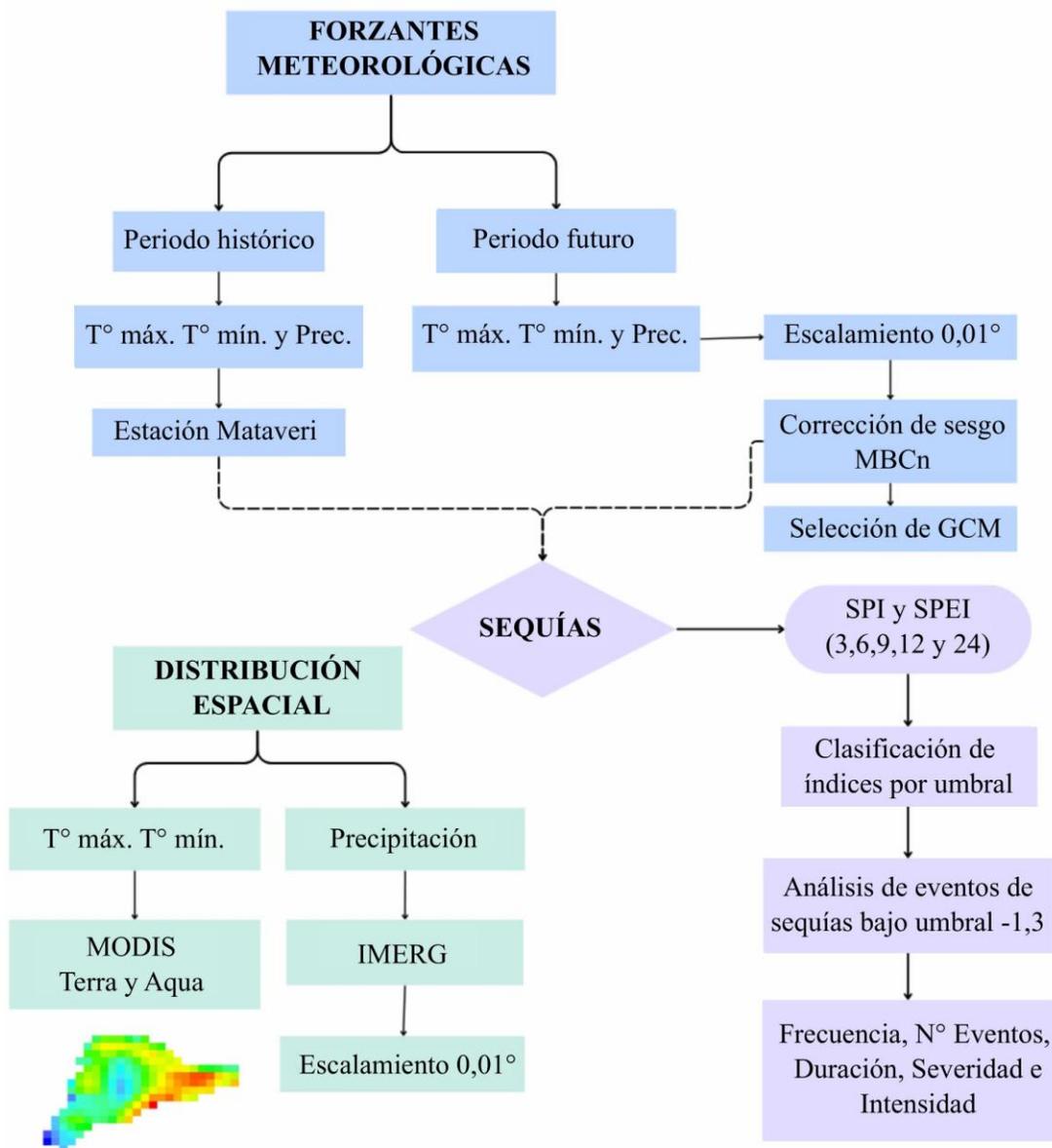


Figura 4-1: Esquema metodológico.

4.1 Cálculo de evapotranspiración

La estimación de la evapotranspiración potencial se realizó mediante el método de Thornthwaite y el método de Hargreaves con el paquete SPEI ([SPEI.cl](#)). El método de Thornthwaite (1948) se basa en la temperatura media mensual, la que para los modelos GCM se calcula como el promedio de la temperatura mínima y máxima mensual. Este método ajusta la estimación de la evapotranspiración potencial en función de la temperatura media y la latitud, que influye en la radiación solar disponible, donde se utiliza la ubicación de la estación Mataveri (latitud). Por otro parte, el método de Hargreaves (1994) incorpora tanto la temperatura mínima como la máxima mensual como variables de entrada. Este método también requiere la latitud de la estación para calcular la radiación solar incidente. Las fórmulas de ambos métodos de obtención de evapotranspiración potencial se presentan en el anexo A.1.

4.2 Modelos de Circulación General del CMIP6.

Se selecciona el escenario pesimista SSP5-8.5, con el objetivo de evaluar las proyecciones de sequía en la Isla de Rapa Nui bajo un escenario de altas emisiones. Mediante un script de descarga y el software RStudio, se descargan todos los modelos disponibles de Copernicus que permite el código, para las forzantes en el periodo histórico y proyectado (aproximadamente 31 modelos) a nivel diario. Posteriormente, se filtran los modelos de circulación general según la disponibilidad de información futura y tipo de ensamble. De esta forma, se consideran los GCM que incluyen datos de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima en el periodo histórico y futuro, con el ensamble r1i1p1f1.

Tras aplicar el filtro, resultan 13 Modelos de Circulación General (GCM, por sus siglas en inglés) pertenecientes al CMIP6, con un ensamble r1i1p1f1. Las forzantes históricas abarcan el periodo 1970-2014 y las proyectadas 2015-2100. Los modelos seleccionados se presentan en la Tabla 4-1, junto con sus respectivas resoluciones espaciales.

Tabla 4-1: Nombres y resolución espacial de GCM utilizados para obtención de índices de sequía.

Nombre GCM	Ensamble	Resolución [lon x lat]
ACCESS-CM2 (Australia)	r1i1p1f1	1,88x1,25°
CanESM5 (Canadá)	r1i1p1f1	2,81x2,79°
CMCC-ESM2 (Italia)	r1i1p1f1	1,25x0,94°
EC-Earth3-CC (Europa)	r1i1p1f1	0,70x0,70°
EC-Earth3-Veg-LR (Europa)	r1i1p1f1	1,13x1,12°
GFDL-ESM4 (EE. UU)	r1i1p1f1	1,25x1,00°
INM-CM4-8 (Rusia)	r1i1p1f1	2,00x1,50°
INM-CM5-0 (Rusia)	r1i1p1f1	2,00x1,50°
MIROC6 (Japón)	r1i1p1f1	1,41x1,40°
MPI-ESM1-2-LR (Alemania)	r1i1p1f1	1,88x1,87°

Nombre GCM	Ensamble	Resolución [lon x lat]
MRI-ESM2-0 (Japón)	r1i1p1f1	1,13x1,12°
NESM3 (China)	r1i1p1f1	1,88x1,87°
NorESM2-MM (Noruega)	r1i1p1f1	1,25x0,94°

Los datos de temperatura vienen en unidades Kelvin y la precipitación en mm/s, se realiza la conversión de Kelvin a grados Celsius ($T-273,15$) y de segundos a día ($Pr \times 60 \times 60 \times 24$).

4.3 Corrección de series mediante el método de escalamiento MBCn

Por el tamaño de la isla (164 km^2) la resolución toma especial relevancia y se hace necesario buscar un método para obtener resoluciones más representativas (finas) de las diferentes variables a analizar. De esta forma se genera un escalamiento espacial de $0,01^\circ$ a nivel diario de las forzantes precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima con el método de interpolación bilineal pertenecientes a los modelos GCM seleccionados. A modo de dimensionar las resoluciones en la Figura 4-2 se presenta el producto grillado del modelo MIROC6 para la precipitación diaria en su resolución original (figura (a)) donde la isla entra en un píxel ocupando un espacio pequeño de él. Por otro lado, la figura (b) es un zoom del producto escalado a $0,01^\circ$ y la línea roja los píxeles de $0,1^\circ$. Con una resolución de $0,1^\circ$ la zona insular se puede cubrir con 6 píxeles.

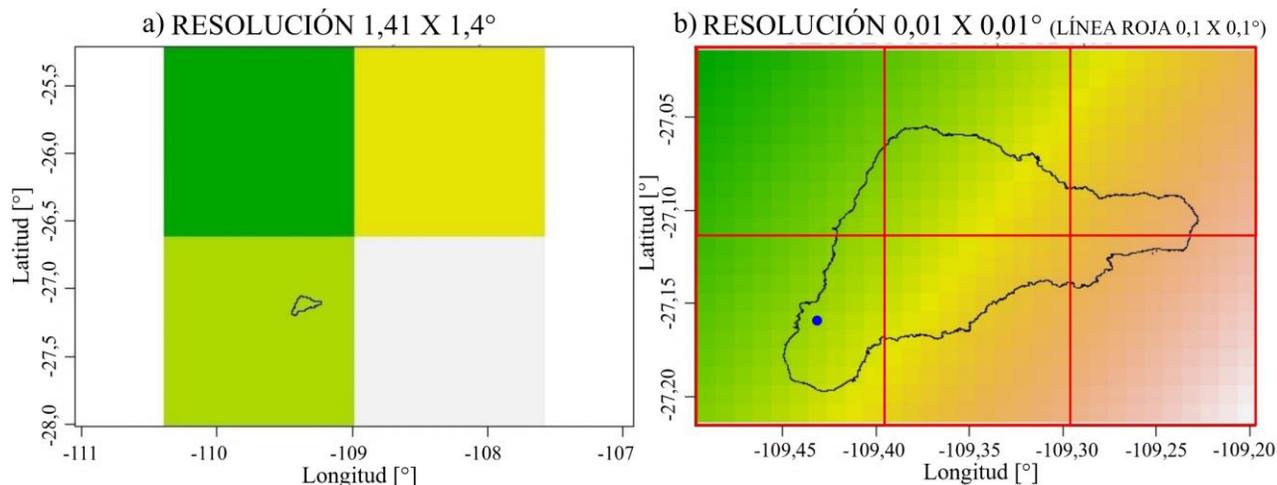


Figura 4-2: Archivo netCDF de precipitación modelo MIROC6 en la resolución original (a) y escalado espacialmente a $0,01^\circ$ con el método bilineal (b), junto a la geometría de la Isla Rapa Nui. Punto azul en figura b) corresponde a la ubicación de la estación Mataverí.

Una vez escalados los modelos para las variables de interés, se extraen los valores asociados al píxel de la estación Mataverí. Con estos datos se realiza la corrección de sesgo (o escalamiento estadístico) a nivel diario mediante el método MBCn con las tres forzantes, teniendo como base los datos de la estación Mataverí en el periodo 1970-2014.

4.4 Distribución Espacial.

La isla presenta una estación con registros extensos para las diferentes forzantes, y en base a antecedentes en terreno², se reconoce que la distribución es bastante variada en la zona insular. De esta forma surge la necesidad de representar la distribución de las forzantes en el territorio insular.

Se presentan las metodologías para la obtención de la distribución espacial de la precipitación con IMERG y temperaturas con MODIS. Los datos de ambos productos satelitales fueron obtenidos mediante scripts en la plataforma de análisis geoespacial *Google Earth Engine* (GEE).

4.4.1 Distribución Precipitación

Se considera para la distribución espacial de la precipitación el producto satelital IMERG del *Global Precipitation Measurement* (GPM). Los datos de precipitación presentan una resolución espacial de $0,1^\circ$ (o aproximadamente 10 km x 10 km) y resolución temporal de 30 minutos (Tabla 4-2). La forzante viene en unidades de mm/hr y el tiempo en tiempo universal coordinado (UTC, por sus siglas en inglés), por ello se realiza la conversión de mm/hr a mm/min ($Pr \times 0,5$) y se agrega a una escala temporal diaria. La información inicial viene repartida en datos por pixeles, por lo que se construye un producto grillado con la unión de 20 pixeles. Para ubicar espacialmente los pixeles se toma una grilla base del producto IMERG de un día.

Tabla 4-2: Información producto satelital IMERG.

Producto	Variable	Resolución Temporal	Resolución Espacial	Cobertura Espacial	Cobertura Temporal
IMERG (GPM_3IMERGHH_V06)	Prec. [mm/hr]	30 min	$0,1^\circ \times 0,1^\circ$ [lat/lon]	Global	2000/06/01- 2021/09/30

La metodología consiste en escalar el producto a una resolución de $0,01^\circ$ y obtener el promedio anual de la precipitación de IMERG en el periodo 2001-2020 para así definir zonas homogéneas. Para obtener más pixeles dentro del área de estudio, el producto escalado se dividió en pixeles más pequeños de $0,002^\circ \times 0,002^\circ$ (aprox. 0,2 km x 0,2 km) respetando los valores del pixel original. Se toma el rango de precipitaciones anuales y se divide en 3 para definir 3 zonas homogéneas. La precipitación de cada zona homogénea corresponde a la precipitación media de la zona, la cual considera el área de cada pixel.

Se genera una correlación a nivel anual, mensual y para cada mes con el fin de conocer la similitud entre el pixel que contiene la estación Mataveri del producto IMERG y los datos observados. Posterior, se realiza el mismo procedimiento entre cada zona homogénea y la estación Mataveri obteniendo ecuaciones para cada mes en cada zona homogénea intersectadas en 0. Para la correlación se utiliza el coeficiente de determinación R^2 y para evaluar la precisión de la relación el valor de RMSE. Las ecuaciones y valor óptimo se presentan en la Tabla 4-3. Donde O_i valor conocido de la variable en el tiempo t_i y S_i el valor simulado en el tiempo t_i .

² Práctica profesional III a cargo del Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

Tabla 4-3: Ecuación del coeficiente de determinación R^2 y del error cuadrático medio RMSE.

Criterio	Ecuación	Valor Óptimo
R^2	$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=0}^N (S_i - \bar{S})^2}} \right)^2$	1
RMSE	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2}$	0

4.4.2 Distribución Temperatura Máxima y Mínima

La distribución de las forzantes T_{\max} y T_{\min} se obtiene a partir de los datos de temperatura diaria del *Land Surface Temperature* (LST) de MODIS Terra (MOD11A1³) y MODIS Aqua (MYD11A1⁴), con una resolución temporal diaria y una resolución espacial de aproximadamente 0,009° lat-lon (aproximadamente 1km x 1km). La temperatura máxima se determina como el valor máximo de cada píxel entre ambos productos de temperatura durante el día LST_Day, mientras que la temperatura mínima se calcula como el mínimo entre ambos productos de la temperatura durante la noche LST_Night.

Se generan mapas mensuales promedios (12 mapas) con el periodo de datos comprendido entre julio de 2002 y abril de 2024 para ambos productos. Posteriormente, se procede a normalizar los mapas mensuales utilizando el píxel que contiene a la estación Mataveri. Con los mapas normalizados y las zonas homogéneas definidas con el producto de precipitación, se calcula, para cada mes, la temperatura máxima y mínima asociada a cada zona homogénea. Este cálculo se realiza ponderando por el área de cada píxel el valor de variación de temperatura presente en el mapa normalizado, donde el píxel de Mataveri es nulo y sirve de input para los GCM. La ecuación de la temperatura mensual para una zona y mes i es la siguiente:

$$T_{zona_i} = \frac{(M_i + P_{1i}) \times A_1 + (M_i + P_{2i}) \times A_2 + \dots + (M_i + P_{Ni}) \times A_N}{A_T} = M_i + \frac{\sum_{j=1}^N P_{ji} \times A_j}{A_T} \quad (4-1)$$

$$T_{zona_i} = M_i + \Delta T_i \quad (4-2)$$

Donde M_i es el valor de temperatura mensual normalizado en Mataveri (igual a 0) o el valor input GCM en el mes i , P_{ji} es la variación de la temperatura mensual asociado al píxel j en el mes i , A_j es el área de dicho píxel, A_T es el área total de la zona y ΔT_i la variación de temperatura mensual ponderada por el área en el mes i para la zona de interés.

³ Datos obtenidos a partir de los códigos de *Google Earth Engine* [GEE Terra.cl](https://code.earthengine.google.com/).

⁴ Datos obtenidos a partir de los códigos de *Google Earth Engine* [GEE Aqua.cl](https://code.earthengine.google.com/).

4.5 Determinación de índices de sequía

Para la obtención de los índices se utiliza el paquete SPEI en R Studio ([SPEI.cl](#)), con un periodo de referencia entre 1991-2020 que considera proyecciones futuras de las variables de los GCM entre 2015-2020. Los índices de sequía seleccionados corresponden al índice SPI y SPEI. Se estiman índices con duración 3, 6, 9, 12 y 24, sin embargo, se centra el cálculo y análisis en duraciones de 9 y 12 meses.

Considerando que la isla no cuenta con flujos superficiales permanentes, donde el acuífero es su principal fuente de agua, es importante estimar el posible efecto de las sequías en la napa subterránea. Anomalías en la precipitación a largo plazo, como duraciones entre 6 y 24 meses, se ven relacionadas a estas fuentes de agua, ya que los caudales fluviales, el almacenamiento en reservorios y las aguas subterráneas responden en tiempos más prolongados (OMM, 2012). Estudios previos como el de Gatica y Toro (2020) aplicaron escalas de tiempo amplias (12, 24 y 48 meses) que consideran la relativa homogeneidad estacional de las precipitaciones observadas y la dependencia con el agua subterránea para abastecer con agua potable a la isla.

Los índices SPI y SPEI presentan las siguientes características (las ecuaciones se encuentran en el anexo A.2):

- ❖ El índice SPI se basa en los datos de precipitación de una zona y compara la precipitación respecto a su promedio histórico. Este índice se calcula de manera móvil, lo que significa que cada mes se obtiene un nuevo valor a partir de los datos de los meses anteriores. El SPI puede aplicarse a diferentes escalas de temporales, como 3, 6, 9, 12, 24 meses (SPI-*i*, donde con “*i*” representa el número de meses), lo que permite identificar sequías a corto plazo como prolongadas (McKee, Doesken, & Kleist, 1993). El cálculo del SPI comienza ajustando los datos de precipitación a una distribución gamma no estandarizada, que luego se transforma a una distribución normal estandarizada. El valor medio del índice se fija en 0, de modo que valores superiores a 0 indican periodos más húmedos y valores inferiores reflejan periodos secos (McKee, Doesken, & Kleist, 1993).
- ❖ El Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración (SPEI), propuesto por Vicente-Serrano et al. (2010), se base en el índice SPI, pero incorpora la temperatura en su cálculo. Este índice utiliza como input el déficit hídrico representado como el balance entre la precipitación mensual y la evapotranspiración potencial mensual. Para su ajuste, se emplea una distribución Log-Logistic.

En el caso de índices de sequía que indiquen un valor extremo negativo en las colas de la distribución, estos se reemplazarán por el valor mínimo que existe en el registro para cada GCM en particular.

4.5.1 Clasificación y caracterización de Índices

Para clasificar los índices y su frecuencia según el valor asociado se utiliza la clasificación descrita por el *U.S. Drought Monitor* (USDM) como se muestra en la *Tabla 4-4*.

Tabla 4-4: Clasificación índice SPI para condiciones de sequía. Fuente: Adaptado de (National Drought Mitigation Center, 2024).

Categoría	Descripción / Tipo de sequía	Valor SPI o SPEI
S0	Normal o húmedo	SPI > -0,5
S1	Ligeramente seco	-0,5 >= SPI > -0,8
S2	Moderadamente seco	-0,8 >= SPI > -1,3
S3	Severamente seco	-1,3 >= SPI > -1,6
S4	Extremadamente seco	-1,6 >= SPI > -2,0
S5	Excepcionalmente seco	-2,0 >= SPI

Para caracterizar los índices de sequía se definen los siguientes conceptos bajo el umbral de índice de -1,3 para índices SPI/SPEI-9, SPI/SPEI-12 que considera en conjunto los eventos severamente seco, extremadamente seco y excepcionalmente seco (Figura 4-3):

- *Duración*: número de meses de un evento de sequía con SPI/SPEI menor a -1,3 “D”.
- *Severidad/Área*: Suma de índices de sequía dentro de un evento de sequía con SPI/SPEI menor a -1,3 $S = \sum_{i=1}^D (SPI_i - 1,3)$.
- *Intensidad de sequía* con SPI/SPEI menor a -1,3: $I = S/D$.
- *Número de sequías* con SPI/SPEI menor a -1,3.
- *Duración Máxima*: Sequía más larga con SPI menor a -1,3.

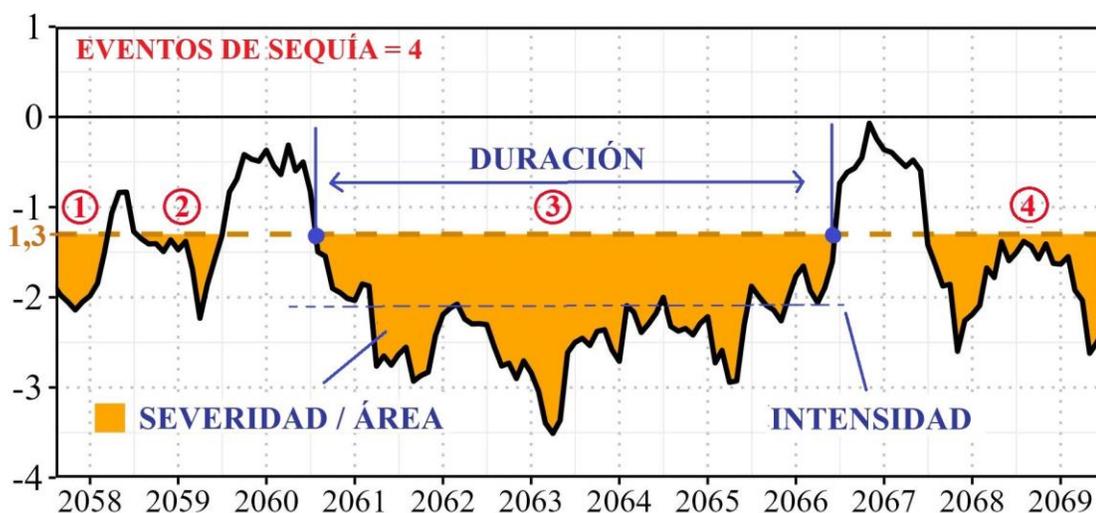


Figura 4-3: Esquema duración, intensidad, severidad y n° de eventos de índices de sequía.

4.6 Selección de modelos de circulación general

Con las forzantes escaladas espacial y estadísticamente se busca disminuir la incertidumbre al seleccionar los modelos más cercanos a los datos observados de la estación Mataveri entre 1991 y 2020. El periodo de análisis histórico 1991-2020 es el planteado por la Dirección General de Aguas (2021) en la actualización de las Normales Climáticas que sigue las directrices de la Organización Meteorológica Mundial (OMM). Este periodo incluye las proyecciones históricas de GCM hasta el 2014, y proyecciones futuras del periodo 2015-2020.

La selección de modelos se realiza a partir del análisis de las curvas de variación estacional de las precipitaciones y de las precipitaciones anuales en la celda de la estación Mataveri. En el primer caso, se define un límite de error del 20% para los promedios mensuales de las precipitaciones de los modelos en el periodo 1991-2020 respecto a los datos observados. Se filtran los modelos que cumplen con la condición de tener dos o menos meses con un error igual o menor al 20%.

En relación con el análisis anual, se compara el promedio y desviación de las precipitaciones anuales de los modelos con respecto a los datos de la estación Mataveri. Se destacan los GCMs con una diferencia menor al 6% en las precipitaciones y 20% en las desviaciones. Finalmente, se seleccionan los GCM que cumplan ambos criterios.

5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo, en primer lugar, se exponen los resultados de los modelos de circulación general escalados y corregidos con el método MBCn junto a los datos observados. Luego, se presentan los productos de distribución espacial y los índices de sequía SPI y SPEI.

5.1 GCM

Los valores anuales de los GCMs para la precipitación y temperaturas corregidas, con un periodo base de 1970-2014, se presentan en la Figura 5-1. Las temperaturas máximas y mínimas muestran un aumento, alcanzando al final del periodo un incremento aproximado de 4 °C. Durante el periodo histórico (1970 y 2014), los valores de precipitación del promedio de GCMs y los datos de la estación se observan similares, aunque entre el año 2014 y 2023 no presentan el mismo comportamiento. Durante el periodo proyectado, el promedio de las precipitaciones de los GCM va disminuyendo en el tiempo.

