



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**EVALUACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE EN PROYECCIÓN DE  
SEQUÍAS EN LA ISLA RAPA NUI E IMPACTO DEL MÉTODO DE  
ESTIMACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN,  
BAJO ESCENARIO RCP 8,5**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

**JAVIERA PAZ ALIAGA LÓPEZ**

PROFESORA GUÍA:  
XIMENA VARGAS MESA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
IGNACIO TORO MENA  
EDUARDO MUÑOZ CASTRO

SANTIAGO DE CHILE

2024

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA  
OPTAR AL TÍTULO DE: Ingeniera Civil  
POR: Javiera Paz Aliaga López  
FECHA: 2024  
PROFESORA GUÍA: Ximena Vargas Mesa

## **EVALUACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE EN PROYECCIÓN DE SEQUÍAS EN LA ISLA RAPA NUI E IMPACTO DEL MÉTODO DE ESTIMACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN, BAJO ESCENARIO RCP 8,5**

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), define a la sequía como un periodo de condiciones anormalmente secas durante el tiempo suficiente como para causar un desequilibrio hidrológico grave. La humedad y las aguas subterráneas almacenadas por el suelo también resultan afectadas por los aumentos en la evapotranspiración, en la temperatura y por la disminución de la precipitación.

La propuesta de Trabajo de Título presenta como objetivo abordar el desafío de la sequía en la isla Rapa Nui, ubicada en el Océano Pacífico Sur. La isla, de origen volcánico y con un acuífero como fuente principal de agua, enfrenta una alta vulnerabilidad debido a su dependencia de los recursos hídricos subterráneos. Dado que no cuenta con ríos en su superficie, la precipitación como recarga de agua subterránea es esencial, lo que la hace susceptible a la escasez de agua, especialmente en el contexto del cambio climático.

El estudio se enfocó en desarrollar una metodología para reducir la incertidumbre en las proyecciones de índices de sequía en la isla. Para lograrlo, se utilizaron modelos climáticos globales bajo el escenario RCP 8,5, seleccionando aquellos que tenían similar comportamiento de las variables meteorológicas en el período histórico. Con estos modelos, se estimó la evapotranspiración potencial utilizando tres métodos distintos, lo que permitió analizar su influencia en los índices de sequía. A partir de las proyecciones, se calcularon tres índices de sequía meteorológica: SPI, SPEI y RAI además del Índice de Aridez de Martonne.

Los resultados obtenidos indican que, al utilizar el método de corrección MBCn, los modelos de cambio climático pronostican una reducción del 24,3% en la precipitación anual, así como un aumento de 1,9°C en las temperaturas media y máxima y de 2,2°C en la mínima para el periodo 2065-2100. El método Thornthwaite para la estimación de evapotranspiración potencial proyecta los menores valores de evapotranspiración anual, con una media de 956,3 [mm] en el periodo 1970-2023 obtenida a partir de los datos observados, y es el más sensible al aumento de temperatura. En contraste, el método Oudin proyecta los valores