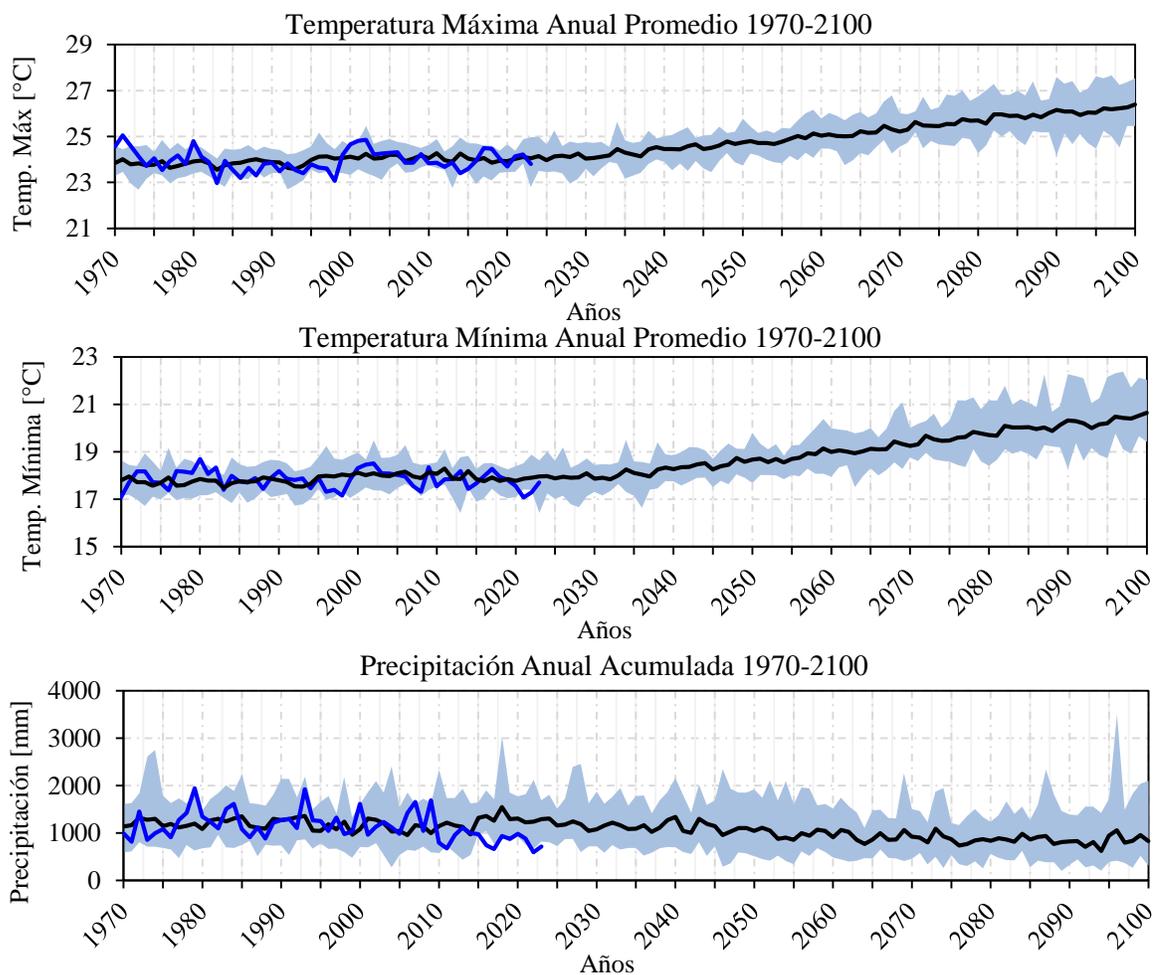


Figura 5-1: Valores anuales de precipitación, temperatura máxima y mínima. Línea azul corresponde a la estación Mataverí, línea negra el promedio de los GCM, y área celeste la envolvente de los GCM (máximo y mínimo).

En la Figura 5-2 se aprecia que, desde aproximadamente el año 2015, la evapotranspiración potencial anual con Thornthwaite presenta un aumento promedio de 3,8 mm/año, mientras que el

método de Hargreaves muestra un incremento más lento, cercano a los 0,5 mm/año. Sin embargo, Hargreaves parte de magnitudes iniciales más altas (entre los 1000-1200 mm). Esto podría significar una mayor sensibilidad en el método de Thornthwaite ante variaciones de la temperatura. Los datos observados se mantienen dentro de la envolvente con el método de Thornthwaite más tiempo en comparación al método de Hargreaves, en el que se observan más valores alejados de los límites definidos por los GCMs.

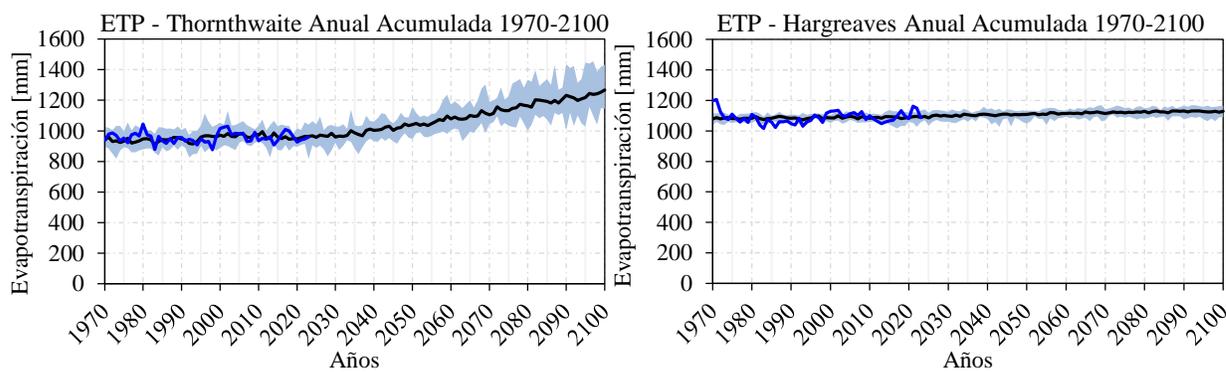


Figura 5-2: Evapotranspiración potencial anual acumulada con método de Thornthwaite y Hargreaves. Línea azul corresponde a la estación Mataverí, línea negra el promedio de los GCM, y área celeste la envolvente de los GCM (máximo y mínimo).

5.1.1 Curvas de Variación Estacional

El periodo base de corrección de sesgo 1970-2014 muestra curvas de promedios mensuales similares para todos los GCM respecto a Mataverí en ese periodo (ver Anexo B.1, Figura Apx. B-1). En la Figura 5-3 y Figura 5-4 se exponen las CVE de los tres periodos de análisis (1991-2020, 2031-2060 y 2071-2100) para la precipitación y ETP de ambos métodos, respectivamente. En cuanto a los periodos de análisis, el periodo histórico 1991-2020 incluye proyecciones futuras de los GCM para los años 2015 a 2020.

En el periodo 1991-2020, las CVE de las evapotranspiraciones no presentan gran desviación respecto a la curva de datos observados, pero en el caso de la curva de precipitación, los modelos muestran una mayor desviación respecto a los datos observados. En el periodo histórico el promedio de GCM muestra que los mayores valores de precipitación se dan en el mes de mayo y los valores menores en el mes de noviembre. A diferencia de los GCMs los datos observados de precipitación presentan su valor máximo en el mes de abril y el mínimo en el mes de febrero.

Los datos de la estación Mataverí (línea azul) se encuentran dentro de la envolvente correspondiente a los valores máximos y mínimos de los modelos, a excepción del mes de mayo que se escapa del área, donde todos los modelos sobreestiman la precipitación. Con el paso del tiempo el promedio de precipitaciones de los modelos en cada periodo (línea negra) es menor que el observado y el de los modelos en el periodo histórico. Se destaca el aumento del área de la envolvente, con una mayor variabilidad en los datos modelados y el cambio en la forma de la CVE del promedio de GCM notorio en el futuro lejano.

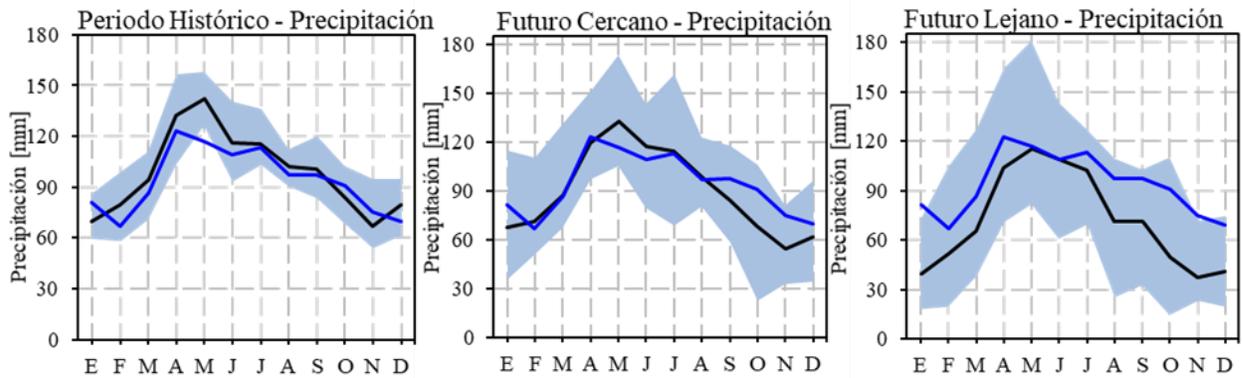


Figura 5-3: CVE de precipitación para el periodo histórico (1991-2020), futuro cercano (2031-2060) y futuro lejano (2071-2100). La línea azul corresponde a datos de la estación Mataverí, la línea negra el promedio de los GCM y el área celeste la envolvente de los GCM (valores máximos y mínimos).

En el periodo histórico 1991-2020 las CVE de evapotranspiraciones con ambos métodos (Figura 5-4) no presentan gran desviación respecto a la curva de datos observados, lo que tiene sentido respecto al comportamiento de las CVE de las temperaturas. La evapotranspiración con el método de Thornthwaite exhibe un aumento visible en el periodo futuro, especialmente en el futuro lejano donde aumenta aproximadamente en 20 mm la curva promedio de GCM. Este aumento no es tan visible en el caso de la ETP con el método de Hargreaves, donde el incremento es leve. Es importante resaltar que el comportamiento de la CVE en ambos métodos no cambia en el periodo futuro (la forma de la curva), a diferencia de lo que se observa en la precipitación con el cambio de la forma en las envolventes y promedios.

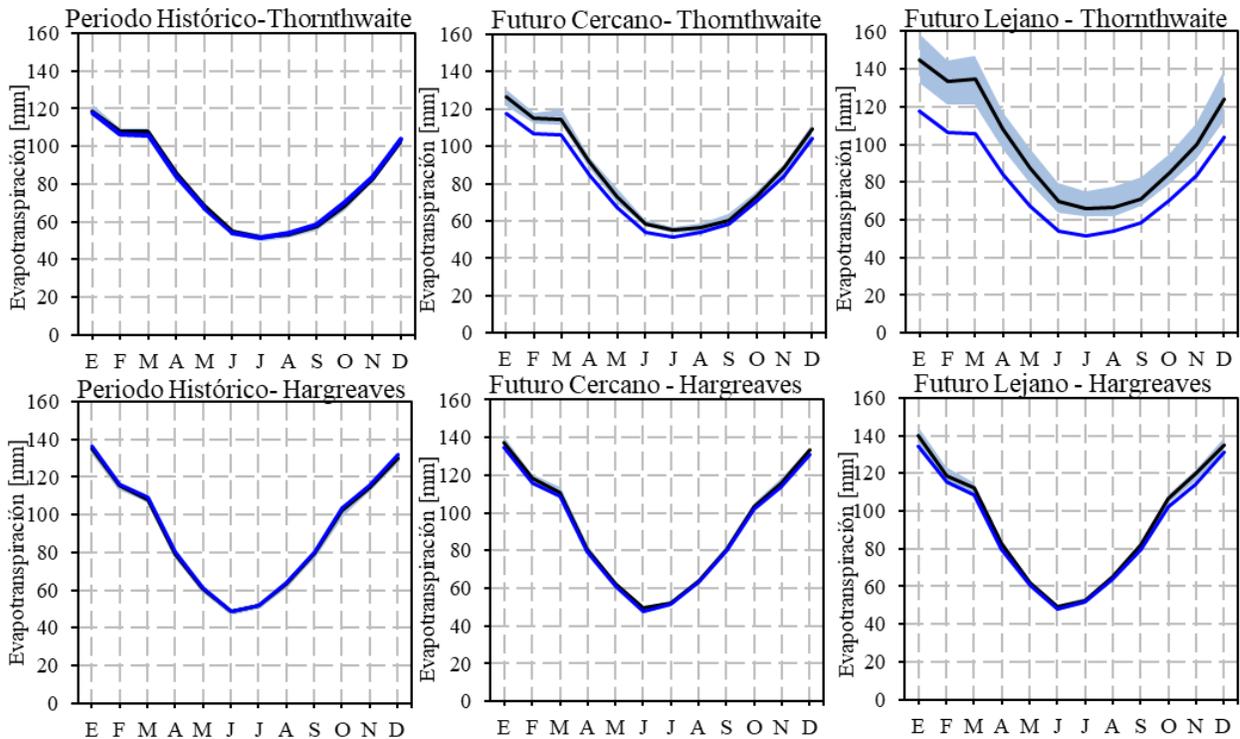


Figura 5-4: CVE de Evapotranspiración potencial con Thornthwaite y Hargreaves para el periodo histórico (1991-2020), futuro cercano (2031-2060) y futuro lejano (2071-2100). La línea azul corresponde a datos de la estación Mataveri, la línea negra el promedio de los GCM y el área celeste la envolvente de los GCM (valores máximos y mínimos).

Las curvas de variación estacional con diagrama de caja para los datos de los GCMs en la celda de la estación Mataveri junto a los datos observados para los tres periodos de análisis se presentan en el Anexo B.1. En la Figura 5-5 se presentan un ejemplo de estos gráficos con la curva de variación estacional para la precipitación en el periodo histórico. Se observa gran cantidad de valores extremos (outliers) y una gran dispersión especialmente en el mes de abril y mayo.

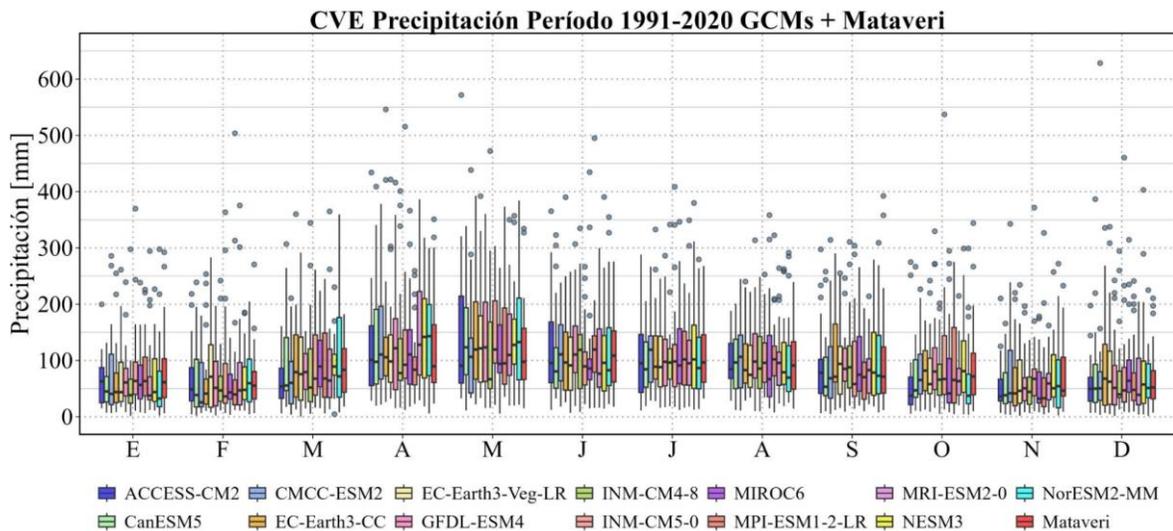


Figura 5-5: Curva de variación estacional con diagrama de caja para los GCMs junto a Mataveri en el periodo histórico 1991-2020.

5.1.2 Curvas de duración

En la Figura 5-6 y Figura 5-7 se presenta la curva de duración de la precipitación diaria filtrada para valores mayores a 0,1 mm en el periodo histórico, futuro cercano y lejano de los diferentes GCMs y los datos observados de la estación Mataveri en el periodo 1991-2020. Se observa que los diferentes GCMs parten desde distintos porcentajes de probabilidad de excedencia, lo que es más visible en las curvas de la proyección futura. En el futuro cercano y lejano las curvas de duración para la precipitación diaria se ven más separadas, mostrando una mayor diferencia en el comportamiento entre los GCMs. En especial, en el futuro lejano gran parte de modelos para una probabilidad de excedencia del 5% disminuyen sus valores bajo o cercano a los 10 mm de precipitación.

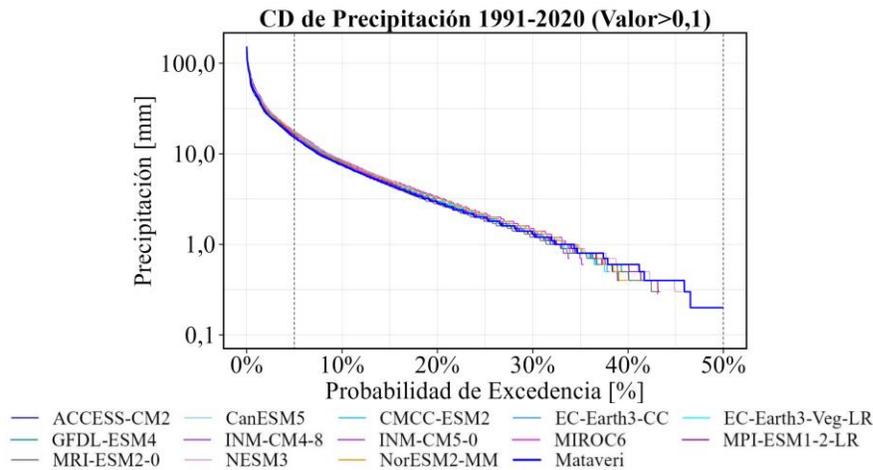


Figura 5-6: Curva de duración de precipitación diaria para todos los GCMs y los datos observados de Mataveri en el periodo 1991-2020.

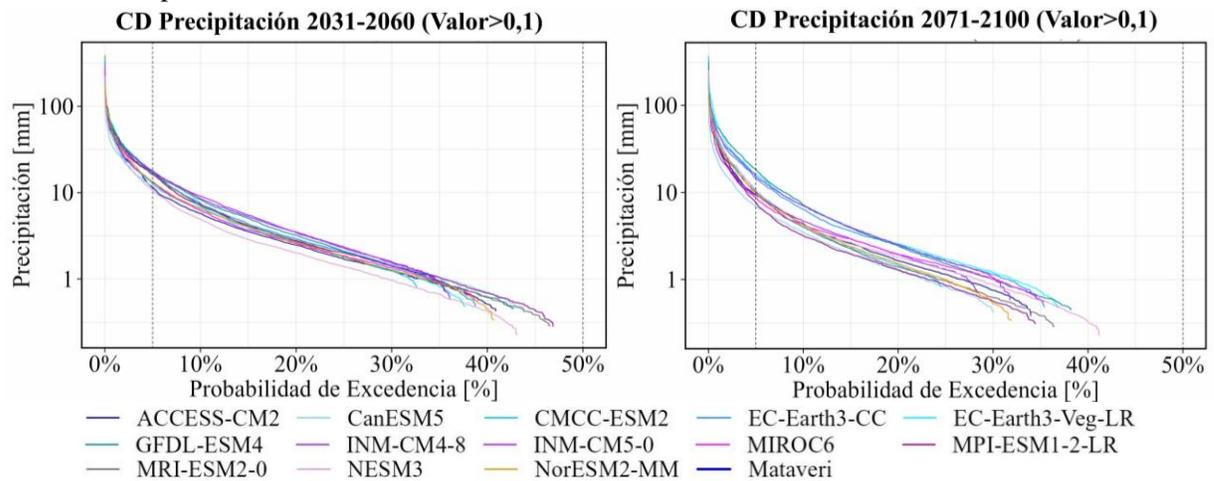


Figura 5-7: Curva de duración de precipitación diaria para todos los GCMs en el futuro cercano (2031-2060) y lejano (2070-2100).

Las curvas de duración de la temperatura mínima y máxima diaria en el periodo histórico (1991-2020) no presentan una variación significativa entre los GCMs y con los datos observados de la estación Mataveri, como se muestra en la Figura 5-8. Sin embargo, las curvas de duración en el futuro lejano que se exponen en el Anexo B.1, presenta una mayor variabilidad entre los modelos.

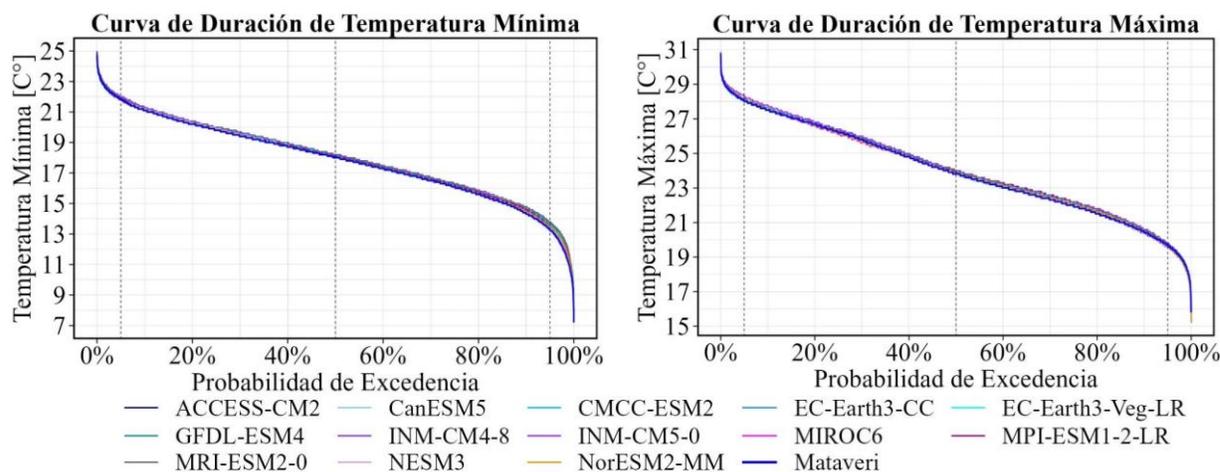


Figura 5-8: Curvas de duración de temperatura mínima y máxima diaria para todos los GCMs y los datos observados de Mataveri en el periodo 1991-2020.

5.1.3 Selección de GCM

Se presentan los resultados de la selección de los modelos que cumplen con los criterios establecidos tras la corrección de sesgo, comparando los valores con los datos observados en el periodo histórico 1991-2020. Este periodo considera proyecciones futuras para los GCM (2015-2020).

5.1.3.1 Criterio de curva de variación estacional

Al definir un límite de error del 20% para los promedios mensuales de las precipitaciones en el periodo 1991-2020, los modelos que cumplen con la condición de tener dos o menos meses con un error igual o menor al 20% son CanESM5, GFDL-ESM4, MIROC6 y MRI-ESM2-0.

En la Figura 5-9 se muestra la curva de variación estacional (CVE) con los promedios y las envolventes del conjunto de GCMs y de los modelos seleccionados, así como la CVE de la estación Mataveri. La envolvente de los GCMs que cumplen con la condición presenta un área menor comparada con la de todos los GCMs. En particular los meses de enero, mayo y noviembre de los datos observados quedan levemente fuera de la envolvente de modelos seleccionados. No obstante, los promedios de la totalidad de GCMs y los seleccionados son similares (datos en Tabla Apx. B-2).

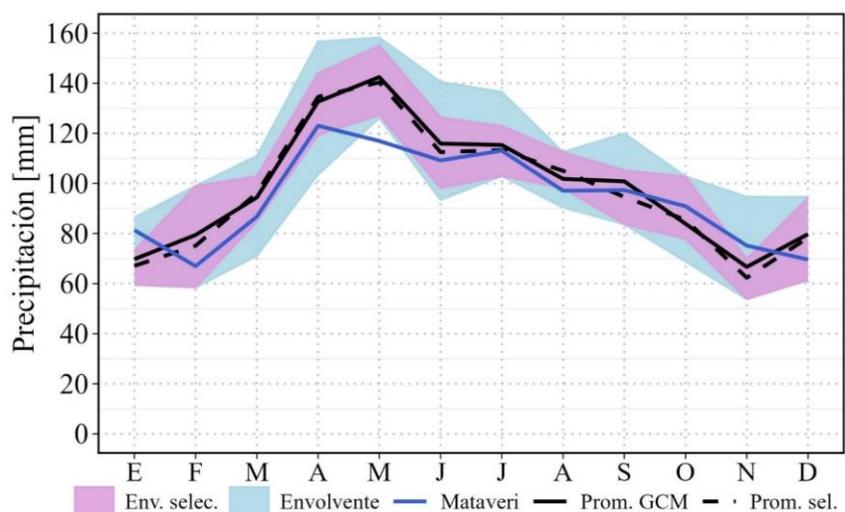


Figura 5-9: Curva de variación estacional con envolvente (valor máximo y mínimo) de los GCM y los seleccionados.

5.1.3.2 Criterio de promedio y desviación anual

Los promedios y desviaciones estándar anuales de las forzantes en el periodo histórico, futuro cercano y futuro lejano de GCMs y datos observados (línea roja punteada) se presentan en la Figura 5-10 (el detalle de los valores se encuentra en el Anexo B.1 Tabla Apx. B-4). El promedio de las precipitaciones anuales en el periodo histórico es cercano a los datos observados, donde la generalidad de los datos tiene una diferencia menor al 10%, la mayoría se encuentra bajo el 6% de error. Todos los GCMs a excepción de CanESM5, sobreestiman los valores promedio de precipitación anual. Existe una mayor diferencia en las desviaciones de precipitación donde seis modelos tienen una diferencia absoluta menor al 20%. Los modelos más cercanos a los registros considerando ambos estadísticos serían ACCESS-CM2, CanESM5, EC-Earth3-Veg-LR, GFDL-ESM4 y MRI-ESM2-0.

Las temperaturas anuales mínimas y máximas en el periodo histórico son similares en promedio y desviación estándar con los datos observados. En ambas temperaturas el rango entre el máximo y mínimo valor promedio es de aproximadamente $0,2^{\circ}\text{C}$, y para la desviación de $0,3^{\circ}\text{C}$.

Con respecto al periodo futuro, se observa un aumento en la dispersión del promedio de todas las forzantes, siendo esto más visible en el periodo 2071-2100. En el caso de la precipitación, en el periodo histórico, los promedios se concentran entre los 1100 a los 1300 mm y, por otro lado, en el futuro la mayoría de los valores disminuyen y el rango de promedios en el futuro lejano se extiende partiendo de los 500 mm y llegando a los 1300 mm. Los promedios y desviaciones de precipitación de los modelos EC-Earth3-Veg-LR y GFDL-ESM en el periodo 2071-2100 son mayores a los datos observados en el periodo 1991-2020.

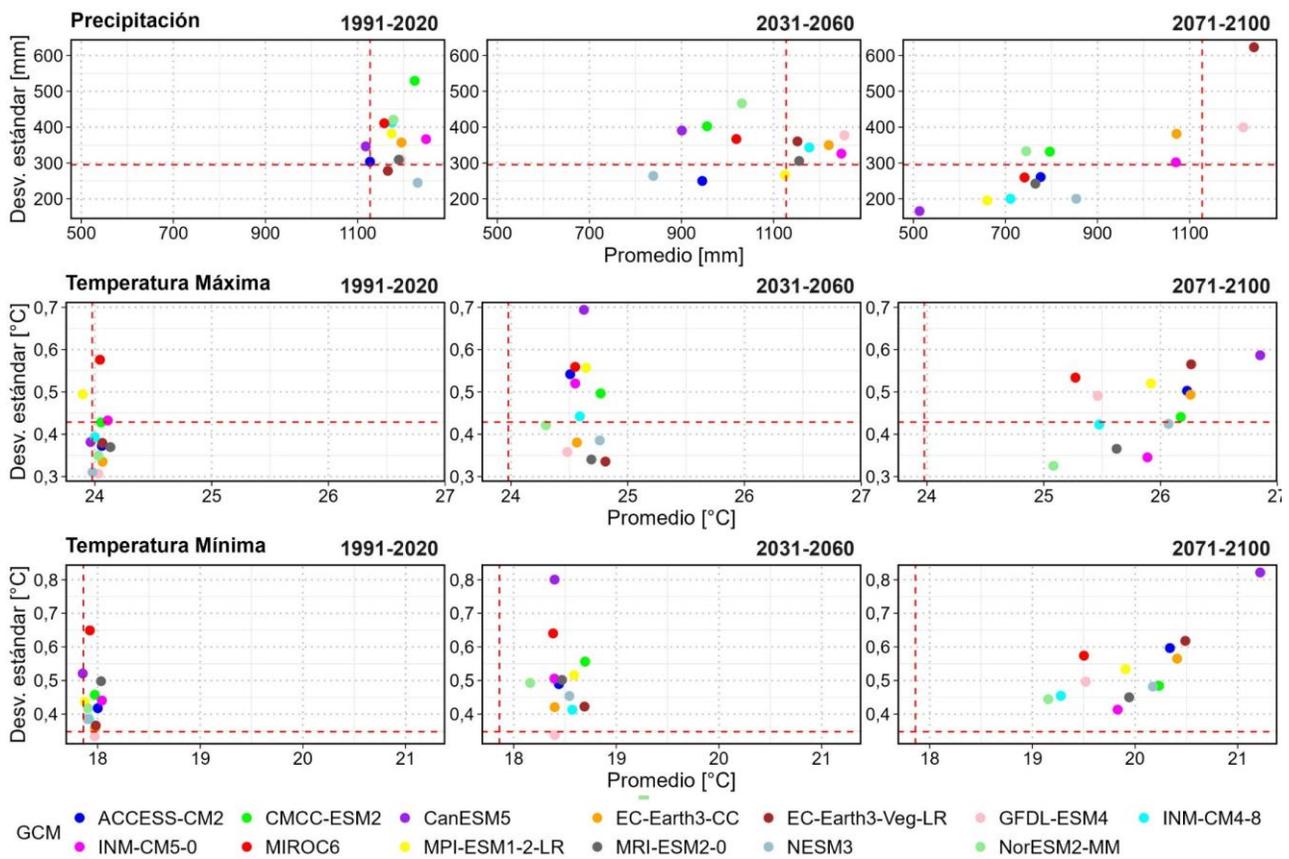


Figura 5-10: Promedios y desviaciones estándar anuales de los GCM en el periodo histórico, futuro cercano y futuro lejano de forzantes. La línea roja punteada indica el promedio y desviación de la estación Mataverí.

Considerando los modelos que cumplen con las condiciones de la curva de variación estacional y las precipitaciones anuales, se seleccionan los modelos *CanESM5*, *GFDL-ESM4* y *MRI-ESM2-0* para las proyecciones futuras.

5.1.4 Proyección de las forzantes

En la Tabla 5-1 se presentan las variaciones de precipitación anual promedio, temperatura máxima y mínima anual promedio en el futuro cercano (FC) y futuro lejano (FL) de los modelos GCM respecto del periodo histórico 1991-2020. La mayoría de los modelos muestran una disminución porcentual en las precipitaciones, siendo más notorias en el futuro lejano con una reducción máxima del 54,1%. Por otra parte, algunos modelos proyectan un aumento de hasta un 6,3% en la precipitación.

Las variaciones de temperatura máxima y mínima para el futuro cercano (FC) son similares en todos los modelos, diferencias que se encuentran entre los 0,3 a 0,8 °C. En el futuro lejano las variaciones de temperatura se incrementan con valores que se encuentran entre 1 a 3,4 °C.

Tabla 5-1: Variación de precipitación, temperatura máxima y mínima anuales respecto al periodo histórico 1991-2020.

Δ PRECIPITACIÓN [%]													
	ACC	Can	CMC	ECC	ECV	GFD	IN4	IN5	MIR	MPI	MRI	NES	Nor
FC	-16,1	-19,4	-21,9	2,0	-1,2	5,0	0,2	-0,1	-12,0	-4,2	-2,9	-31,8	-12,5
FL	-31,1	-54,1	-34,9	-10,4	6,3	1,9	-39,5	-14,3	-36,0	-43,7	-35,7	-30,6	-36,8
Δ TEMPERATURA MÁXIMA [°C]													
	ACC	Can	CMC	ECC	ECV	GFD	IN4	IN5	MIR	MPI	MRI	NES	Nor
FC	0,4	0,7	0,7	0,5	0,7	0,5	0,6	0,4	0,5	0,7	0,6	0,8	0,3
FL	2,2	2,9	2,1	2,2	2,2	1,4	1,5	1,8	1,2	2,0	1,5	2,1	1,1
Δ TEMPERATURA MÍNIMA [°C]													
	ACC	Can	CMC	ECC	ECV	GFD	IN4	IN5	MIR	MPI	MRI	NES	Nor
FC	0,4	0,5	0,7	0,4	0,7	0,4	0,7	0,4	0,5	0,7	0,4	0,6	0,3
FL	2,3	3,4	2,3	2,4	2,5	1,5	1,4	1,8	1,6	2,0	1,9	2,3	1,2

En la Tabla 5-2 se presentan los resultados de precipitación y temperatura media (promedio entre máxima y mínima) junto a la variación futura respecto al periodo histórico para el promedio de los GCM seleccionados: CanESM5, GFDL-ESM4 y MRI-ESM2-0. La precipitación promedio disminuye en el futuro cercano en un 5,5%, y hasta en un 29% en el futuro lejano. Se estima que la temperatura en el futuro lejano aumente en 2,1°C respecto al periodo histórico.

Tabla 5-2: Promedio de proyecciones de precipitación y temperatura para GCM seleccionados.

GCM		SSP5-8,5			
Periodo		Precipitación Media [mm]		Temperatura Media [°C]	
			Δ [%]		Δ [°C]
Hist.	1991-2020	1167	-	21,0	-
FC	2031-2060	1103	-5,5	21,5	0,5
FL	2071-2100	832	-28,7	23,1	2,1

5.1.5 Clima proyectado

Para analizar el clima proyectado de Rapa Nui en el futuro cercano y lejano, se utiliza la clasificación climática de Köppen (Arnfield, 2024), que toma en cuenta tanto la temperatura como la precipitación mensual.

En el futuro cercano (2031-2060) y lejano (2071-2100) se proyecta que las temperaturas mínimas se alcanzarán en el mes de abril, con valores estimados de aproximadamente 18,8°C y 20,5°C, respectivamente. En cuanto a la precipitación promedio del mes más seco, en el futuro cercano sería en diciembre con 58 mm y en el futuro lejano en enero, con 32 mm. En la Figura 5-11 se presenta un climograma con las precipitaciones y temperaturas promedios mensuales en el futuro cercano, futuro lejano y para los datos observados de la estación Mataveri en el periodo histórico 1991-2020.

Siguiendo los criterios de Köppen, dado que la precipitación mensual promedio más baja en ambos casos es inferior a 60 mm, se aplica la relación de $100 - (PMA/25)$, donde PMA es la precipitación anual media, obteniendo un valor de 56 mm para el futuro cercano y 67 mm para el futuro lejano.

De acuerdo con esta clasificación:

- ❖ En el caso del futuro cercano la temperatura media es mayor a 18°C y la precipitación del más seco es mayor al resultado de la relación anterior ($58 > 56$ mm), por lo que la clasificación sería tropical monzónico (Am).
- ❖ En el caso del futuro lejano la temperatura media es menor a la relación anterior ($32 < 67$ mm), por lo que la clasificación pasaría a ser de tropical de sabana (As).

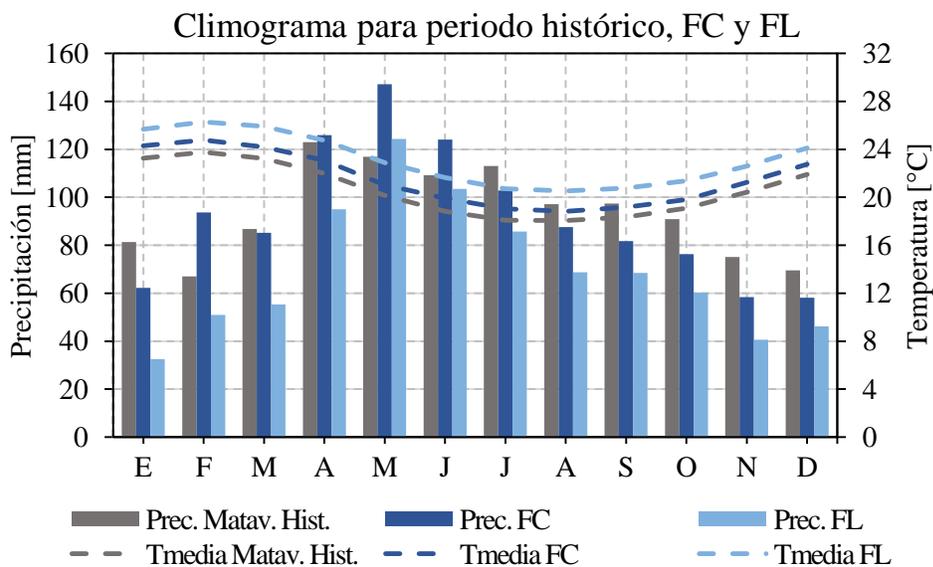


Figura 5-11: Climograma de datos observados en el periodo histórico (1991-202) junto al promedio de GCMs seleccionados en el futuro cercano (2031-2060) y lejano (2071-2100).

5.2 Distribución Espacial

En el Anexo B.2 se presenta el detalle de los resultados de la metodología para la distribución espacial de la precipitación y temperaturas (gráficos anuales, mensuales, curvas hipsométricas).

5.2.1 Distribución Precipitación

El producto IMERG, y en específico el pixel con información que contiene el punto de la ubicación de la estación Mataveri, presenta una buena correlación a nivel anual, mensual y por cada mes (Figura Apx. B-6, Figura Apx. B-8).

Con los datos del producto satelital, al definir el mapa con las precipitaciones anuales promedios en el periodo 2001-2020, se dividió el rango de precipitaciones en tres partes, definiendo así tres zonas homogéneas (Figura 5-12). Estas zonas se establecieron con base en los rangos de precipitaciones medias anuales, que son: Zona 1 [1050,5–1143,5 mm], Zona 2 (1143,5–1236,5 mm] y Zona 3 (1236,5–1329,5 mm]. Las precipitaciones medias para cada zona considerando el área de cada pixel durante el período 2001-2020 son las siguientes: Zona 1 - 1102,52 mm, Zona 2 - 1182,51 mm, y Zona 3 - 1277,82 mm.

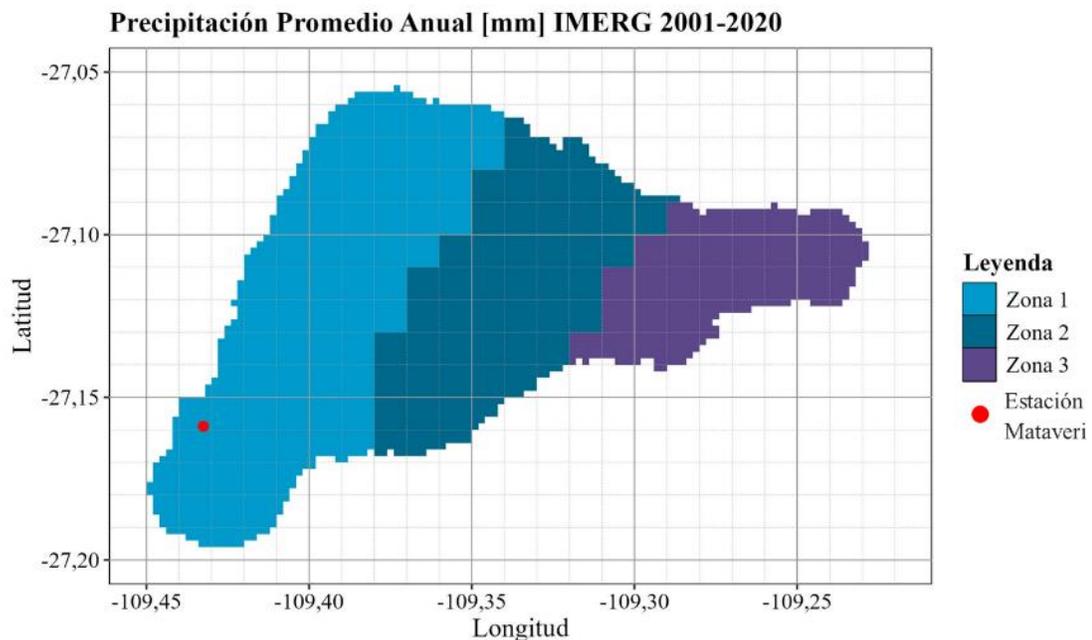


Figura 5-12: Mapa Isla Rapa Nui con zonas homogéneas definidas a partir del producto IMERG.

Las regresiones lineales de las precipitaciones asociadas a cada mes y zona en función de los datos observados son interceptadas en 0. La ecuación de cada zona y mes es utilizada para evaluar los datos GCM y observados para definir las precipitaciones de cada zona homogénea. Las pendientes y coeficientes de determinación R^2 de cada zona se presentan en la Tabla Apx. B-5 del Anexo B.2.

5.2.2 Distribución Temperatura

Los mapas normalizados de temperatura máxima y mínima para cada mes respecto al pixel donde se encuentra ubicada la estación Mataveri se presentan en el Anexo B.2 (Figura Apx. B-10). Las variaciones de temperatura máxima y mínima de cada mes y zonas para evaluar cada GCM se presentan en la Tabla 5-3. Con la ecuación (4-1) se definió la siguiente relación para la temperatura mensual de una zona en el mes i : $T_{zona_i} = GCM_i + \Delta T_i$, donde GCM_i es el valor la temperatura mensual en el mes i .

Tabla 5-3: Valores de temperatura máxima y mínima para distribución de las zonas homogéneas.

Mes	Tmáx [°C]			Tmín [°C]		
	Z1	Z2	Z3	Z1	Z2	Z3
Enero	0,3	1,7	3,0	-0,9	-1,8	-1,3
Febrero	0,2	1,5	2,9	-1,0	-1,9	-1,3
Marzo	0,1	1,2	2,7	-0,9	-1,8	-1,3
Abril	0,2	0,5	1,9	-0,9	-1,7	-1,3
Mayo	-0,3	-0,2	0,9	-1,0	-1,6	-1,3
Junio	-0,2	0,1	0,9	-1,0	-1,6	-1,4
Julio	-0,3	-0,1	0,7	-0,7	-1,4	-1,1
Agosto	-0,3	0,2	0,9	-0,7	-1,2	-1,0
Septiembre	0,1	1,0	1,6	-0,9	-1,5	-1,3
Octubre	0,2	1,2	1,8	-1,0	-1,7	-1,4
Noviembre	0,2	1,4	2,3	-0,9	-1,8	-1,3
Diciembre	0,5	2,0	2,9	-1,0	-1,7	-1,2

En la Figura 5-13 se muestra el mapa de temperaturas máximas promedios mensuales normalizadas en función del pixel de la estación Mataveri del mes de febrero y julio, dentro del periodo 2002-2024. Tanto febrero como julio muestran variaciones negativas en los pixeles cercanos a la zona más alta de la isla, en el volcán Terevaka (al norte). En el mes más caluroso, febrero, la zona este, donde se encuentra el humedal Rano Raraku y volcán Poike, exhibe variaciones positivas de 3 a 4°C, lo que indica que en esa área se darían las temperaturas máximas de ese mes.

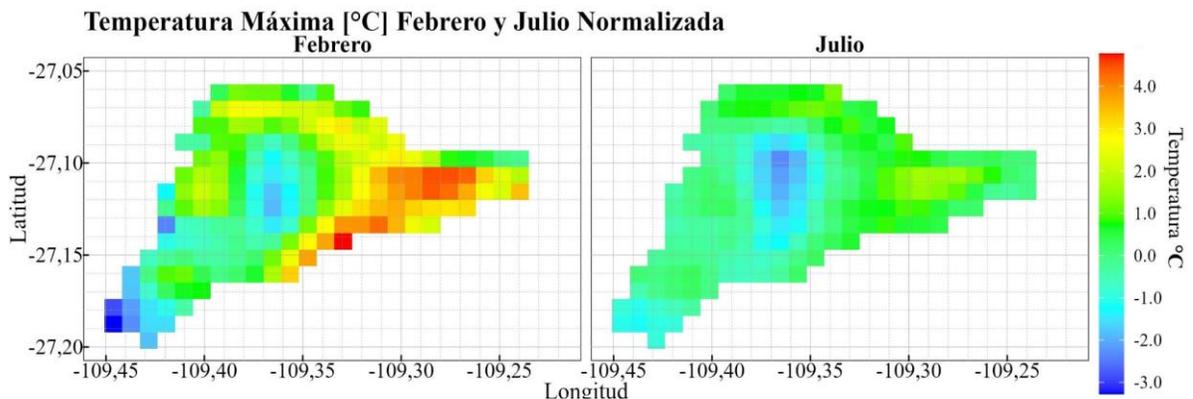


Figura 5-13: Mapa del mes de febrero y julio de temperaturas máximas mensuales normalizadas en función del pixel de la ubicación de la estación Mataveri.

En el Anexo B.2 se encuentran los mapas normalizados de las temperaturas mínimas y máximas de todos los meses.

En la Figura 5-14 se presentan las curvas de variación estacional de la precipitación, evapotranspiración potencial con Thornthwaite y Hargreaves en el periodo 1991-2020. El comportamiento de las CVE de la precipitación de las tres zonas es similar entre sí, variando respecto a los datos de la estación Mataveri. Por otra parte, las CVE de las ETP con Thornthwaite no presentan una variación visible, aunque en el caso de Hargreaves la variación es más visible especialmente entre los meses de octubre a marzo. En ambos casos la zona 3 alcanza los valores máximos de ETP mensual promedio. Esto puede indicar condiciones climáticas semejantes entre las zonas homogéneas definidas.

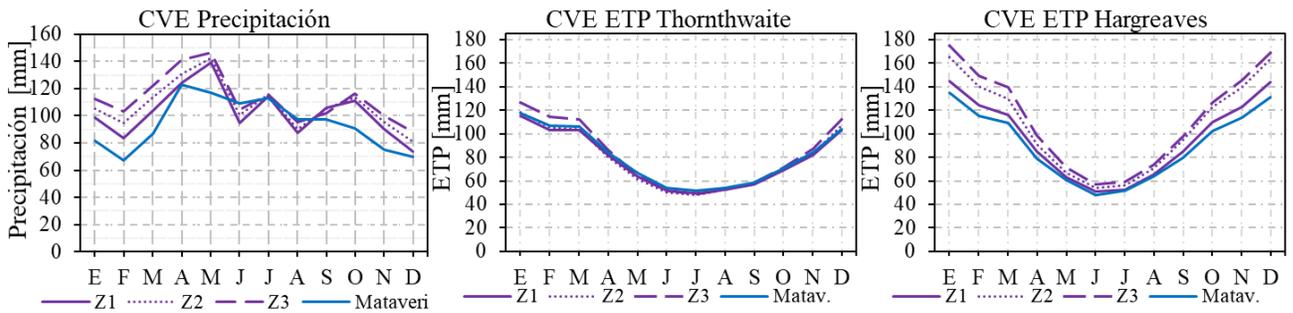


Figura 5-14: CVE de precipitación, ETP Thornthwaite y Hargreaves para cada zona homogénea en el periodo 1991-2020.

5.3 Análisis de índices de sequía

5.3.1 Índices en el tiempo

En la Figura 5-15 se presentan los índices SPI3, SPI9, SPI12 Y SPI24 del periodo 1991-2020 de los datos observados de la estación Mataveri. Considerando sequías excepcional, extrema y severamente secas (bajo un umbral de -1,3), para el índice SPI3 se generan 8 eventos de sequía, SPI9 con 5 eventos de sequía, SPI12 con 5 eventos de sequía y SPI24 con 4 eventos de sequía.

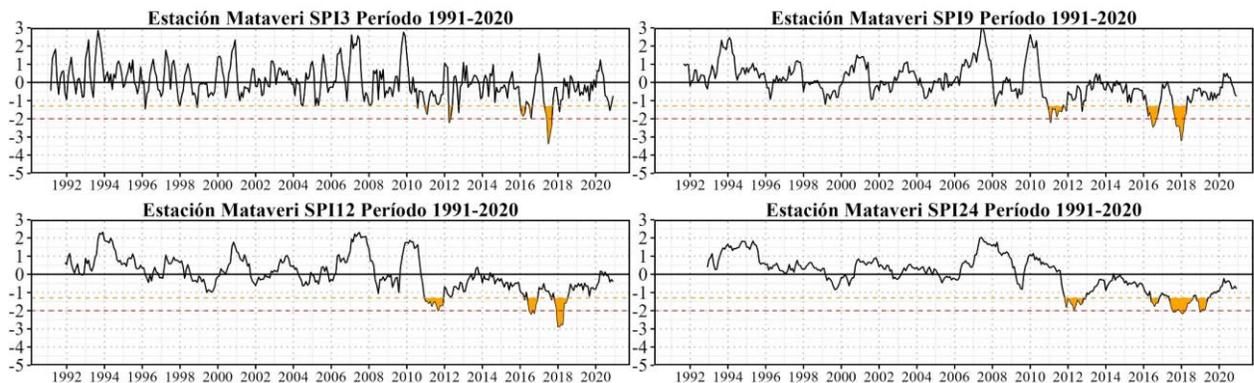


Figura 5-15: Índices SPI para la estación Mataveri en el periodo 1991-2020 con umbral de sequía -1,3.

En la Figura 5-16 se presentan los índices SPEI12 con ambos métodos de evapotranspiración para el periodo 1991-2020 de los datos observados de la estación. Los dos resultados de índices junto al SPI12 muestran un comportamiento similar.

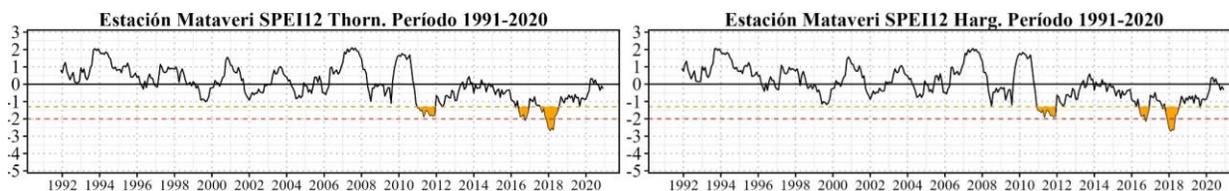


Figura 5-16: Índice SPEI12 con Thornthwaite y Hargreaves en el periodo 1991-2100.

En la Figura 5-17 y Figura 5-18 se presentan los índices SPI12 y SPEI12 con Thornthwaite y Hargreaves en el periodo 1991-2100 para los modelos seleccionados: CanESM5, GFDL ESM4 y MRI-ESM2-0. Los tres modelos presentan diferentes comportamientos en magnitud y temporalmente. En el caso del modelo CanESM5 en el periodo futuro se estiman eventos de sequía con mayor duración y algo más severos con el método de Thornthwaite. Las mayores magnitudes de índices se alcanzan en el futuro lejano donde se destaca el modelo CanESM5 que supera el valor de -4 para el índice SPEI12 con el método de Thornthwaite, y el modelo MRI-ESM2-0 que supera un valor de -5 con el índice SPI12.

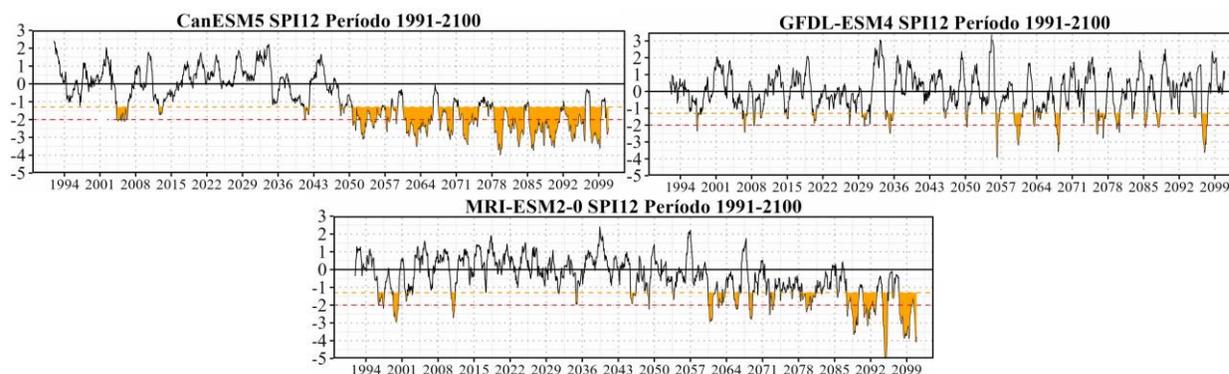


Figura 5-17: Sequías con índice SPI12 en el periodo 1991-2100 para los modelos seleccionados: CanESM5, GFDL-ESM4 y MRI-ESM2-0.

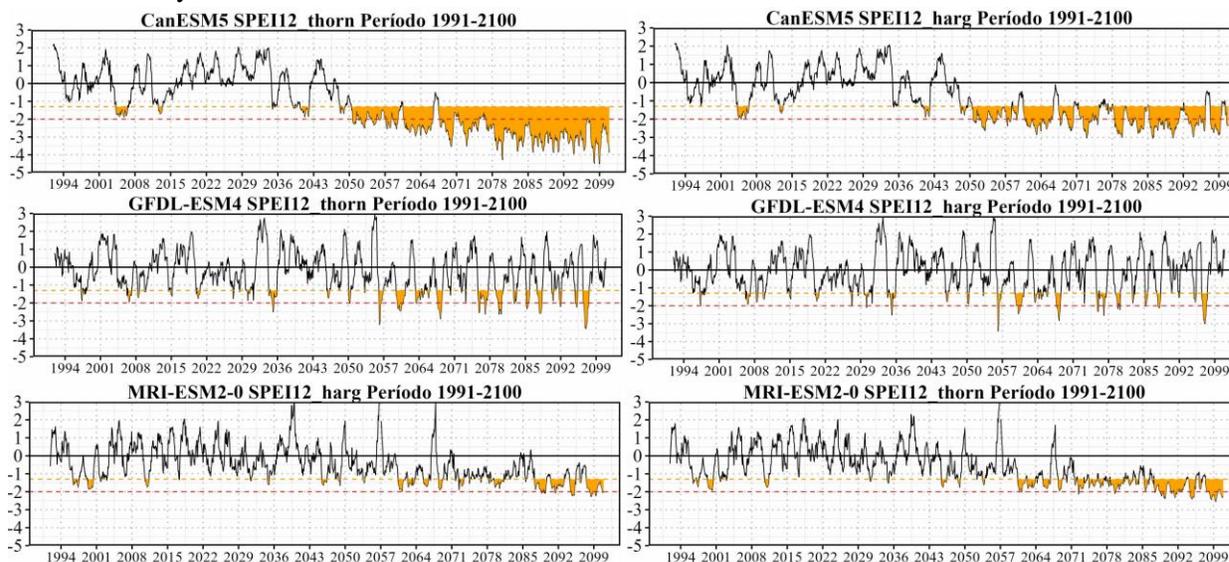


Figura 5-18: Sequías con índices SPEI12 con Thornthwaite (columna izquierda) y con Hargreaves (columna derecha) para CanESM5 (fila superior), GFDL-ESM4 (fila central) y MRI-ESM2-0 (fila inferior) en el periodo 1991-2100.

5.3.2 Frecuencia de Índices de Sequía

En la Figura 5-19 se presentan las frecuencias porcentuales según clasificación de los índices SPI12, SPEI12 con Hargreaves y Thornthwaite dentro del periodo histórico 1991-2020. En todos los modelos y para los tres índices, se observa que en la mayor parte del periodo histórico se presentan condiciones normales o húmedas. Los índices de datos observados (Mataverí) también reflejan ese patrón, lo que podría indicar que los modelos capturan de manera razonable la tendencia de los datos.

En la mayoría de los índices SPI y SPEI para todos los GCM junto a Mataverí se cumple que la frecuencia acumulada de los eventos excepcional, extremada y severamente seco (bajo un umbral de -1,3) es cercano o menor a un 12,5%, con un 9% constante para Mataverí. Con relación a los GCM seleccionados para el índice SPI, es decir, el modelo CanESM5, GFDL-ESM4 y MRI-ESM2-0, muestran una mayor frecuencia de eventos extremadamente secos. La frecuencia acumulada de los eventos excepcional, extremada y severamente secos también es mayor que lo estimado en base a los datos de Mataverí, donde el modelo MRI-ESM2-0 tiene el máximo valor de frecuencia de un 13%.

Las frecuencias porcentuales acumuladas de los eventos bajo el umbral de -1,3 de los índices SPEI12 son similares a los del índice SPI12. Se puede notar que las frecuencias de sequías con SPEI presentan menos valores excepcionalmente secos que en el caso del índice SPI como se puede observar con el modelo de circulación general MRI-ESM2-0.

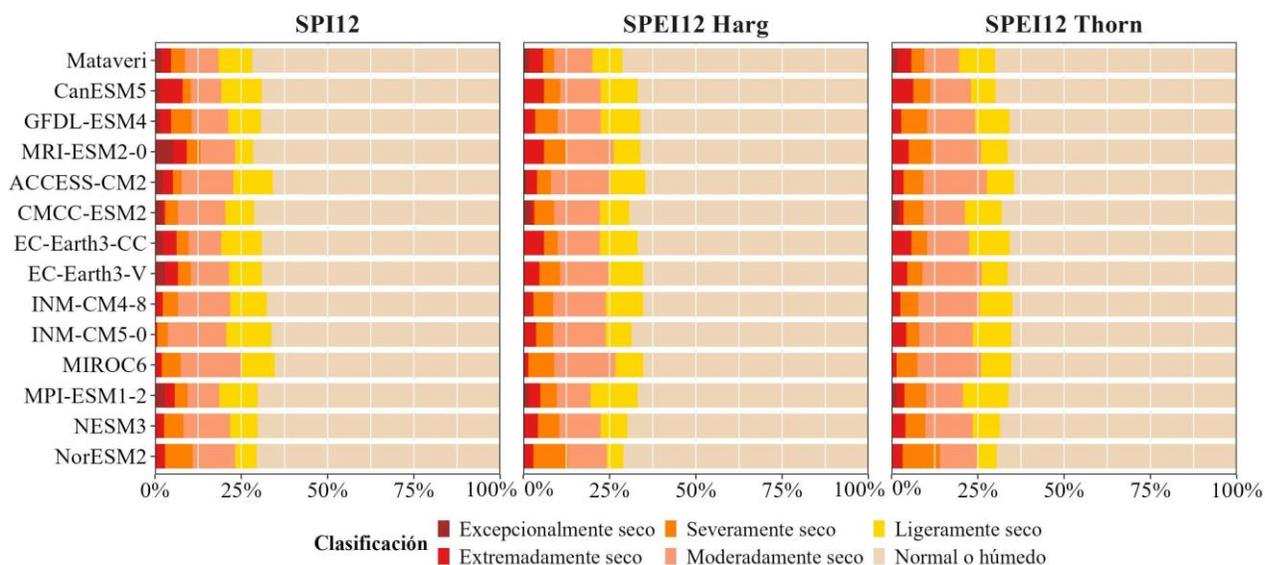


Figura 5-19: Frecuencia de sequías según índices SPI-12, SPEI-12 Harg. y SPEI-12 Thorn. periodo 1991-2020.

En el Anexo B.3 se presentan figuras con las frecuencias porcentuales para todos los modelos según clasificación de los índices SPI12, SPEI12 con Hargreaves y SPEI12 con Thornthwaite para el futuro cercano (FC) y lejano (FL), respectivamente.

5.3.2.1 Modelos seleccionados

A modo de comparar los modelos seleccionados, se presentan en la Figura 5-20 las frecuencias porcentuales según clasificación de los índices SPI12, SPEI12 con Hargreaves y Thornthwaite para los tres periodos de análisis. En los tres casos de índices y en el periodo histórico los modelos son similares con predominancia de condición normal o húmeda, aunque se muestra en algunos modelos eventos de sequías excepcionalmente secas como el modelo MRI-ESM2-0 con SPI12.

Por otro lado, tanto en el futuro cercano como en el lejano, se observa un incremento de las frecuencias de sequías. En el futuro lejano, el modelo CanESM5 proyecta frecuencias de sequías excepcionalmente secas, superando el 50% en los tres índices analizados. En la mayoría de los casos el método de Thornthwaite estima frecuencias más altas de sequías excepcional, extremada y severamente secas en comparación con el método de Hargreaves, con diferencias notables en el futuro lejano como es el caso de del modelo MRI-ESM2-0 con una frecuencia del 77% en el SPEI12-Thornthwaite frente a un 49% en Hargreaves.

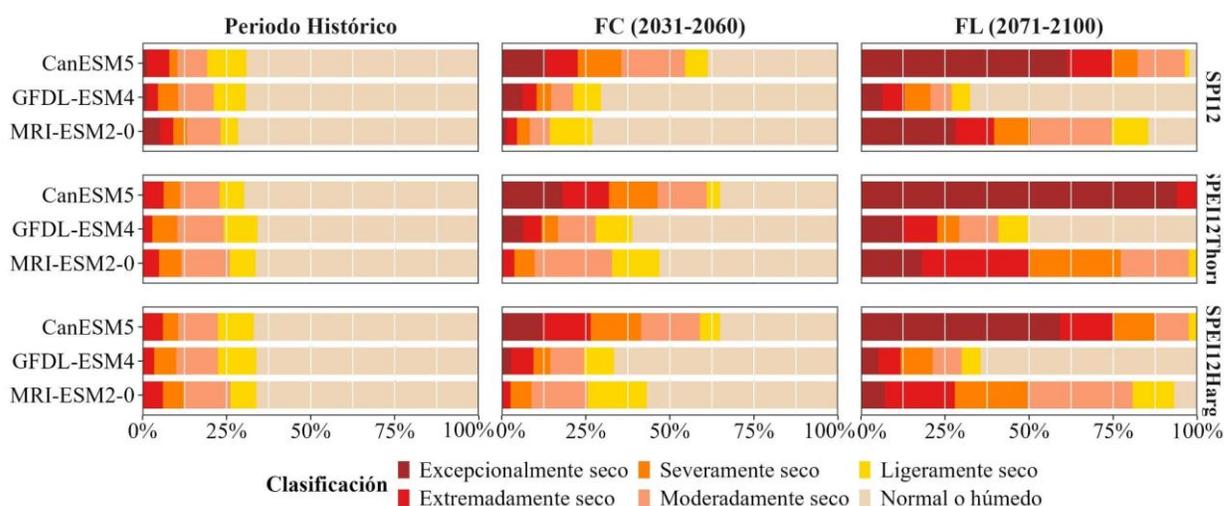


Figura 5-20: Frecuencias de sequías según índices SPI12 y SPEI12 con Thornthwaite y Hargreaves en los periodos de análisis para los GCM seleccionados: CanESM5, GFDL-ESM4 y MIR-ESM2-0.

En la Figura 5-21 se muestran las frecuencias porcentuales de sequías para los índices SPI9, SPEI9 con Thornthwaite y con Hargreaves. Comparando con respecto a la escala de 12 meses, la frecuencia de eventos es similar para los tres índices en especial en el periodo histórico. En las proyecciones futuras se observa un aumento de frecuencias de sequías excepcionales en el caso del modelo CanESM5. No es directo que el aumento en la escala de meses significa un aumento en la frecuencia de eventos de una específica clasificación, como se puede observar en el caso del modelo MRI-ESM2-0 con el índice SPEI en el futuro lejano, donde la frecuencia de eventos excepcionalmente secos es mayor en la escala de 9 meses en comparación a la de 12 meses.

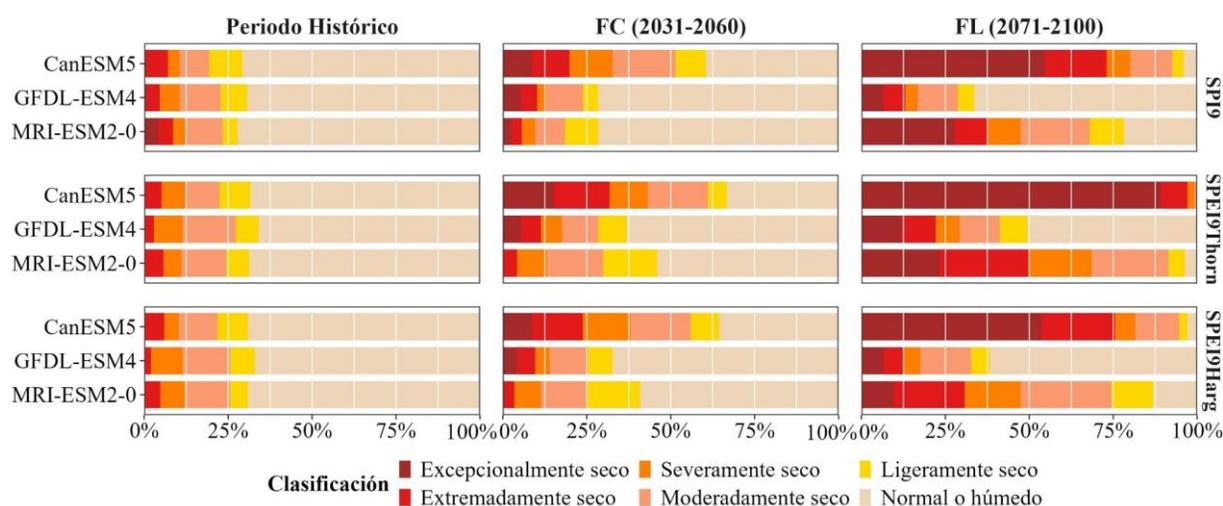


Figura 5-21: Frecuencias de sequías según índices SPI9 y SPEI9 con Thornthwaite y Hargreaves en los periodos de análisis para los GCM seleccionados: CanESM5, GFDL-ESM4 y MIR-ESM2-0.

En la Tabla 5-4 se muestran las frecuencias acumuladas bajo el umbral de -1,3 de los periodos de análisis para los GCM seleccionados. En el periodo histórico los valores porcentuales de frecuencia son relativamente homogéneos entre los modelos, con un rango que va del 10% al 13%, y son similares a los datos observados de la estación Mataveri, que presenta una frecuencia promedio de un 9%.

Al analizar los periodos futuros, se observa un aumento en la variación de las frecuencias de sequías entre los modelos. Por ejemplo, el modelo CanESM5 alcanza una frecuencia del 82% para el SPI12, mientras que otros modelos como GFDL-ESM4 y MRI-ESM2-0 muestran porcentajes más bajos, de 21% y 50% respectivamente.

Tabla 5-4: Frecuencias porcentuales de meses bajo umbral -1,3 de GCM seleccionados para índices SPI y SPEI.

GCM	Per.	SPI12 [%]	SPEI12-T [%]	SPEI12-H [%]	SPI9 [%]	SPEI9-T [%]	SPEI9-H [%]
Mataveri	Hist.	9	9	9	8	9	9
CanESM5	Hist.	10	11	11	11	12	10
CanESM5	FC	36	46	41	33	43	38
CanESM5	FL	82	100	87	80	99	82
GFDL-ESM4	Hist.	11	10	10	11	11	11
GFDL-ESM4	FC	15	17	14	13	18	14
GFDL-ESM4	FL	21	29	21	17	29	18
MRI-ESM2-0	Hist.	13	11	12	12	11	12
MRI-ESM2-0	FC	8	10	9	10	13	11
MRI-ESM2-0	FL	50	77	49	47	68	47

Nota: SPEI-T se refiere al índice de escala i con método de Thornthwaite, SPEI-H se refiere al índice de escala i con método de Hargreaves.

En la Tabla 5-5 se muestran los promedios, valores máximos y mínimos de los GCMs seleccionados para los diferentes índices y periodos de las frecuencias porcentuales bajo un umbral

de -1,3. En el periodo histórico los GCMs no presentan una diferencia significativa. Sin embargo, en el periodo futuro los rangos de valores son bastante grandes, donde se destaca el rango de 71% entre el mínimo y máximo en el índice SPEI12 con el método de Thornthwaite en el futuro lejano.

Tabla 5-5: Valores máximos, mínimos y promedio de las frecuencias bajo umbral -1,3 de GCMs los seleccionados en los tres periodos de análisis.

Frecuencias [%]		SPI12	SPEI12-T	SPEI12-H	SPI9	SPEI9-T	SPEI9-H
H	Max	13	11	12	12	12	12
	Min	10	10	10	11	11	10
	Promedio	11	11	11	11	12	11
FC	Max	36	46	41	33	43	38
	Min	8	10	9	10	13	11
	Promedio	19	24	21	18	25	21
FL	Max	82	100	87	80	99	82
	Min	21	29	21	17	29	18
	Promedio	51	69	53	48	66	49

Nota: SPEIi-T se refiere al índice de escala i con método de Thornthwaite, SPEIi-H se refiere al índice de escala i con método de Hargreaves.

5.3.2.2 Zonas homogéneas

La frecuencia de sequías promedio de los GCMs seleccionados para las zonas homogéneas, de índices SPI, SPEI con Thornthwaite y Hargreaves para las escalas de 9 y 12 meses, bajo un umbral de -1,3 se encuentra en el Anexo B.3 (Tabla Apx. B-6). En el período histórico, las frecuencias son similares, con un 11,0% en la Zona 1, 10,8% en la Zona 2 y 10,7% en la Zona 3 para el índice SPI12. En el futuro cercano, estas frecuencias aumentan a 19,5%, 19,7% y 19,9%, y en el futuro lejano alcanzan valores de 51,6%, 51,1% y 51,4% respectivamente. Considerando todos los índices, las diferencias en las frecuencias entre las zonas son mínimas, con variaciones inferiores al 1%.

5.3.3 Variaciones

Los valores de número de eventos de sequía, duración (total, promedio, máxima), severidad e intensidad promedio y máxima de sequías para el índice SPI12 en los periodos de análisis y para los GCM seleccionados se presentan en la Tabla 5-6. Los demás valores de SPI y SPEI con Thornthwaite y Hargreaves para los GCMs seleccionados en los diferentes periodos y escalas de 9 y 12 meses se encuentran en el Anexo B.3.

En el futuro lejano, el modelo CanESM5 presenta valores críticos de sequía con una duración total de 287 meses y una intensidad promedio de 0,8. Entre los modelos seleccionados, el MRI-ESM2-0 presenta la mayor cantidad de eventos de sequía (17) alcanzando una intensidad máxima de 2,3. El modelo GFDL-ESM4 es el menos crítico de los modelos en el futuro lejano, con una intensidad promedio de 0,5 y duración total de 72 meses.

Tabla 5-6: N° de sequías, duración, severidad e intensidad de SPI12 para los GCM seleccionados.

GCM SPI12	Periodo	N° sequías	Duración [mes]			Severidad [-]		Intensidad [1/mes]	
			Total	Prom	Max	Prom	Max	Prom	Max.
CanESM5	Hist.	2	36	18	27	8,5	14,2	0,4	0,5
CanESM5	FC	11	124	11	69	6,4	50,2	0,3	0,7
CanESM5	FL	10	287	29	78	33,0	99,8	0,8	1,6
GFDL-ESM4	Hist.	11	37	3	8	1,1	3,5	0,3	0,7
GFDL-ESM4	FC	7	51	7	18	4,8	16,0	0,5	1,0
GFDL-ESM4	FL	10	72	7	16	4,3	17,5	0,5	1,3
MRI-ESM2-0	Hist.	7	46	7	15	4,2	14,8	0,4	1,1
MRI-ESM2-0	FC	5	29	6	12	2,8	6,9	0,5	1,1
MRI-ESM2-0	FL	17	176	10	42	10,6	65,7	0,6	2,3

En la Figura 5-22, Figura 5-23 y Figura 5-24 se presentan los diagramas de caja para todos los GCM de las variaciones del periodo futuro respecto al histórico de número de eventos de sequía, duración (total, promedio, máxima), severidad e intensidad promedio y máxima de sequías para los índices SPI12, SPEI12 con Thornthwaite y SPEI12 con Hargreaves. En cruz se destacan los GCM seleccionados: CanESM5, GFDL-ESM4 y MRI-ESM2-0.

El modelo de circulación general CanESM5 para el SPI12 presenta un aumento significativo de número de eventos en el futuro cercano (11 eventos) y lejano (10 eventos) comparados con solo 2 eventos en el periodo histórico. La duración total aumenta de 36 a 287 meses en el futuro lejano. La severidad promedio en el futuro lejano aumenta de manera drástica respecto a los otros GCM, presentándose como un valor extremo estadísticamente al igual que la intensidad máxima que llega a un valor de 1,6, lo cual es considerablemente mayor a los valores históricos (0,5).

Para el caso del modelo GFDL-ESM4 ocurre lo contrario con los números de eventos de sequías, estos disminuyen ligeramente en los periodos futuros, pasando de 11 en el histórico a 7 y 10 en el futuro cercano y lejano, respectivamente. Por otro lado, en comparación al periodo histórico, la duración promedio es 14 y 35 meses mayor en el futuro cercano y lejano, respectivamente. Además, la severidad promedio aumenta de 1,1 en el periodo histórico a 4,8 en el futuro cercano, manteniéndose moderada en ambos periodos futuros. No obstante, en el futuro lejano, la intensidad máxima se eleva de 0,7 a 1,3, lo que sugiere una posible ocurrencia de eventos de sequía más extremos en ese periodo.

En el tercer modelo MRI-ESM2-0, los números de sequías aumentan considerablemente en el futuro lejano (17 eventos), y también se observa un aumento en la duración total (176 meses). La severidad e intensidad máxima alcanzan valores extremos, es decir, tendencia a eventos extremadamente intensos.

Variación SPI-12 bajo umbral de -1,3

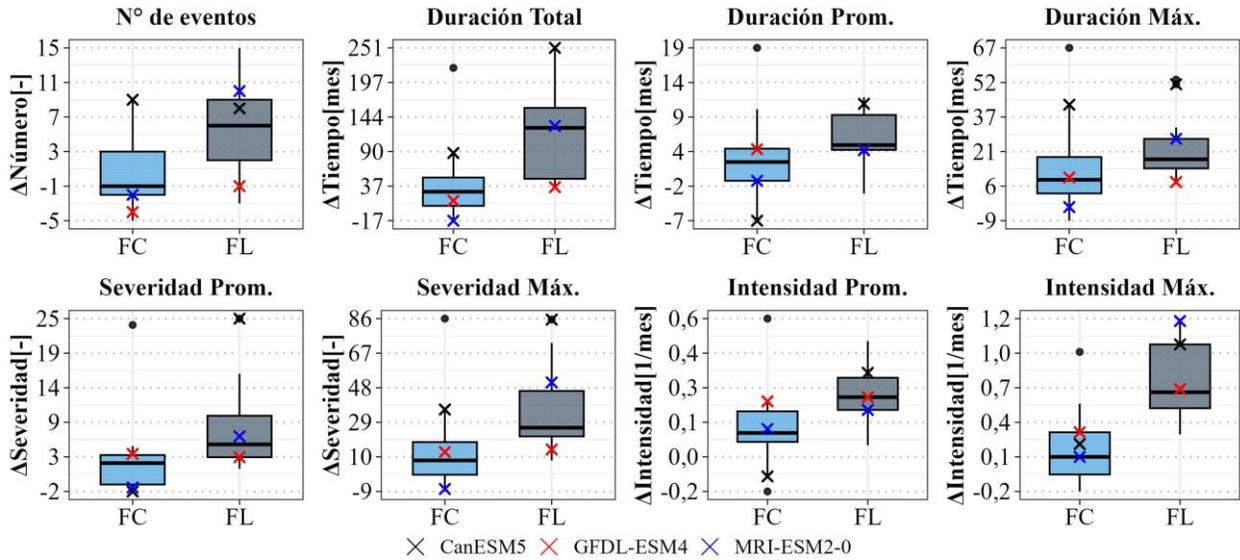


Figura 5-22: Variación respecto al periodo histórico de N° de eventos, duración, intensidad y severidad de GCM con SPI-12, bajo un umbral de -1,3.

Los datos de N° de eventos, duración, intensidad y severidad de los modelos seleccionados con SPEI9 y SPEI12 con el método de Thornthwaite y Hargreaves, bajo un umbral de -1,3, se presentan en el Anexo B.3, Tabla Apx. B-8 y Tabla Apx. B-9, respectivamente.

A partir de la Figura 5-23 y datos en anexo de la Tabla Apx. B-8, con respecto al SPEI12 con el método de Thornthwaite, se destaca el modelo CanESM5. En el futuro cercano muestra un incremento en la cantidad de eventos, con una duración máxima de 114 meses, en comparación con los valores históricos. Se distingue respecto a todos los otros GCM por sus valores extremos, en el futuro lejano, aunque solo se estima 1 evento de sequía, este es extraordinariamente largo en el tiempo (348 meses), prácticamente la duración de todo el periodo 2071-2100. Además, de su larga duración, es el evento más severo con un promedio de 543.

Variación SPEI-12 Thornthwaite bajo umbral de -1,3

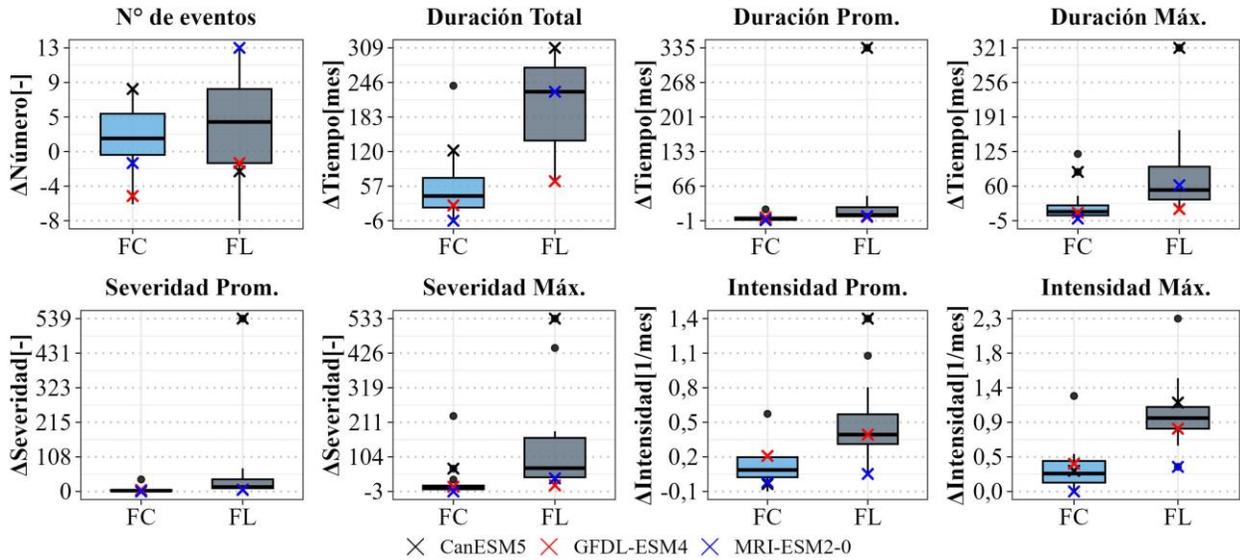


Figura 5-23: Variación respecto al periodo histórico de N° de eventos, duración, intensidad y severidad de GCM con SPEI-12 con Thornthwaite, bajo un umbral de -1,3.

Las variaciones con SPEI12 con el método de ETP de Hargreaves se presentan en la Figura 5-24 y los valores de sin variación se presentan en anexo en la Tabla Apx. B-9. En el caso del modelo CanESM5, al igual que con el método de Thornthwaite se destaca por sus valores de duración y severidad, pero en el caso de la severidad alcanza un valor máximo en el futuro lejano de 77,8. En el caso de los otros dos modelos, también se generan aumentos de todas las variables en el futuro cercano y lejano respecto al histórico. Sin embargo, para el modelo GFDL-ESM4 los números de eventos de sequía disminuyen, pero estos se hacen más prolongados e intensos.

Variación SPEI-12 Hargreaves bajo umbral de -1,3

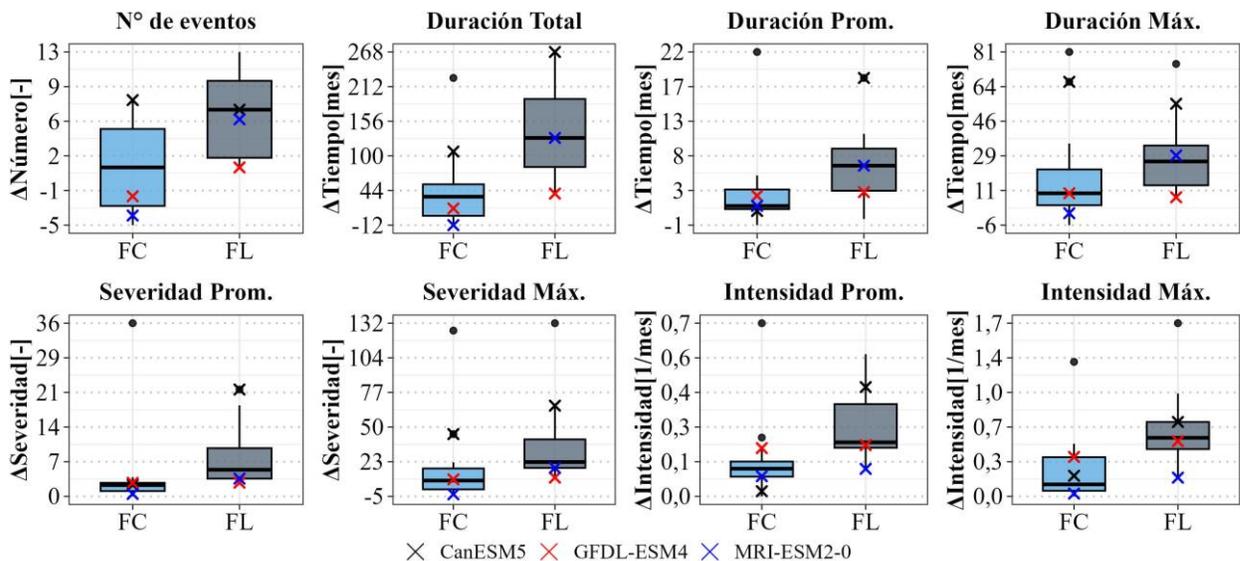


Figura 5-24: Variación respecto al periodo histórico de N° de eventos, duración, intensidad y severidad de GCM con SPEI-12 con Thornthwaite, bajo un umbral de -1,3.

En general, para los 3 índices SPI12, SPEI12-Thorn. y SPEI12-Harg. se observa una tendencia de incremento en el número de eventos de sequía, la duración de estos eventos (total, promedio y máxima), la severidad y la intensidad de las sequías en los escenarios futuros comparado con el periodo histórico. La tendencia es más apreciable en el futuro lejano. La severidad de los eventos también aumenta considerablemente, particularmente en los modelos CanESM5 y MRI-ESM2-0, donde se predicen eventos más extremos. La intensidad, que se refiere a la severidad sobre la duración, muestra incrementos, especialmente en el futuro lejano. Esto puede estimarse que los eventos no solo serán más prolongados en tiempo, sino que también más severos por mes.

Los gráficos de variación para SPI9 y SPEI9 con Thornthwaite y Hargreaves se presentan en el Anexo B.3, Figura Apx. B-15, Figura Apx. B-16 y Figura Apx. B-17. En general, existe un aumento en el N° de eventos, duración, intensidad y severidad de sequías bajo el umbral de -1,3 para los tres índices. De la misma manera que para los eventos de sequía con la escala de 12 meses, el modelo CanESM5 exhibe un gran aumento en la duración y severidad de los eventos respecto a los demás GCMs.

5.4 Comparación RCP y SSP

Con el propósito de comparar resultados de otras investigaciones, se obtiene el promedio y variaciones de precipitación y temperatura media de los datos de Gatica y Toro (2020) para los mismos periodos del presente estudio: periodo histórico (1991-2020), futuro cercano (2031-2060) y futuro lejano (2071-2100). Los datos a estudiar corresponden a 75 modelos GCMs con escenario RCP 8.5, que se encuentran corregidos a nivel mensual con el método de corrección de sesgo QDM. Al no contar con datos de temperatura máxima y mínima, se compara con los datos promedios de temperatura máxima y mínima de los GCM seleccionados.

Los resultados presentados en la Tabla 5-7 para ambos escenarios, RCP y SSP, muestran una reducción de la precipitación futura en comparación a los valores históricos, donde la reducción es más significativa en el futuro lejano con un -17,1% para el escenario RCP y un -28,7% en el escenario SSP5-8.5. Por otra parte, las temperaturas aumentan en ambos escenarios respecto al periodo histórico, con un incremento mayor en el futuro lejano, mostrándose algo superior en el escenario SSP5-8.5 con un incremento de 2,1°C frente a un aumento de 1,8°C bajo el escenario RCP.

Tabla 5-7: Promedios y variaciones de precipitación corregidos del escenario RCP 8.5 calculado a partir de datos de 75 modelos de Gatica y Toro, y datos SSP5-8.5 de GCM seleccionados (CanESM5, GFDL-ESM4, y MRI-ESM2-0) en el periodo histórico, futuro cercano y futuro lejano.

GCM	RCP 8,5				SSP5-8,5			
	Precipitación		Temperatura		Precipitación		Temperatura	
Periodo	Media [mm]	Δ [%]	Media [°C]	Δ [°C]	Media [mm]	Δ [%]	Media [°C]	Δ [°C]
Hist.	1171	-	20,8	-	1167	-	21,0	-
FC	1091	-6,8	21,5	0,7	1103	-5,5	21,5	0,5
FL	971	-17,1	22,6	1,8	832	-28,7	23,1	2,1

Gatica y Toro obtuvieron índices de sequía SPI y SPEI con el método de Thornthwaite para escalas de 12, 24, y 48 meses. A partir de los datos de índices SPI12 y SPEI12 con el método de Thornthwaite y escenario RCP 8.5, se obtuvieron las frecuencias de sequías bajo el umbral -1,3, para obtener las sequías excepcional, extrema y severamente secas (Tabla 5-8).

Tabla 5-8: Frecuencias porcentuales de meses bajo umbral -1,3 para índices SPI12 y SPEI12 con el método de Thornthwaite para los tres periodos de análisis calculado a partir de datos de los 75 modelos de Gatica y Toro.

Índices	SPI12			SPEI12 Thorn.		
	Hist.	FC	FL	Hist.	FC	FL
Promedio [%]	11	20	36	13	33	62
Mediana [%]	11	18	36	13	32	67
Desviación [%]	5	12	22	6	16	22

Con el propósito de comparar las frecuencias en ambos escenarios, RCP y SSP, según índice de sequía SPI12 y SPEI12 con método de Thornthwaite y bajo un umbral de -1,3, se presenta la Figura 5-25. En el periodo histórico 1991-2020, los valores son similares en ambos escenarios e índices, aunque en el caso del SPEI12 con método de Thornthwaite, el escenario RCP muestra una frecuencia 2% mayor.

En el periodo futuro, en ambos escenarios e índices se observa un aumento en las frecuencias de sequía, siendo el índice SPEI el que presenta frecuencias más altas en comparación al SPI. En el futuro lejano, las frecuencias de sequías aumentan hasta un 58% en el escenario SSP y 19% en el futuro cercano bajo el escenario RCP, en relación con el periodo histórico. En el futuro cercano, las proyecciones indican mayores frecuencias de sequía con el escenario RCP en comparación al SSP, con un incremento del 1% para el índice SPI y un 8% para el SPEI. No obstante, en el futuro lejano, las frecuencias de sequías son mayores para el escenario SSP, con diferencias de aproximadamente un 15% para el índice SPI y un 7% para el SPEI.

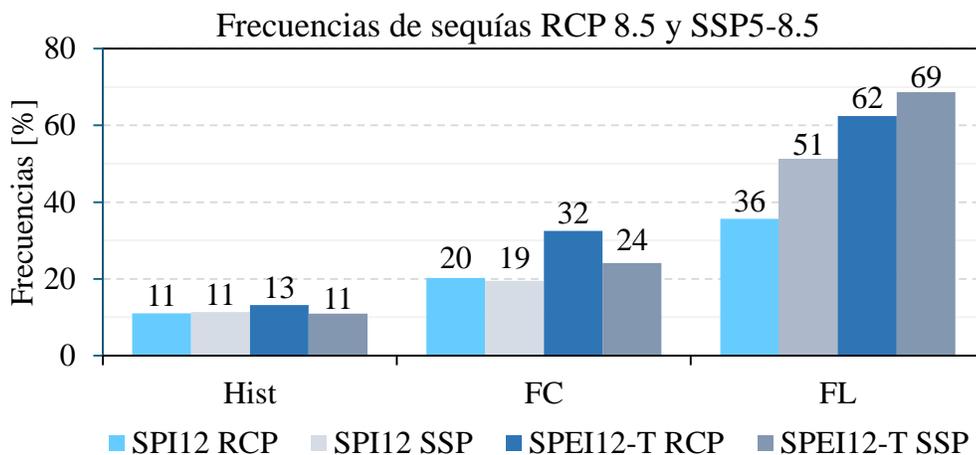


Figura 5-25: Frecuencias de sequías según índices SPI12 y SPEI12-T con método de Thornthwaite con escenario RCP 8.5 y SSP5-8.5 bajo un umbral de -1,3, para los tres periodos de análisis: periodo histórico 1991-2020, futuro cercano 2031-60 y lejano 2071-2100.

5.5 Discusión de selección de modelos

El presente subcapítulo busca discutir la metodología empleada para la selección de modelos de circulación general, y presentar metodologías alternativas para complementar los resultados.

Los criterios utilizados de selección de modelos para disminuir la incertidumbre, particularmente en la comparación de las precipitaciones anuales, pueden presentar una gran dispersión en los valores debido al gran margen de desviación porcentual permitido (20%). Si el criterio se vuelve más riguroso, reduciéndolo al 10%, la incertidumbre podría disminuir, excluyendo modelos como el CanESM5 (17,3% de desviación porcentual), que destaca en el futuro lejano por una mayor disminución en la precipitaciones y mayor aumento en las temperaturas. A su vez, la exclusión del modelo CanESM5 podría reducir el rango de frecuencias de sequías; así, en el futuro lejano, el valor máximo de frecuencia de sequías severas a excepcionales del índice SPI12 en los modelos seleccionados pasaría de un 82% a un 50%.

En el Anexo B.3 Figura Apx. B-18, se presentan los promedios mensuales de los GCM escalados espacialmente sin corrección de sesgo, normalizados por el promedio anual del periodo 1970-2014, junto a la curva normalizada de los datos observados. Los modelos que se presentan son los que cumplen con el criterio de promedios y desviaciones anuales después de la corrección de sesgo analizados en la sección de resultados en el periodo 1991-2020. Se observa que el modelo CanESM5 se desvía en mayor magnitud que los otros modelos de los datos observados. De esta manera, eliminar este modelo reduciría la diferencia en el comportamiento de la CVE entre los modelos brutos.

En relación con la exploración de metodologías alternativas de selección de modelos de circulación general para reducir la incertidumbre, se sugieren las siguientes:

- Selección basada en el comportamiento histórico de índices de sequía. La Figura 5-19 presenta las frecuencias de sequía en el periodo histórico para todos los modelos, si se comparan las frecuencias de la estación Mataveri con los GCMs en el periodo 1991-2020 se podrían tomar modelos como el MPI-ESM1-2.
- Ampliación de la selección de modelos mediante la unión de modelos que cumplen con ambos criterios (análisis de los datos anuales y curva de variación estacional). En el caso de la investigación actual quedarían seis modelos seleccionados: ACCESS-CM2, CanESM5, EC-Earth3-Veg-LR, GFDL-ESM4, MRI-ESM2-0 y MIROC6.
- Selección previa al escalamiento estadístico comparando la curva de variación estacional normalizada con respecto a los datos observados. Similar a lo presentado en la Figura Apx. B-18.

6 CONCLUSIONES

La presente investigación tuvo por objetivo analizar las proyecciones de sequía bajo el escenario SSP5-8.5 para la isla de Rapa Nui. Para ello, se aplicó el método de escalamiento MBCn, lo que permitió obtener las series de precipitación y temperatura diarias proyectadas hacia el 2100, realizar análisis de cambio futuro y evaluar los eventos de sequía en un contexto de cambio climático.

En cuanto al primero objetivo, se estima un aumento en las temperaturas y una disminución en la precipitación, lo que podría afectar directamente la disponibilidad de agua en la isla. Para el futuro lejano 2071-2100, los GCM seleccionados proyectan una disminución de aproximadamente un 29 % en la precipitación media anual, y un aumento de 2,1°C en la temperatura media anual respecto al periodo histórico. Según la clasificación de Köppen, en el futuro cercano, el clima de la isla pasaría de tropical húmedo (Af) a tropical monzónico (Am), mientras que, en el futuro lejano, las condiciones secas y cálidas darían lugar a una transición hacia un clima tropical de sabana (As).

Respecto al segundo objetivo, en términos generales, las proyecciones climáticas sugieren un incremento en la frecuencia de meses con sequía severa a excepcional en Rapa Nui. Para el índice SPI de escala de 12 meses, considerando los GCMs seleccionados, se estima que en el futuro cercano las frecuencias de sequías severas a excepcionales podrían ocurrir entre el 8% y el 36% del tiempo, con un promedio del 19%. En el futuro lejano se proyecta en promedio más de la mitad del tiempo en tales condiciones (51%), con valores que oscilan entre el 21% y 82%. En el caso de la escala de 9 meses, la situación proyectada es similar, con rangos que van del 10% al 33% del tiempo (promedio del 18%) en el futuro cercano, y del 17% al 80% (promedio de 48 %) en el futuro lejano.

Con respecto al índice SPEI con el método de Thornthwaite para los GCMs seleccionados, el rango de frecuencia de sequías severas a excepcionales es mayor en comparación al SPI, donde para una escala de 12 meses el rango se encuentra entre el 10% y 46% en el futuro cercano, y entre un 29% y 100% en el futuro lejano. En la escala de 9 meses, las frecuencias de sequías se dan entre el 13% y 43% del tiempo en el futuro cercano, y entre el 29% y 99% en el futuro lejano.

Las frecuencias de sequías del índice SPEI con el método de Hargreaves no presenta grandes diferencias respecto al SPI, lo que se puede atribuir a la baja variación de la evapotranspiración en el futuro respecto al periodo histórico. Las diferencias en el comportamiento entre los métodos de Hargreaves y Thornthwaite en las proyecciones de sequía, pueden reflejar las diferentes sensibilidades a las condiciones climáticas. Thornthwaite, parece ser un método más sensible ante variaciones de la temperatura; este método depende directamente de la temperatura media y tiende a proyectar mayores aumentos de sequía que Hargreaves.

Para los índices SPI y SPEI con Thornthwaite y Hargreaves en la escala de 9 y 12 meses se observa una tendencia de incremento en el número de eventos de sequía, la duración de estos eventos (total, promedio y máxima), la severidad y la intensidad de las sequías en los escenarios futuros comparado con el histórico. Se recalca que la tendencia es más apreciable y mayor en el futuro lejano.

En general, el índice SPI genera proyecciones menos desfavorables que el índice SPEI con el método de Thornthwaite, por lo que para ese caso no considerar la temperatura podría subestimar

las proyecciones a futuro. Por otro lado, el índice SPEI, incorpora más variables como la evapotranspiración y la precipitación, permite un análisis más integral de la sequía, abordando diferentes tipos de sequía (meteorológica, agrícola e hidrológica).

Finalmente, para el tercer objetivo, se contrastaron los cambios en las forzantes e índices de sequía entre los escenarios RCP y SSP, siendo este último un escenario más actualizado. Los datos de precipitación y temperatura media de Gatica y Toro fueron corregidos mediante el método de escalamiento estadístico QDM, a diferencia de la metodología del estudio actual. Al comparar los resultados proyectados para los mismos periodos de la presente memoria, en el futuro cercano el escenario RCP estima valores más críticos, pero similares respecto al escenario SSP.

En el futuro cercano, respecto al periodo histórico, el escenario RCP proyecta una disminución de la precipitación media anual en un 6,7% y un aumento en la temperatura media anual en 0,7°C, mientras que el escenario SSP proyecta una disminución de 5,5% en la precipitación y un aumento de 0,5°C en la temperatura. Por el contrario, en el futuro lejano, el escenario SSP proyecta resultados más desfavorables, con una disminución del 29% de las precipitaciones frente a una reducción del 17% en el escenario RCP, y un incremento de 2,1°C en la temperatura media, comparado con un aumento de 1,8°C en el escenario RCP.

En relación con la frecuencia de sequías bajo el umbral de -1,3 para índices SPI12 y SPEI12 con el método de Thornthwaite de escenarios RCP y SSP, en el periodo futuro, en ambos se observa un aumento en las frecuencias de sequía, siendo el índice SPEI el que presenta frecuencias más altas en comparación al SPI. En el futuro cercano, las proyecciones estiman mayores frecuencias de sequía con el escenario RCP en comparación al SSP, con una diferencia del 8% para el índice SPEI12. Por otra parte, en el futuro lejano el escenario SSP presenta mayores frecuencias que el escenario RCP, alcanzando diferencias de un 15%.

Si bien esta memoria se centró en escalas de 9 y 12 meses para el análisis de índices de sequía, sería de gran valor extender el análisis de los índices a duraciones menores a 9 meses. Esto permitiría una mejor comprensión de la sequía agrológica posible en la isla, una dimensión que escalas mayores no logran captar de manera adecuada (OMM, 2012).

Por otro lado, la distribución espacial de las forzantes y las frecuencias de las sequías bajo un umbral de -1,3 para los modelos seleccionados, son similares entre zonas homogéneas. Las zonas definidas en la memoria, al tener condiciones climáticas o comportamientos similares en términos de precipitación y temperatura, puede llevar a índices de sequías semejantes. Una posible razón de esta similitud, es que la definición de las zonas homogéneas podría no ser la más adecuada para captar variaciones significativas en los índices.

Adicionalmente, es fundamental considerar la implementación de una red de monitoreo meteorológica más extensa en Rapa Nui, que permita una evaluación más precisa de los procesos hidrometeorológicos de la isla. Dado que no necesariamente las forzantes climáticas se distribuyen de manera homogénea a lo largo de la isla, una mayor cobertura de estaciones contribuiría a mejorar el entendimiento de los patrones locales.

Por último, es importante tener en cuenta los desafíos como oportunidades para enfrentar el cambio climático en la Isla de Rapa Nui, destacando su alta vulnerabilidad frente a la reducción proyectada en la disponibilidad de agua. Las proyecciones bajo el escenario SSP5-8.5 sugieren incrementos en temperatura y disminuciones en la precipitación hacia finales del siglo, lo cual pone en riesgo el abastecimiento hídrico de la isla. Dada la falta de cursos de agua permanentes y la dependencia del acuífero, esta situación presenta un escenario de riesgo para la isla, especialmente en el contexto de una mayor frecuencia e intensidad de sequías proyectadas. Sin embargo, dado el nivel de incertidumbre en las proyecciones climáticas provocada por la variabilidad de respuesta de los modelos a las condiciones futuras, es de gran utilidad analizar las diferentes metodologías de reducción de incertidumbre.

BIBLIOGRAFÍA

- Arnfield, A. J. (2024). *Köppen climate classification*. *Encyclopedia Britannica*. <https://www.britannica.com/science/Koppen-climate-classification>
- Cannon, A. J., Sobie, S. R., & Murdock, T. Q. (2015). Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: How well do methods preserve changes in quantiles and extremes? *Journal Of Climate*, 28, 6938–6959. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00754.1>
- Cannon, A. J. (2018). *Multivariate quantile mapping bias correction: an N-dimensional probability density function transform for climate model simulations of multiple variables*. *Climate Dynamics*, 50(1–2), 31–49. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3580-6>
- Chen, J., Brissette, F. P., & Leconte, R. (2011). *Uncertainty of downscaling method in quantifying the impact of climate change on hydrology*. *Journal of Hydrology*, 401(3–4), 190–202. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.02.020>
- Copernicus. (2024). *Climate projections*. Copernicus Climate Change Service. <https://climate.copernicus.eu/climate-projections>
- Corporación Nacional Forestal (CONAF). (2019). *Catastro de uso del suelo y vegetación: Monitoreo y actualización en la Región de Valparaíso*. <https://sit.conaf.cl/>
- Dirección General de Aguas DGA. (2010). *Caracterización Hidrogeológica de la Isla de Pascua*. S.I.T. N° 213. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile. Elaborado por: Geólogo Sr. Mauricio Claría Hofer.
- Dirección General de Aguas DGA. (2019). *Aplicación de la metodología de actualización del Balance Hídrico Nacional en las cuencas de las Macrozonas Austral e Isla de Pascua*. Dirección General de Aguas, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/32779>
- Dirección General de Aguas DGA. (2021). *Nuevas Normarles Climáticas 1991-2020*. https://dga.mop.gob.cl/dgadocumentos/Nuevas_Normales_Climaticas.pdf
- Edmunds Gorman, T. (2007). *Estimación de la contaminación ambiental por plaguicidas en suelos agrícolas de la Isla de Pascua, V Región* (Seminario de título, Facultad de Ciencias, Universidad de Chile). Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/188368>
- Edmunds, T. (2023). *Informe medioambiental: Evaluación de daños por incendios en el patrimonio natural de Rano Raraku*. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). https://articles.unesco.org/sites/default/files/medias/fichiers/2024/05/uns-ranoraraku_informe-03.pdf
- Gatica, C., & Toro, I. (2020). *Proyección de los eventos de sequía para Rapa Nui escenarios de cambio climático RCP 4,5 y 8,5*. Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica XXIV Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica.

- González-Ferrán, O., Mazzuoli, R., & Lahsen, A. (2004). *Geología del Complejo Volcánico Isla de Pascua Rapa Nui, Chile = Isla de Pascua un afloramiento de las entrañas de la tierra - Carta Geológica-Volcánica*. Centro de Estudios Volcanológicos, Santiago, Chile.
- Government of Canada. (2021). *Forcing scenarios*. <https://climate-scenarios.canada.ca/?page=forcing-scenarios>
- Government of Canada. (2023). *CMIP6 and Shared Socio-economic Pathways overview*. Canada.Ca. <https://climate-scenarios.canada.ca/?page=cmip6-overview-notes>
- Gundermann, H., & Rojas, R. (2021). *Economía del turismo y etnicidad en Rapa Nui*. *Diálogo Andino*, 64, 199-214. <https://doi.org/10.4067/S0719-26812021000100199>
- Hargreaves G.H. (1994). *Defining and using reference evapotranspiration*. *J. Irrig. and Drain. Engrg.*, ASCE 120(6): 1132–1139
- Ingeniería Agrícola Ltda. (1998). *Diagnóstico para el desarrollo de Isla de Pascua: Proyecto piloto de riego de cultivos hortofrutícolas*. Comisión Nacional de Riego, Santiago, Chile.
- Instituto Nacional de Estadísticas INE. (2017). Resultados CENSO 2017. [Archivo Excel].<http://resultados.censo2017.cl/>
- Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático. (2018). *Calentamiento global de 1,5 °C: Informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales y las trayectorias co-rrespondientes que deberían seguir las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, en el contexto del reforzamiento de la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, el desarrollo sostenible y los esfuerzos por erradicar la pobreza* https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/SR15_Summary_Volume_spanish.pdf
- Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático. (2018). *Anexo I: Glosario*. En J. B. R. Matthews (Ed.), *Calentamiento global de 1,5 °C: Informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales y las trayectorias correspondientes que deberían seguir las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, en el contexto del reforzamiento de la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, el desarrollo sostenible y los esfuerzos por erradicar la pobreza* (pp. 73-94). Recuperado de https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/10/SR15_Glossary_spanish.pdf
- Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático. (2021). *Sixth Assessment Report: Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Intergovernmental Panel on Climate Change. Disponible en: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático. (2021a). *Resumen para responsables de políticas*. En V. Masson-Delmotte, 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, & B. Zhou (Eds.), *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.

- Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático. (2021b). FAQ 2.2, Figure 1. In S. K. Gulev, P. W. Thorne, J. Ahn, F. J. Dentener, C. M. Domingues, S. Gerland, D. Gong, D. S. Kaufman, H. C. Nnamchi, J. Quaas, J. A. Rivera, S. Sathyendranath, S. L. Smith, B. Trewin, K. von Schuckmann, & R. S. Vose (Authors), *Chapter 2. Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (V. Masson-Delmotte, 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, & B. Zhou, Eds.) (Chapter 2, pp. 287–422). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.004>
- Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático. (2021c). FAQ 4.3, Figure 1 [Figure]. In J.-Y. Lee, J. Marotzke, G. Bala, L. Cao, S. Corti, J.P. Dunne, F. Engelbrecht, E. Fischer, J.C. Fyfe, C. Jones, A. Maycock, J. Mutemi, O. Ndiaye, S. Panickal, & T. Zhou (2021), *Chapter 4. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 553–672). In V. Masson-Delmotte, 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, & B. Zhou (Eds.), Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.006>
- McKee, T., Doesken, N. J., & Kleist, J. (Enero de 1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. *8th Conference on Applied Climatology*. California, Estados Unidos.
- Milad, C. A. (2010). *Diagnóstico de los Recursos Hídricos Subterráneos de la Isla de Pascua*. Universidad de Chile.
- Ministerio de Agricultura. (2022). *Recursos naturales y medio ambiente en Isla de Pascua*. Gobierno de Chile. https://www.sitrural.cl/wp-content/uploads/2022/05/I_Pascua_rec_nat.pdf
- NASA JPL. (2013). NASA Shuttle Radar Topography Mission Global 1 arc-second (SRTMGL1) Version 3.0. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. <https://doi.org/10.5067/MEaSURES/SRTM/SRTMGL1.003>.
- National Drought Mitigation Center. (2024). *U.S. Drought Monitor*. <https://droughtmonitor.unl.edu/About/AbouttheData/DroughtClassification.aspx>
- Ndayiragije, J. M., & Li, F. (2022). *Effectiveness of drought indices in the assessment of different types of droughts, managing and mitigating their effects*. *Climate*, 10(9), 125. <https://doi.org/10.3390/cli10090125>
- Ortiz-Gómez, R., Cardona-Díaz, J. C., Ortiz-Robles, F. A., y Alvarado-Medellín, P. (2018). *Characterization of droughts by comparing three multiscale indices in Zacatecas, Mexico*. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 9(3). <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-03-03>

- Organización Meteorológica Mundial. (2012). *Guía del usuario sobre el Índice normalizado de precipitación*. (OMM-Nº 1090) (M. Svoboda, M. Hayes y D. Wood). Ginebra.
- Organización Meteorológica Mundial (OMM) y Asociación Mundial para el Agua. (2016). *Manual de indicadores e índices de sequía* (M. Svoboda y B. A. Fuchs). Programa de gestión integrada de sequías, Serie 2 de herramientas y directrices para la gestión integrada de sequías. Ginebra.
- SASIPA. (2023). *Reporte de sostenibilidad 2022-2023*. <https://www.sasipa.cl/wp-content/uploads/sustentabilidad/sostenibilidad2022-2023.pdf>
- SASIPA. (2024). *Agua potable*. <https://www.sasipa.cl/agua-potable/>
- Seria Ríos, S. K. (2023). *Impactos del cambio climático en proyecciones de sequía meteorológica para sectores productivos agrícolas del río Cogotí*. Región de Coquimbo, Chile [Tesis de maestría, Universidad de Chile]. Repositorio Académico de la Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/193056>
- Tebaldi, C., Debeire, K., Eyring, V., Fischer, E., Fyfe, J., Friedlingstein, P., Knutti, R., Lowe, J., O'Neill, B., Sanderson, B., van Vuuren, D., Riahi, K., Meinshausen, M., Nicholls, Z., Tokarska, K. B., Hurtt, G., Kriegler, E., Lamarque, J.-F., Meehl, G., Moss, R., Bauer, S. E., Boucher, O., Brovkin, V., Byun, Y.-H., Dix, M., Gualdi, S., Guo, H., John, J. G., Kharin, S., Kim, Y., Koshiro, T., Ma, L., Olivie, D., Panickal, S., Qiao, F., Rong, X., Rosenbloom, N., Schupfner, M., Séférian, R., Sellar, A., Semmler, T., Shi, X., Song, Z., Steger, C., Stouffer, R., Swart, N., Tachiiri, K., Tang, Q., Tatebe, H., Voldoire, A., Volodin, E., Wyser, K., Xin, X., Yang, S., Yu, Y., & Ziehn, T. (2021). *Climate model projections from the Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) of CMIP6*, Earth Syst. Dynam., 12, 253–293, <https://doi.org/10.5194/esd-12-253-2021>
- Thorntwaite, C. W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review* 38: 55–94. DOI:10.2307/2107309.
- Vezzoli, L., & Acocella, V. (2009). *Hotspot volcanism at Easter Island: An end-member type of hotspot volcanism*. *Geological Society of America Bulletin*, 121(5-6), 869-886. DOI:10.1130/B26470.1
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). *A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index*. *Journal of Climate*, 23(7), 1696-1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
- Viner, D. (2012). Spatial Downscaling. <http://www.cccsn.ec.gc.ca/?page=downscaling>.
- World Climate Research Programme. (2024). *WCRP Coupled Model Intercomparison Project (CMIP)*. <https://www.wcrp-climate.org/wgcm-cmip>
- World Climate Research Programme. (2024). *CMIP overview*. <https://wcrp-cmip.org/cmip-overview/>

- Zargar, A., Sadiq, R., Naser, B., & Khan, F. I. (2011). *A review of drought indices*. *Environmental Reviews*, 19(NA), 333–349. <https://doi.org/10.1139/a11-013>
- Zelen, M., & Severo, N. C. (1965). Probability Functions. In: M. Abramowitz, & I. Stegun (eds.), *Handbook of Mathematical Functions* (pp. 925-995). New York, USA: Dover Publications.

ANEXO A: METODOLOGÍA

A.1. EVAPOTRANSPIRACIÓN

La fórmula de Thornthwaite (1948) queda definida por la expresión:

$$ETP = ETP_{sin\ correjir} \times \frac{N}{12} \frac{d}{30} \quad (6-1)$$

$$ETP_{sin\ correjir} = 16 \left(\frac{10t}{I} \right)^a ; i = \left(\frac{t}{5} \right)^{1,514} ; I = \sum i \quad (6-2)$$

$$a = 0,000000675 \times I^3 - 0,0000771 \times I^2 + 0,01792 \times I + 0,49239 \quad (6-3)$$

Donde:

- ETP [mm/mes]: Evapotranspiración potencial corregida.
- $ETP_{sin\ correjir}$ [mm/mes]: ETP mensual para meses de 30 días y 12 horas de sol.
- t [°C]: Temperatura media mensual.
- N: Número máximo de horas de sol, dependiendo del mes y latitud.
- d: Número de días
- I: índice de calor anual.

La fórmula de Hargreaves (1994) que se utiliza en el paquete SPEI queda definida por la ecuación (6-4). Como el paquete utiliza como input valores mensuales de temperatura máxima y mínima, mantiene constantes los valores diarios equivalente al valor mensual.

$$ET_o = 0,0023 \times 0,408 \times R_a \times (t_{media} + 17,8) \times T^{0,5} \quad (6-4)$$

$$t_{media} = \frac{(t_{max} + t_{min})}{2} ; T = (t_{max} - t_{min}) \quad (6-5)$$

Donde:

- ET_o [mm]: Evapotranspiración Potencial mensual.
- R_a [$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$]: Radiación.
- t_{max} [°C]: Temperatura máxima diaria.
- t_{min} [°C]: Temperatura mínima diaria.
- T [$\text{C}^{0,5}$]: Rango de temperatura.
- La constante 0,408 es para convertir la radiación a equivalentes de evaporación en mm.

A.2. ÍNDICES

De lo presentado por Ortiz-Gómez et al. (2018), el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI), se obtiene mediante la ecuación (6-6), donde la precipitación es ajustada generalmente a una distribución Gamma o Pearson III. Posteriormente, con la aproximación de Zelen y Severo (1965), se transforma a una variable normal estándar Z con media cero y varianza uno.

$$Z = SPI = \begin{cases} - \left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right); & \text{si } 0,0 < H(x) \leq 0,5 \\ + \left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right); & \text{si } 0,5 < H(x) < 1,0 \end{cases} \quad (6-6)$$

$$t = \begin{cases} \sqrt{\ln \left(\frac{1}{(H(x))^2} \right)} & \text{si } 0,0 < H(x) \leq 0,5 \\ \sqrt{\ln \left(\frac{1}{(1 - H(x))^2} \right)} & \text{si } 0,5 < H(x) < 1,0 \end{cases} \quad (6-7)$$

$$H(x) = q + (1 - q)G(x) \quad (6-8)$$

Donde c_i y d_i son coeficientes, t es una variable, $H(x)$ función de probabilidad acumulada, q es la probabilidad de tener valores de precipitación iguales a 0 y $G(x)$ es la probabilidad acumulada de la función gamma incompleta.

El Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración (SPEI) sigue la misma mecánica que el índice SPI utilizando como input el balance entre la evapotranspiración potencial mensual y la precipitación mensual:

$$D = P - PET \quad (6-9)$$

Donde:

- P [mm]: Precipitación mensual.
- PET [mm]: Evapotranspiración Potencial mensual.
- D [mm]: Déficit mensual dado por la diferencia.

ANEXO B: RESULTADOS

B.1. GCM

En la Figura Apx. B-1 se presenta la curva de variación estacional de la precipitación diaria para todos los GCMs y datos observados de la Estación Mataveri en el periodo 1970-2014.

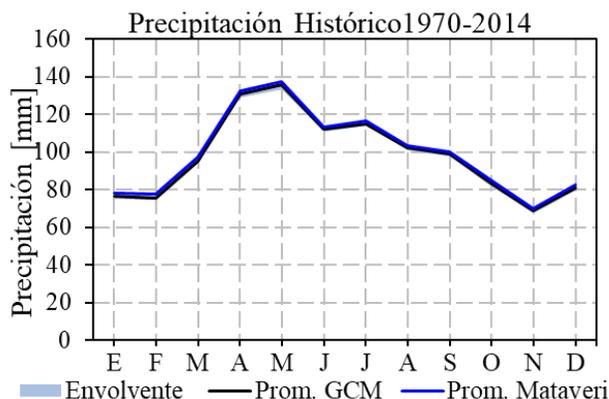


Figura Apx. B-1: Curva de variación estacional de la precipitación diaria en el periodo histórico 1970-2014.

En la Tabla Apx. B-1 se presentan los errores de los valores de precipitación mensual promedio en base a los datos de la estación Mataveri, donde en rojo se destacan los valores mayores al 20% y en verde se destacan los GCM que presenten 2 o menos meses con un error del 20%.

Tabla Apx. B-1: Diferencia porcentual de promedios mensuales de precipitación de GCMs respecto a los datos mensuales de la estación Mataveri dentro del periodo 1991-2020.

GCM (1991-2020)	Error precipitación [%]											
	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
ACCESS	26,1	16,2	18,1	3,8	35,4	23,7	7,4	5,3	1,2	19,1	19,5	9,9
CanESM5	26,9	6,4	14,8	11,8	19,8	1,2	9,0	1,0	14,0	14,4	28,5	19,4
CMCC-ESM2	2,7	28,2	2,0	13,0	7,8	12,2	6,7	7,1	7,7	9,1	26,0	36,0
EC-Earth3-CC	24,2	12,2	8,1	15,0	21,5	8,2	3,5	3,5	23,2	8,3	15,5	23,2
EC-Earth3-Veg-LR	20,1	28,8	3,0	5,8	20,7	0,1	1,0	6,9	17,6	11,7	16,8	22,6
GFDL-ESM4	13,0	12,7	2,4	11,7	32,6	15,7	7,1	15,9	1,2	13,1	7,0	7,3
INM-CM4-8	16,6	20,7	16,0	0,4	22,6	5,6	8,1	7,0	12,7	11,7	27,1	31,9
INM-CM5-0	6,3	35,6	16,8	6,3	20,1	14,5	20,7	10,0	6,4	7,2	10,1	12,8
MIROC6	10,0	7,2	18,6	3,0	8,9	10,2	8,7	3,6	8,1	8,7	20,7	35,4
MPI-ESM1-2-LR	6,8	32,4	3,7	15,9	21,0	28,7	7,3	10,5	1,6	5,5	27,1	8,3
MRI-ESM2-0	20,1	47,9	12,3	17,1	18,7	5,3	8,2	12,2	4,1	13,9	12,1	11,8
NESM3	17,9	9,1	16,3	27,3	22,2	2,7	11,7	14,4	7,4	4,6	5,8	21,4
NorESM2-MM	7,1	9,8	28,0	16,9	32,4	6,6	8,6	2,6	1,1	24,2	3,3	6,7

En la Tabla Apx. B-2 se presentan los promedios mensuales de la curva de variación estacional para la precipitación de GCMs, GCMs seleccionados y datos de la estación Mataveri en el periodo 1991-2020

Tabla Apx. B-2: Promedios mensuales de la CVE para la precipitación de GCMs, GCMs seleccionados y datos de la estación Mataveri en el periodo 1991-2020.

1991-2020	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
Mataveri	81,3	67,0	86,7	123,0	116,9	109,2	113,1	97,1	97,4	90,9	75,2	69,6
Promedio GCMs	70,6	78,5	93,9	132,0	140,6	115,4	115,2	101,5	100,6	84,4	67,3	79,0
Promedio Selec.	65,1	76,2	93,9	139,7	144,7	117,3	110,1	106,5	91,1	86,3	63,3	73,0

En la Tabla Apx. B-3 se presenta el promedio anual, desviación estándar anual y errores asociados a Estación Mataveri y los GCM en el periodo 1981-2010 y 1991-2020.

Tabla Apx. B-3: Promedio, desviación y error asociado de precipitación anual de GCMs respecto a los datos de la estación Mataveri en el periodo 1981-2010 y 1991-2020.

		Matav.	ACC	Can	CMCC	EC-C	EC-V	GFDL	INM-4	INM-5	MIROC6	MPI-ES	MRI-ES	NESM	Nor
1981-2010	Prom.[mm]	1228	1230	1122	1171	1144	1220	1222	1158	1220	1131	1197	1168	1226	1093
	Error [%]	-	0,2	8,6	4,6	6,8	0,6	0,5	5,6	0,6	7,9	2,5	4,9	0,1	11,0
	σ [mm]	264	337	349	448	364	268	263	423	381	416	342	331	223	423
	Error [%]	-	-27,6	-32,2	-69,5	-37,8	-1,4	0,6	-60,1	-44,3	-57,4	-29,5	-25,2	15,5	-60,1
1991-2020	Prom.[mm]	1127	1127	1118	1224	1195	1166	1194	1175	1249	1158	1174	1190	1231	1178
	Error [%]	-	0,0	0,8	-8,6	-6,1	-3,5	-5,9	-4,3	-10,8	-2,8	-4,2	-5,6	-9,2	-4,5
	σ [mm]	295	304	346	529	357	278	310	413	366	411	382	309	245	421
	Error [%]	-	-2,8	-17,3	-79,1	-20,9	5,8	-5,0	-39,8	-24,1	-39,1	-29,3	-4,6	17,1	-42,4

En la Figura Apx. B-2 se presentan las curvas de duración de la temperatura mínima y máxima para todos los GCMs en el futuro cercano (2031-2060) y lejano (2071-2100).

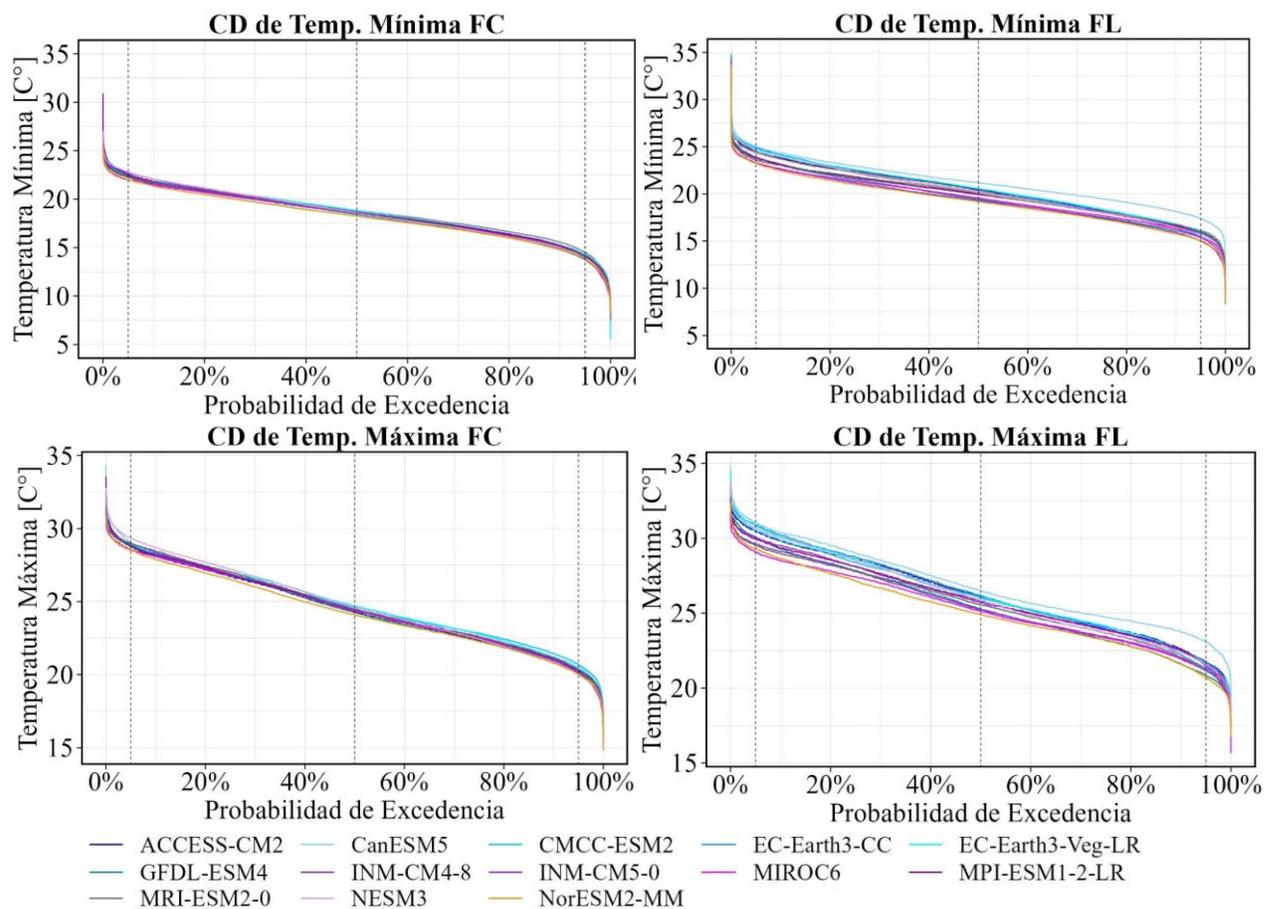


Figura Apx. B-2: Curva de duración de temperatura mínima (fila superior) y temperatura máxima diaria (fila inferior) para todos los GCMs el futuro cercano y lejano.

En la Tabla Apx. B-4 se presenta el promedio, desviación estándar y mediana de forzantes anuales de GCM y estación Mataveri en los tres periodos de análisis.

Tabla Apx. B-4: Promedio, desviación y mediana de valores anuales de precipitación, temperatura máxima y mínima de Mataveri y GCMs en el periodo histórico, futuro cercano y lejano.

Obs. +GCM	Matav.	ACC	Can	CMCC	EC-C	EC-V	GFDL	INM-4	INM-5	MIROC6	MPI-ES	MRI-ES	NESM	Nor		
1991-2020	Prec.[mm]	Prom.	1127	1127	1118	1224	1195	1166	1194	1175	1249	1158	1174	1190	1231	1178
		Desv.	295	304	346	529	357	278	310	413	366	411	382	309	245	421
		Med.	1044	1135	1073	1210	1169	1122	1193	1054	1153	1104	1154	1312	1230	1158
	Tmax[°C]	Prom.	24,0	24,0	23,9	24,0	24,0	24,0	24,0	24,0	24,1	24,0	23,9	24,1	24,0	24,0
		Desv.	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,4	0,3	0,4	0,4	0,6	0,5	0,4	0,3	0,3
		Med.	23,9	24,1	24,0	24,1	23,9	24,1	24,0	23,9	24,0	24,1	23,9	24,1	23,9	24,0
	Tmin[°C]	Prom.	17,8	18	17,8	18	18	18	17,9	18	17,9	17,9	18	17,9	17,9	17,9
		Desv.	0,3	0,4	0,5	0,5	0,4	0,4	0,3	0,4	0,4	0,6	0,4	0,5	0,4	0,4
		Med.	17,9	18,2	17,8	17,9	17,9	17,9	18	17,8	18	18	17,9	18	17,9	17,8
2031-2060	Prec.[mm]	Prom.	-	945	901	956	1220	1152	1254	1178	1247	1019	1125	1156	839	1031
		Desv.	-	250	390	402	350	360	377	343	326	367	267	306	264	466
		Med.	-	923	805	939	1238	1078	1171	1253	1179	948	1101	1141	772	890
	Tmax[°C]	Prom.	-	24,5	24,6	24,7	24,5	24,8	24,5	24,6	24,5	24,5	24,6	24,7	24,7	24,3
		Desv.	-	0,5	0,7	0,5	0,4	0,3	0,4	0,4	0,5	0,6	0,6	0,3	0,4	0,4
		Med.	-	24,5	24,6	24,7	24,6	24,8	24,5	24,6	24,5	24,6	24,6	24,7	24,8	24,3
	Tmin[°C]	Prom.	-	18,4	18,4	18,7	18,4	18,7	18,4	18,6	18,4	18,4	18,6	18,5	18,5	18,1
		Desv.	-	0,5	0,8	0,6	0,4	0,4	0,3	0,4	0,5	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5
		Med.	-	18,5	18,3	18,7	18,5	18,6	18,4	18,4	18,3	18,4	18,5	18,6	18,6	18,1
2071-2100	Prec.[mm]	Prom.	-	776	513	796	1072	1240	1217	711	1070	741	660	765	854	745
		Desv.	-	261	166	332	381	623	399	200	302	260	195	242	200	333
		Med.	-	757	481	782	1116	1049	1237	655	1124	695	640	855	816	698
	Tmax[°C]	Prom.	-	20,3	21,2	20,2	20,4	20,5	19,5	19,3	19,8	19,5	19,9	19,9	20,2	19,1
		Desv.	-	0,6	0,8	0,5	0,6	0,6	0,5	0,5	0,4	0,6	0,5	0,5	0,5	0,4
		Med.	-	20,5	21,2	20,3	20,3	20,3	19,6	19,3	19,8	19,7	19,7	20,0	20,2	19,1
	Tmin[°C]	Prom.	-	26,2	26,8	26,2	26,2	26,2	25,4	25,5	25,9	25,3	25,9	25,6	26,0	25,1
		Desv.	-	0,5	0,6	0,4	0,5	0,6	0,5	0,4	0,3	0,5	0,5	0,4	0,4	0,3
		Med.	-	26,4	26,8	26,2	26,2	26,1	25,4	25,4	25,9	25,4	25,8	25,7	26,1	25,1

En las Figura Apx. B-3, Figura Apx. B-4 y Figura Apx. B-5, se presentan las curvas de variación estacional con diagrama de caja para la precipitación, evapotranspiración con el método de Thornthwaite y Hargreaves para los tres periodos de análisis.

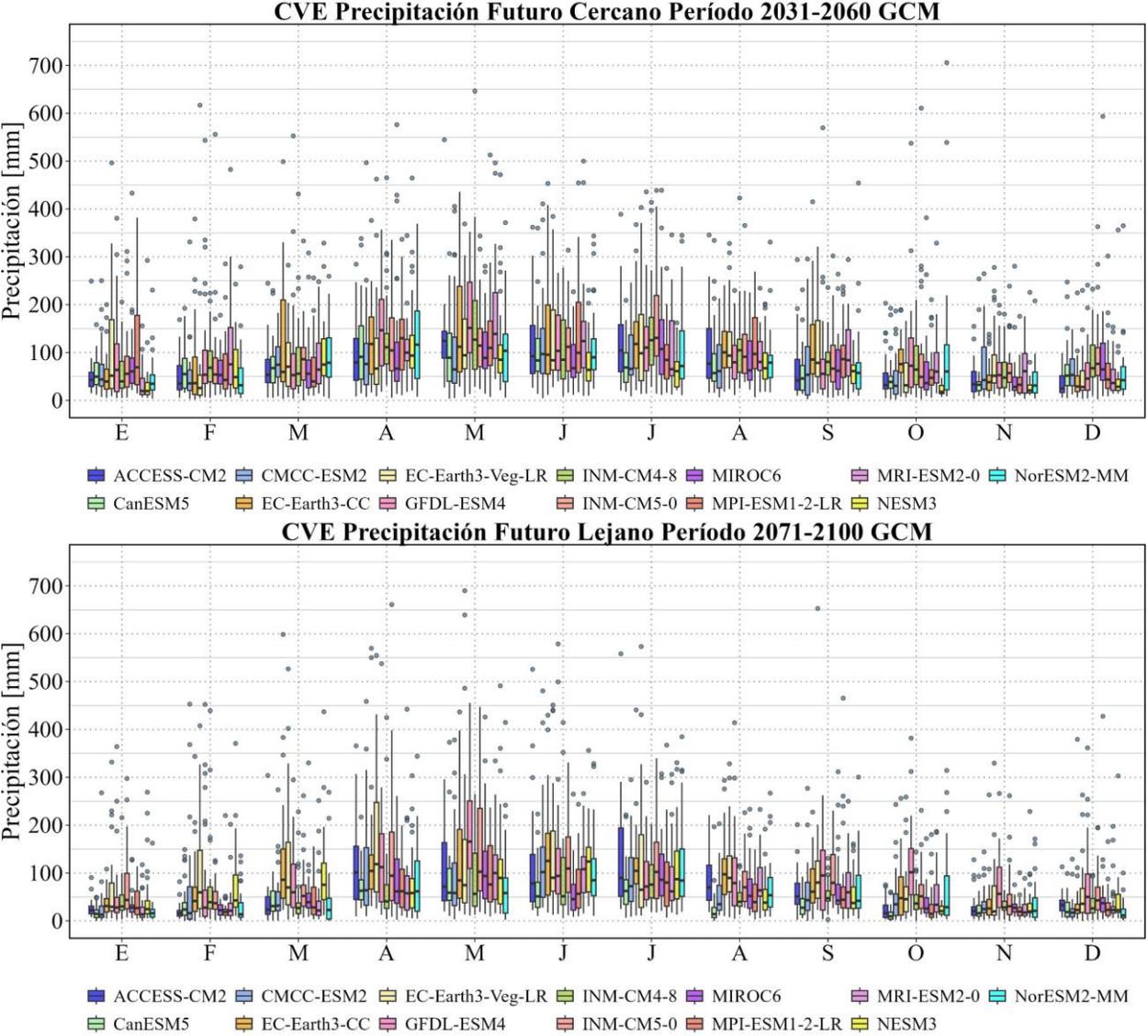


Figura Apx. B-3: CVE con diagrama de caja para la precipitación mensual para el futuro cercano y lejano de todos los GCMs.

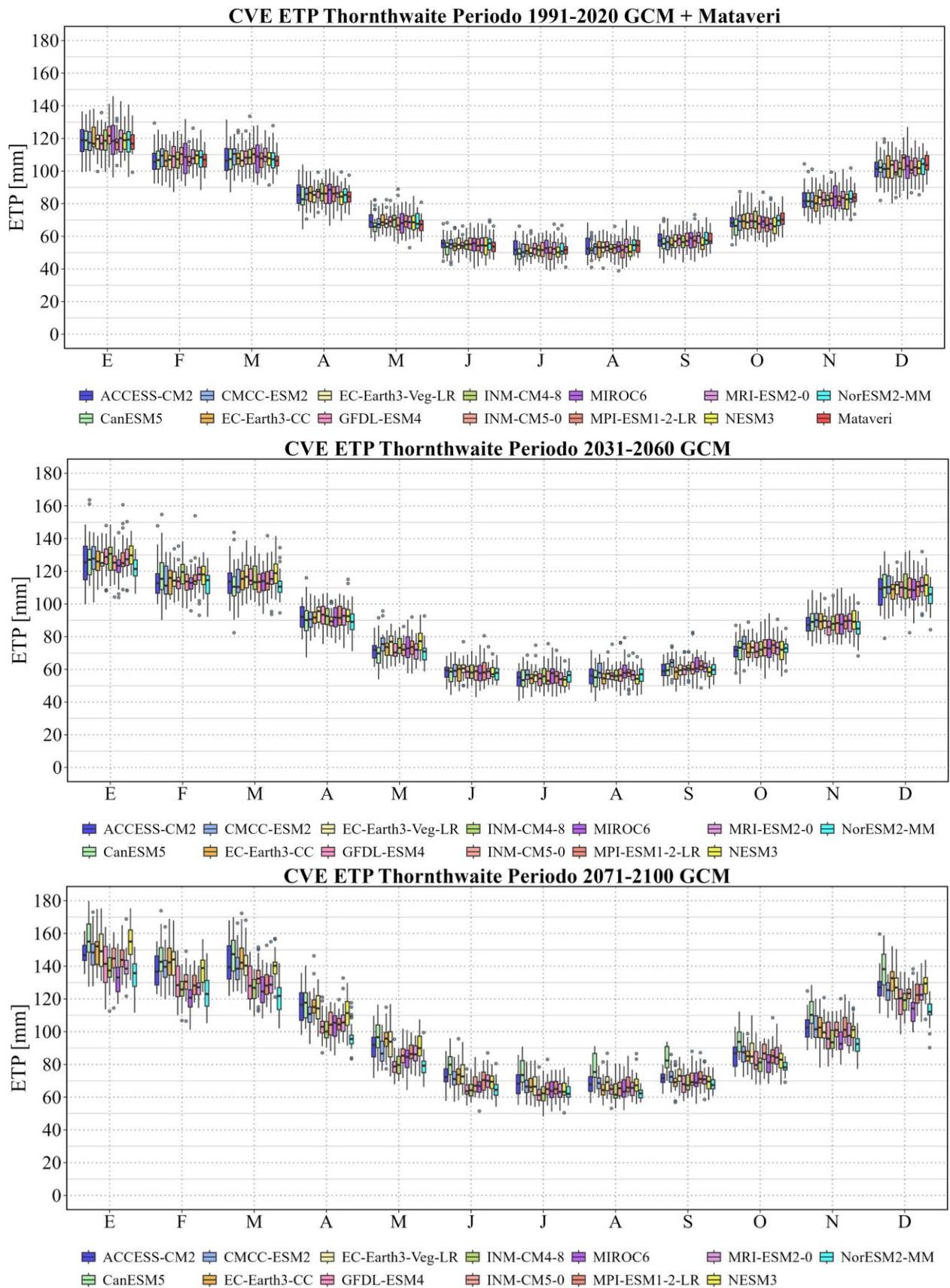


Figura Apx. B-4: CVE con diagrama de caja para la evapotranspiración mensual con método de Thornthwaite para el periodo histórico, futuro cercano y lejano de todos los GCMs.

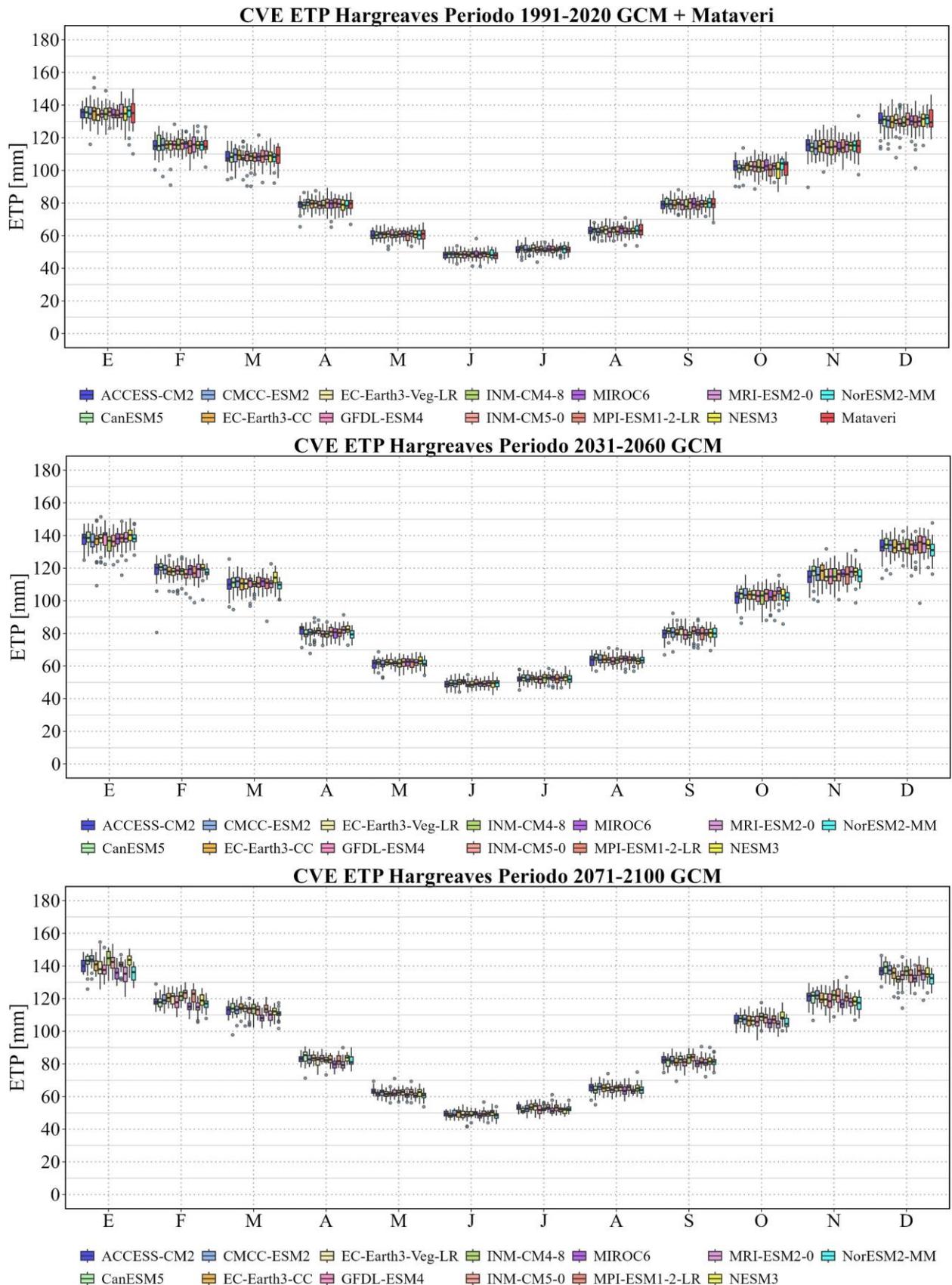


Figura Apx. B-5: CVE con diagrama de caja para la evapotranspiración potencial mensual con método de Hargreaves para el periodo histórico, futuro cercano y lejano de todos los GCMs.

B.2. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL

La precipitación anual y mensual en el periodo 2001-2020 de IMERG en función de Mataveri (Figura Apx. B-6) presentan un coeficiente de determinación de 0,86 y 0,77, respectivamente. En el caso de IMERG, a nivel anual existe un sesgo de 380 mm de excedente y un sesgo de -12 mm a nivel mensual.

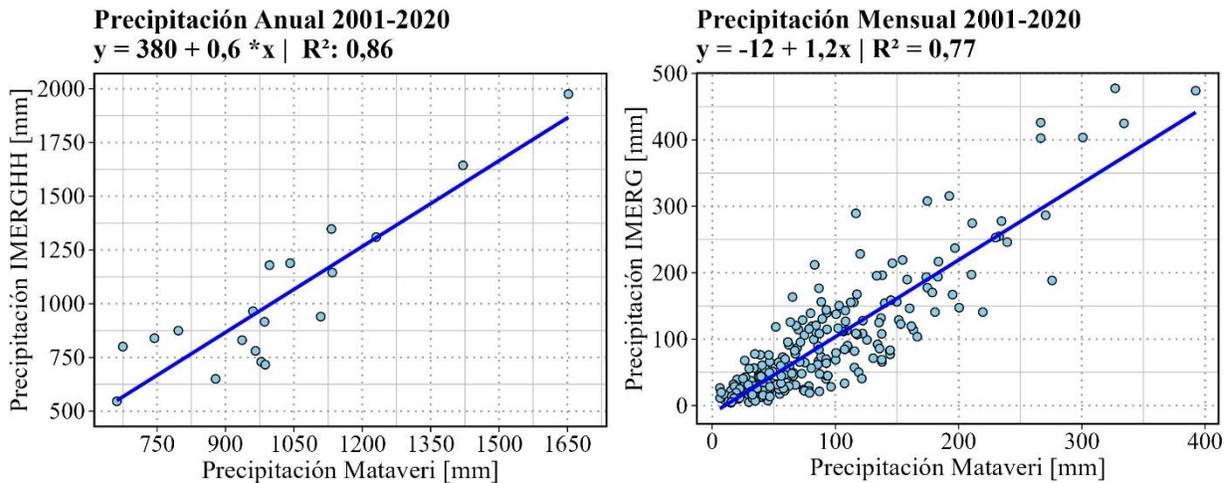


Figura Apx. B-6: Precipitación anual y mensual de IMERG en función de los datos observados.

En la Figura Apx. B-7 se presentan las curvas hipsométricas de cada zona, donde se observa que la zona 1 presenta mayor porcentaje de área sobre cotas más elevadas, y por otra parte, la zona 3 se asocia a porcentajes con cotas menores. El 90% de la isla, para la Z1 se encuentra sobre los 130 m s.n.m., Z2 100 m s.n.m y la Z3 sobre los 150 m s.n.m. El 50% de la isla, para la Z1 se encuentra sobre los 350 m s.n.m , Z2 230 m s.n.m y la Z3 310 m s.n.m.

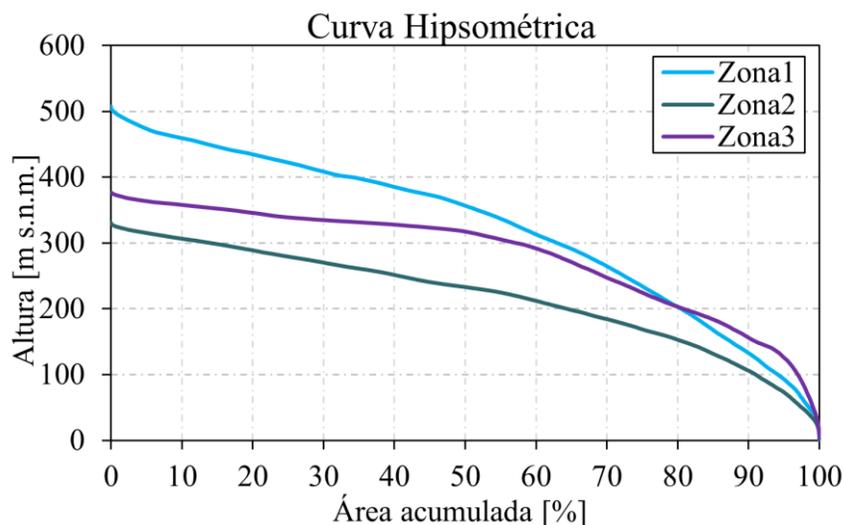


Figura Apx. B-7: Curva hipsométrica de cada zona homogénea en la Isla.

En la Figura Apx. B-8 se exhiben los gráficos de correlación de precipitación mensual con IMERG en función de los datos observados de Mataveri dentro del periodo 2001-2020. En la Figura Apx. B-9 se muestra lo mismo pero de la Zona 1 de IMERG en función de los datos observados

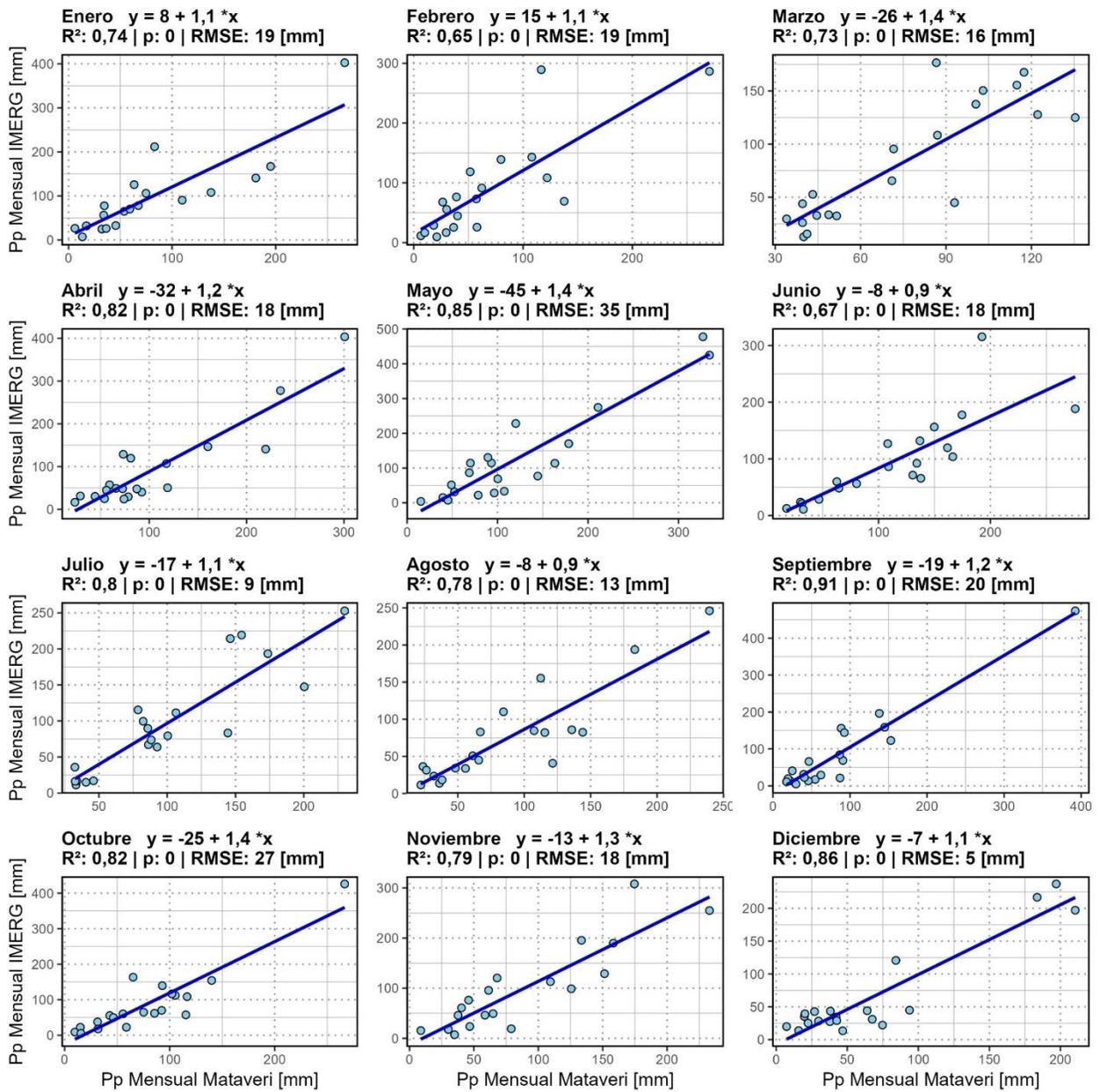


Figura Apx. B-8: Correlación de la precipitación para cada mes de IMERG en función de Mataverí.

En la Figura Apx. B-9 se exhiben los gráficos de correlación de precipitación mensual de la Zona 1 de IMERG en función de los datos observados de Mataveri dentro del periodo 2001-2020.

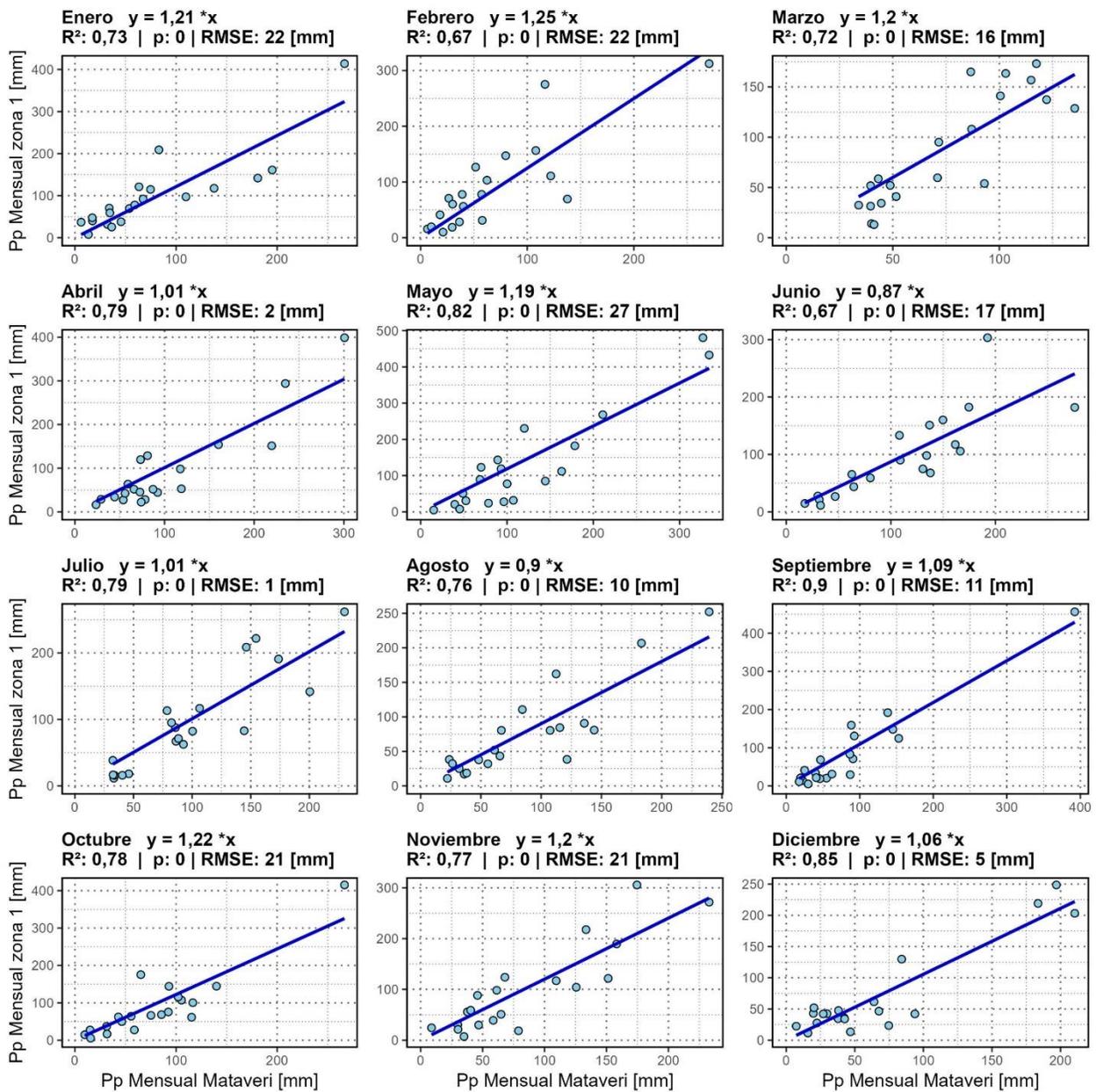


Figura Apx. B-9: Correlación de la precipitación en cada mes de la Zona 1 de IMERG en función de Mataveri.

En la Tabla Apx. B-5 se presentan las pendientes y coeficientes de determinación de cada zona homogénea y cada mes en función de los datos observados.

Tabla Apx. B-5: Pendientes y coeficientes de determinación de cada zona homogénea y cada mes en función de los datos observados.

Mes	Zona 1		Zona 2		Zona 3	
	m	R ²	m	R ²	m	R ²
Enero	1,21	0,73	1,29	0,68	1,38	0,54
Febrero	1,25	0,67	1,41	0,67	1,54	0,60
Marzo	1,20	0,72	1,31	0,72	1,41	0,68
Abril	1,01	0,79	1,06	0,82	1,15	0,83
Mayo	1,19	0,82	1,22	0,82	1,25	0,81
Junio	0,87	0,67	0,92	0,67	0,96	0,63
Julio	1,01	0,79	1,02	0,78	1,02	0,77
Agosto	0,90	0,76	0,93	0,76	0,98	0,76
Septiembre	1,09	0,90	1,08	0,90	1,05	0,88
Octubre	1,22	0,78	1,25	0,77	1,28	0,78
Noviembre	1,2	0,77	1,27	0,75	1,33	0,70
Diciembre	1,06	0,85	1,16	0,82	1,27	0,75

La distribución espacial de la temperatura máxima y mínima mensual normalizada por el pixel donde se encuentra ubicada la estación Mataveri queda representado en la Figura Apx. B-10. Del mapa de temperatura mínima normalizada se observa que las zonas de mayor altura, y en específico la norte (volcán Terevaka) indica temperaturas menores al pixel de referencia. Por el contrario, la orilla de la zona oeste de la isla presenta alrededor de 1 °C más que el pixel de referencia.

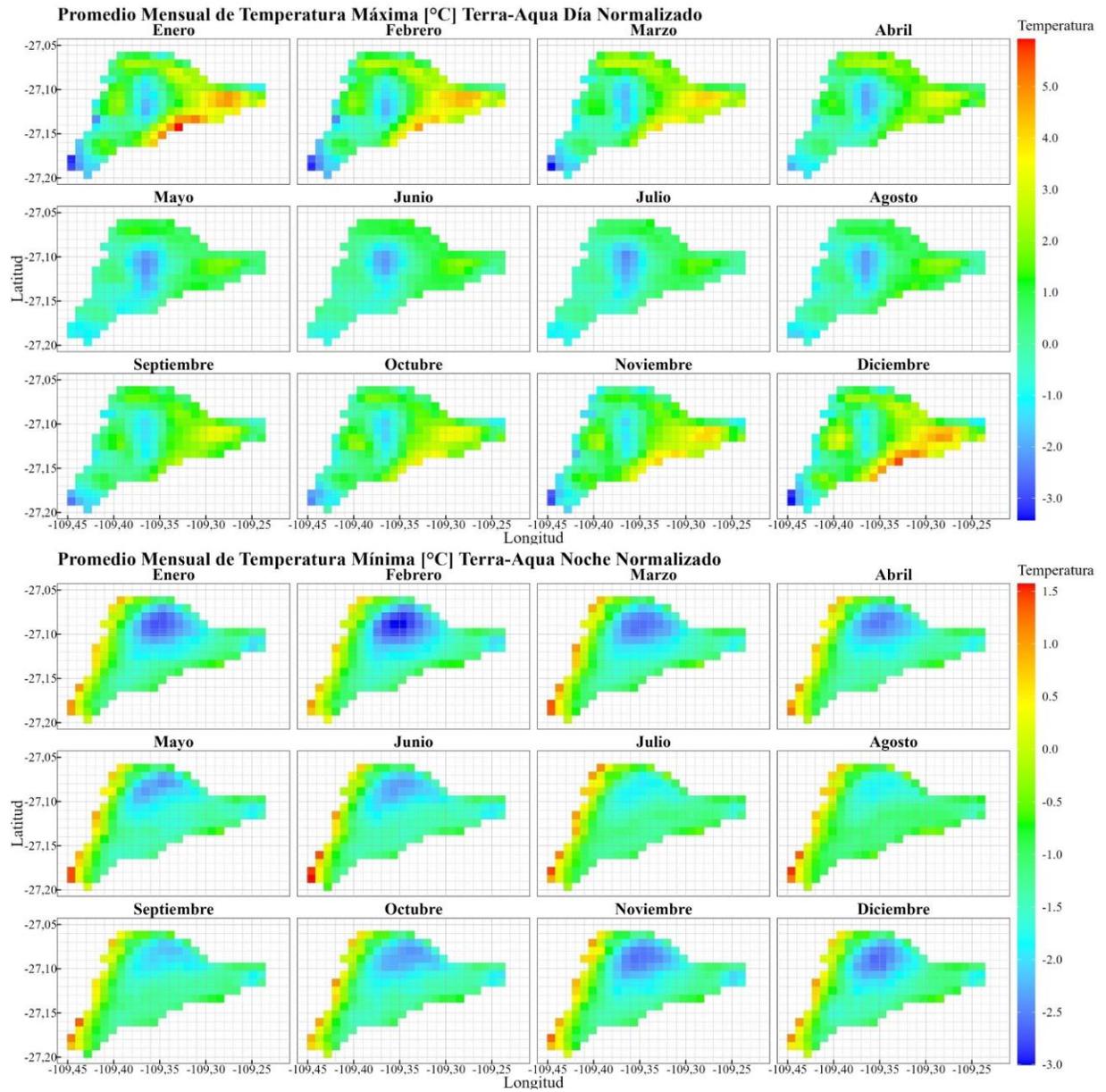


Figura Apx. B-10: Mapas de temperatura mínima y máxima normalizado con el píxel de la Estación Mataveri, a partir de información de Terra y Aqua.

B.3. ÍNDICES

En la Figura Apx. B-12 se muestran los índices de sequía de los GCM seleccionados (1991-2100).

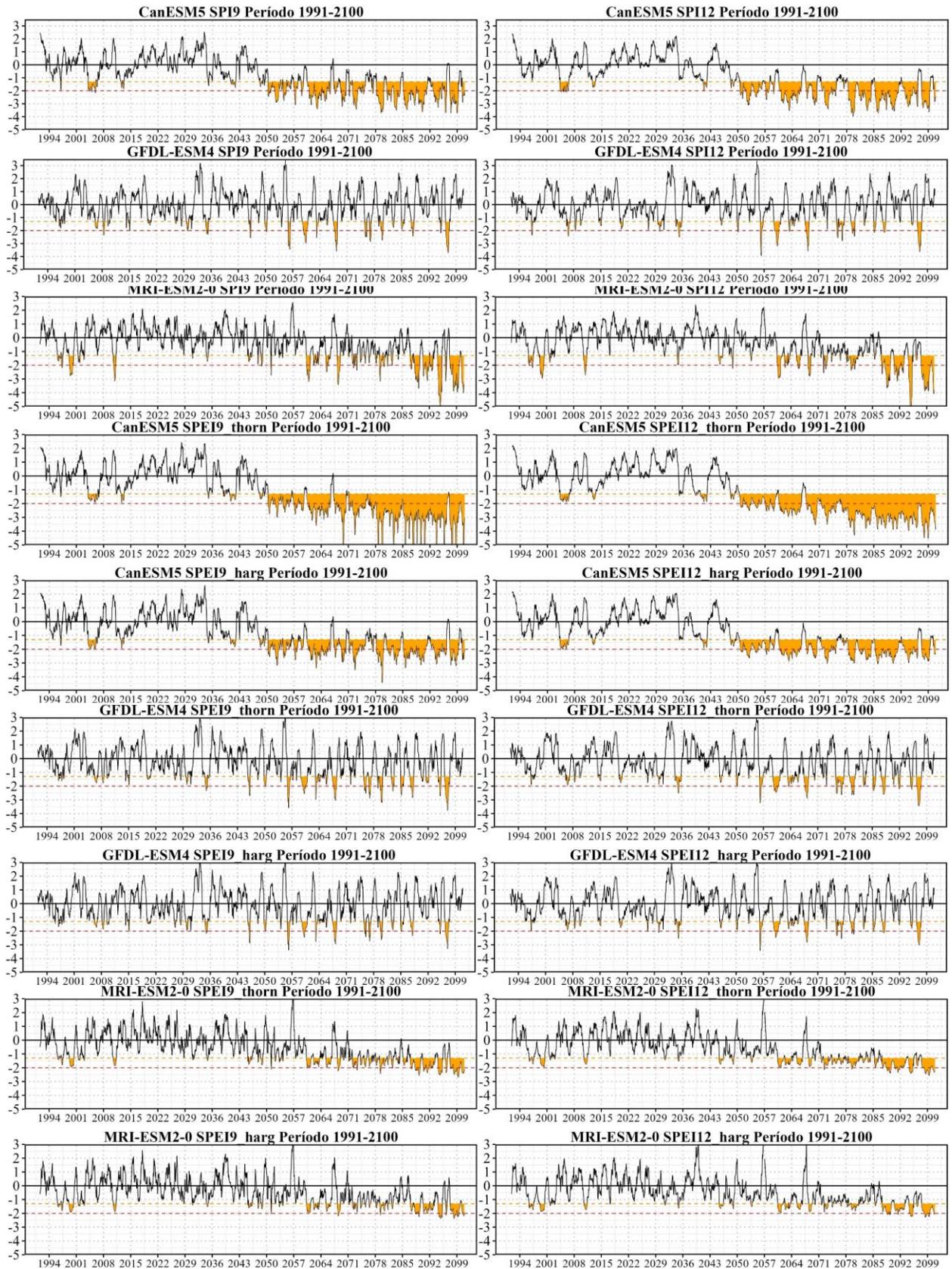


Figura Apx. B-12: Índices SPI y SPEI con escala de 9 (columna izquierda) y 12 (columna derecha) en el periodo 1991-2100 para los modelos seleccionados CanESM5, GFDL-ESM4 y MRI-ESM2-0.

En la Figura Apx. B-13 y Figura Apx. B-14 se presentan figuras con las frecuencias porcentuales según clasificación de los índices SPI12, SPEI12 con Hargreaves y SPEI12 con Thornthwaite para el futuro cercano (FC) y lejano (FL), respectivamente. En el futuro cercano y lejano, en la mayoría de los GCM se observa un aumento en los eventos de sequía. En especial, se observa un incremento notorio en los eventos excepcionalmente secos que incrementan su frecuencia más aún en el futuro lejano, especialmente con el método de Thornthwaite.

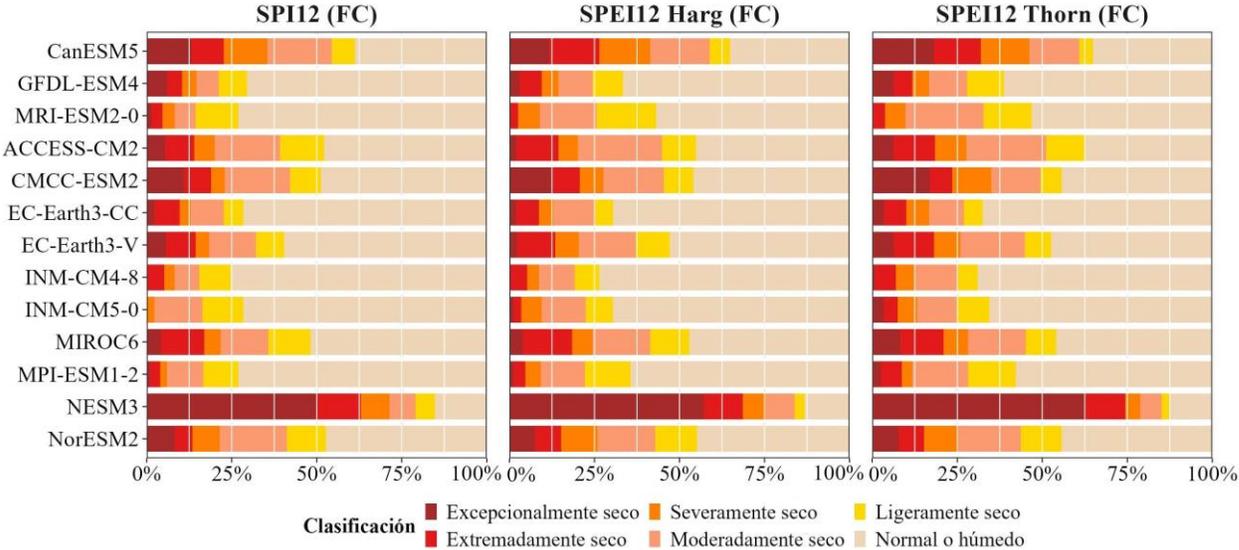


Figura Apx. B-13: Frecuencia de sequías según índices SPI-12, SPEI-12 Harg. y SPEI-12 Thorn. en el futuro cercano (2031-2060).

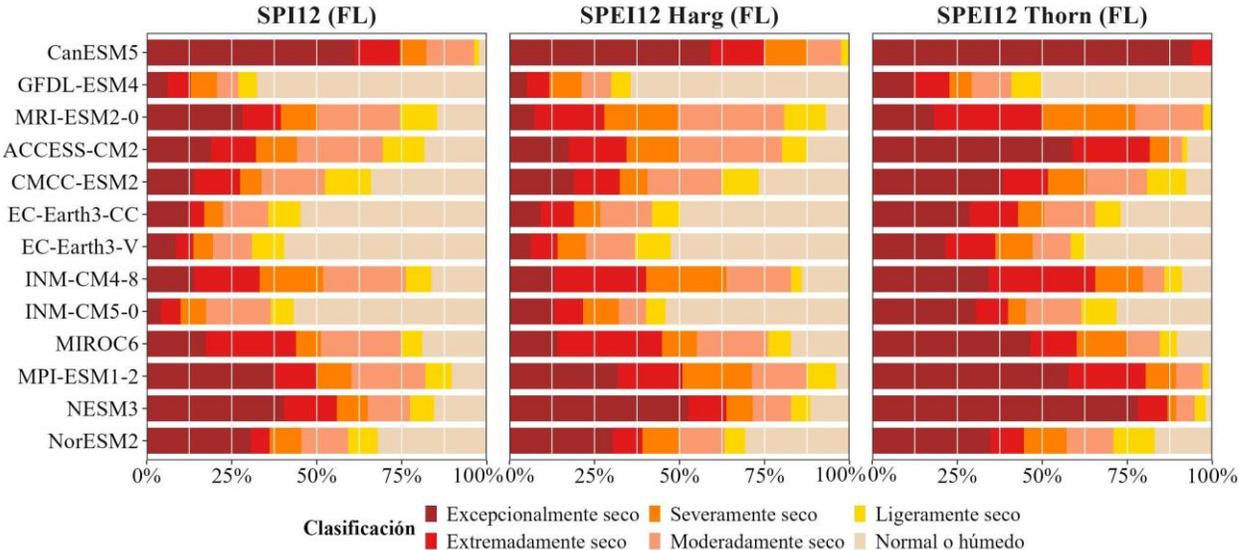


Figura Apx. B-14: Frecuencia de sequías según índices SPI-12, SPEI-12 Harg. y SPEI-12 Thorn. futuro lejano (2071-2100).

En la Tabla Apx. B-6 se presentan las frecuencias porcentuales de eventos de sequías para índices SPI, SPEI con Thornthwaite y Hargreaves con escala de 9 y 12 meses, promedio de los GCM seleccionados y para las zonas homogéneas.

Tabla Apx. B-6: Frecuencias porcentuales de eventos de sequías para índices SPI, SPEI con Thornthwaite y Hargreaves con escala de 9 y 12 meses promedio de los GCM seleccionados y para las zonas homogéneas.

Índice [%]	Zona 1			Zona 2			Zona3		
	Hist.	FC	FL	Hist.	FC	FL	Hist.	FC	FL
dSPI12	11,0	19,5	51,6	10,8	19,7	51,1	10,7	19,9	51,4
SPEI12-T	11,1	24,2	67,5	11	24,3	67,4	11,1	24,5	68,4
SPEI12-H	10,7	21,3	54,3	10,6	21,5	55	10,6	21,6	55,6
SPI9	11,4	19,2	48,7	11,2	19	48,8	11,4	18,6	48,8
SPEI9-T	11,6	24	64,6	11,6	23,5	64,4	11,6	23,8	65,1
SPEI9-H	11,2	21,2	50,7	11,2	21,2	51,3	11,2	21,5	51,7

Nota: SPEIi-T se refiere al índice de escala i con método de Thornthwaite, SPEIi-H se refiere al índice de escala i con método de Hargreaves.

En las Tabla Apx. B-7, Tabla Apx. B-8 y Tabla Apx. B-9 se muestran los valores de N° de sequías, duración, severidad e intensidad de los índices SPI9, SPEI9 Y 12 con método de Thornthwaite y Hargreaves en los tres periodos de análisis para los GCM seleccionados.

Tabla Apx. B-7: N° de sequías, duración, severidad e intensidad de SPI9 para los GCM seleccionados.

GCM SPI9	Periodo	N° sequías	Duración [mes]			Severidad [-]		Intensidad [1/mes]	
			Total	Prom	Max	Prom	Max	Prom	Max
CanESM5	Hist.	6	37	6	24	2,4	10,7	0,3	0,6
CanESM5	FC	16	115	7	38	3,8	27,5	0,3	0,9
CanESM5	FL	14	282	20	76	21,3	87,4	0,7	1,5
GFDL-ESM4	Hist.	17	37	2	9	0,7	3,4	0,2	0,7
GFDL-ESM4	FC	9	45	5	17	3,9	12,9	0,6	1,6
GFDL-ESM4	FL	12	59	5	11	3,7	16,2	0,5	1,5
MRI-ESM2-0	Hist.	7	43	6	14	4,1	13,3	0,5	1,1
MRI-ESM2-0	FC	11	34	3	8	1,6	8,7	0,4	1,1
MRI-ESM2-0	FL	25	167	7	32	6,9	45,5	0,6	2,4

Tabla Apx. B-8: N° de sequías, duración, severidad e intensidad de SPEI12 y SPEI9 con el método de Thornthwaite para los GCM seleccionados.

GCM SPEI12-T	Periodo	N° sequías	Duración [mes]			Severidad [-]		Intens. [1/mes]	
			Total	Prom	Max	Prom	Max	Prom	Max
CanESM5	Hist.	3	39	13	27	4,1	9,9	0,2	0,4
CanESM5	FC	11	161	15	114	8,1	77,4	0,2	0,7
CanESM5	FL	1	348	348	348	543,2	543,2	1,6	1,6
GFDL-ESM4	Hist.	3	37	12	27	4,3	11,0	0,2	0,4
GFDL-ESM4	FC	11	144	13	93	6,3	55,4	0,2	0,6

GFDL-ESM4	FL	10	305	31	82	26,2	77,8	0,7	1,1
MRI-ESM2-0	Hist.	12	36	3	8	0,8	2,9	0,2	0,4
MRI-ESM2-0	FC	7	58	8	18	4,8	14,3	0,4	0,8
MRI-ESM2-0	FL	11	102	9	25	6,4	18,7	0,6	1,2
GCM SPEI9-T	Periodo	N° sequías	Duración [mes]			Severidad [-]		Intens. [1/mes]	
			Total	Prom	Max	Prom	Max	Prom	Max
CanESM5	Hist.	6	43	7	24	2,0	7,5	0,2	0,3
CanESM5	FC	9	152	17	72	9,5	46,5	0,3	0,7
CanESM5	FL	3	349	116	250	195,6	428,5	1,6	2,2
GFDL-ESM4	Hist.	6	36	6	24	2,1	9,8	0,3	0,4
GFDL-ESM4	FC	15	134	9	38	4,5	27,6	0,3	0,7
GFDL-ESM4	FL	13	287	22	76	20,2	75,0	0,7	1,3
MRI-ESM2-0	Hist.	16	40	3	9	0,5	2,4	0,2	0,5
MRI-ESM2-0	FC	10	62	6	21	3,6	12,5	0,4	0,9
MRI-ESM2-0	FL	14	103	7	16	5,2	17,9	0,5	1,1

Tabla Apx. B-9: N° de sequías, duración, severidad e intensidad de SPEI12 y SPEI9 con el método de Hargreaves para los GCM seleccionados.

GCM SPEI12-H	Periodo	N° sequías	Duración [mes]			Severidad [-]		Intens. [1/mes]	
			Total	Prom	Max	Prom	Max	Prom	Max
CanESM5	Hist.	3	37	12	27	4,3	11,0	0,2	0,4
CanESM5	FC	11	144	13	93	6,3	55,4	0,2	0,6
CanESM5	FL	10	305	31	82	26,2	77,8	0,7	1,1
GFDL-ESM4	Hist.	12	36	3	8	0,8	2,9	0,2	0,4
GFDL-ESM4	FC	7	58	8	18	4,8	14,3	0,4	0,8
GFDL-ESM4	FL	11	102	9	25	6,4	18,7	0,6	1,2
MRI-ESM2-0	Hist.	10	35	4	8	0,9	2,5	0,2	0,4
MRI-ESM2-0	FC	8	50	6	18	3,4	11,2	0,4	0,8
MRI-ESM2-0	FL	11	74	7	16	3,4	12,6	0,4	1,0
GCM SPEI9-H	Periodo	N° sequías	Duración [mes]			Severidad [-]		Intens. [1/mes]	
			Total	Prom	Max	Prom	Max	Prom	Max
CanESM5	Hist.	6	36	6	24	2,1	9,8	0,3	0,4
CanESM5	FC	15	134	9	38	4,5	27,6	0,3	0,7
CanESM5	FL	13	287	22	76	20,2	75,0	0,7	1,3
GFDL-ESM4	Hist.	16	40	3	9	0,5	2,4	0,2	0,5
GFDL-ESM4	FC	10	62	6	21	3,6	12,5	0,4	0,9
GFDL-ESM4	FL	14	103	7	16	5,2	17,9	0,5	1,1
MRI-ESM2-0	Hist.	13	40	3	9	0,6	2,1	0,2	0,6
MRI-ESM2-0	FC	9	49	5	16	3,2	8,9	0,5	1,1
MRI-ESM2-0	FL	12	62	5	11	3,2	11,1	0,5	1,0

La variación respecto al periodo histórico de N° de eventos, duración, intensidad y severidad de GCM bajo un umbral de -1,3 para los diferentes índices SPI9, SPEI9 con Thornthwaite y Hargreaves. Se presenta en la Figura Apx. B-15, Figura Apx. B-16 y Figura Apx. B-17.

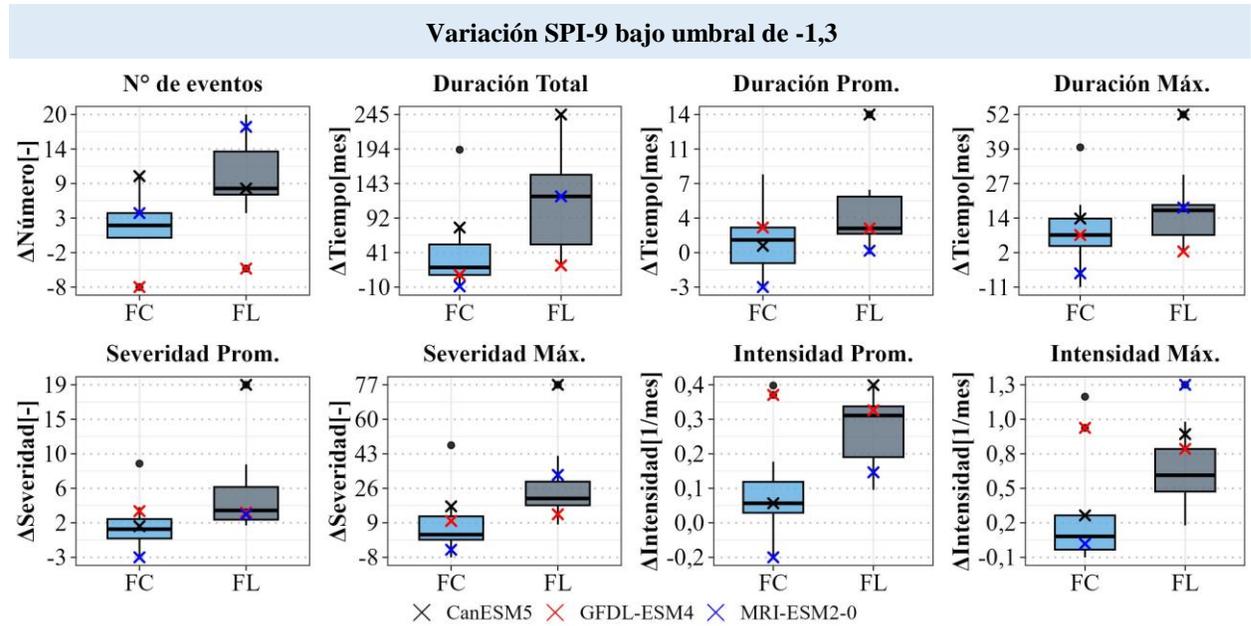


Figura Apx. B-15: Variación respecto al periodo histórico de N° de eventos, duración, intensidad y severidad de GCM con SPEI-9, bajo un umbral de -1,3.

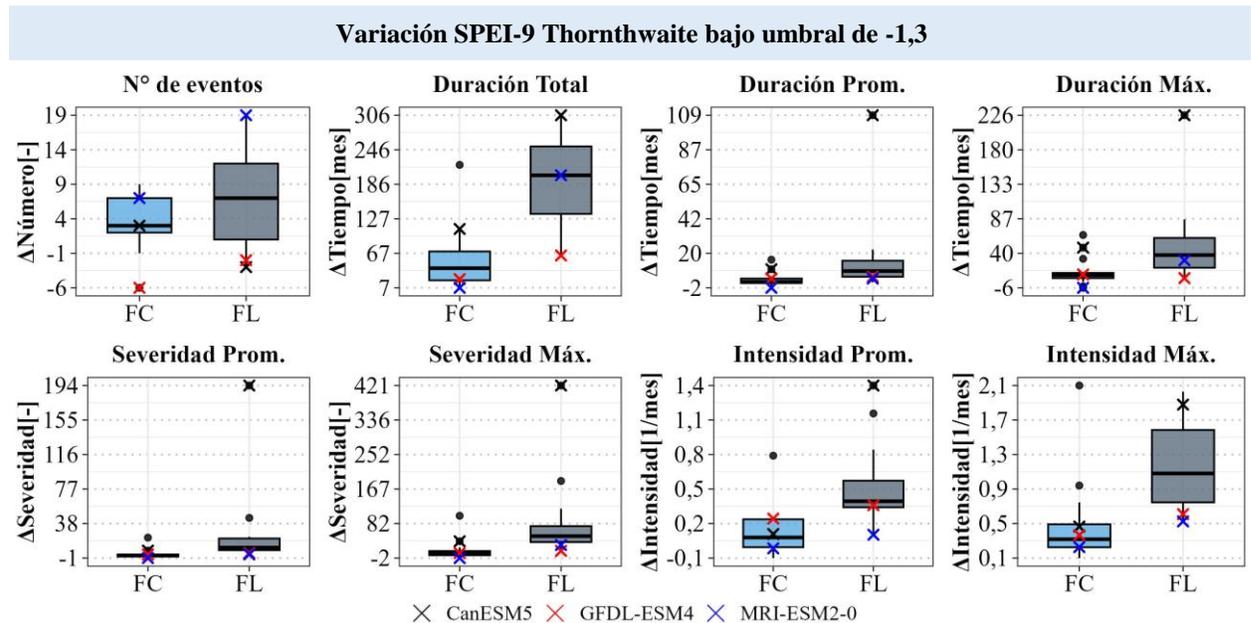


Figura Apx. B-16: Variación respecto al periodo histórico de N° de eventos, duración, intensidad y severidad de GCM con SPEI-9 con Thornthwaite, bajo un umbral de -1,3.

Variación SPEI-9 Hargreaves bajo umbral de -1,3

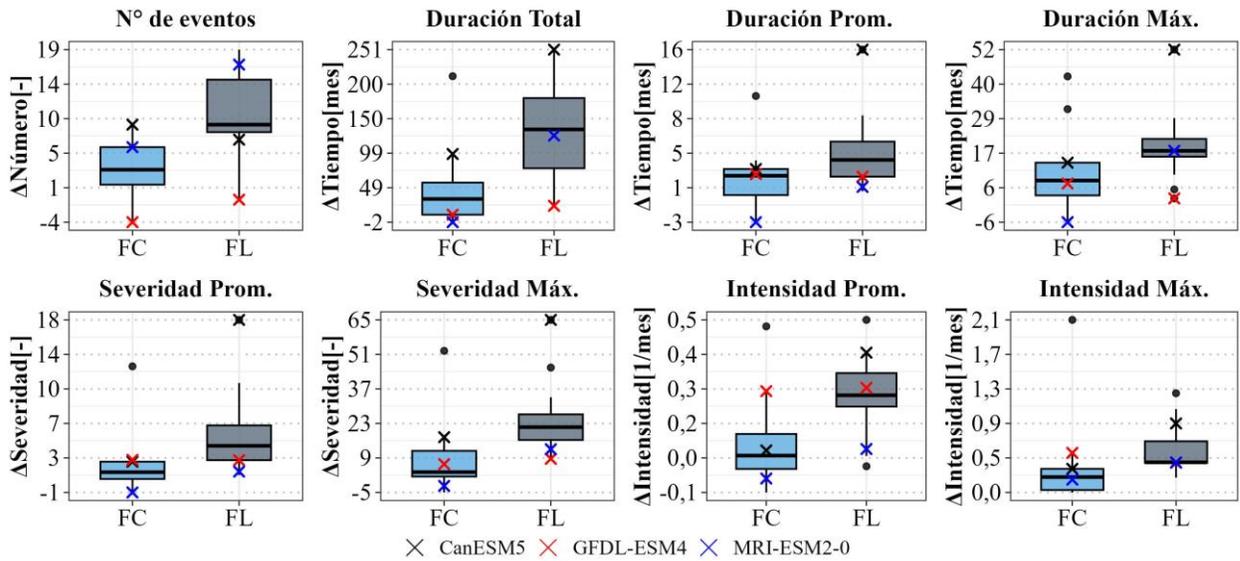


Figura Apx. B-17: Variación respecto al periodo histórico de N° de eventos, duración, intensidad y severidad de GCM con SPEI-9 con Hargreaves, bajo un umbral de -1,3.

En la *Figura Apx. B-18* se presentan los promedios mensuales de los GCM escalados espacialmente sin corrección de sesgo, normalizados por el promedio anual del periodo 1970-2014, junto a la curva normalizada de los datos observados. Los modelos que se presentan son los que cumplen con el criterio de promedios y desviaciones anuales después de la corrección de sesgo analizados en sección de resultados en el periodo 1991-2020.

Se observa que el modelo CanESM5, que presenta una mayor desviación porcentual respecto a los datos observados en el análisis luego de la corrección de sesgo (periodo 1991-2020), presenta valores de precipitación normalizada más alejados de la curva de datos observados en los meses de mayo, junio, julio y agosto. De esta manera, eliminar este modelo reduciría la diferencia en el comportamiento de la CVE entre los modelos brutos.

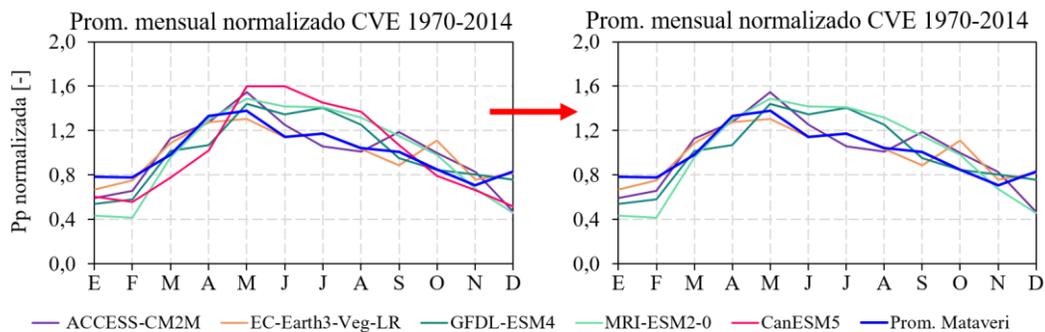


Figura Apx. B-18: Curvas de variación estacional normalizadas en el periodo 1970-2014 de los datos observados y GCMs escalados espacialmente sin corrección de sesgo: ACCES-CM2, EC-Earth3-Veg-LR, GFDL-ESM4, MRI-ESM2-0 y CanESM5.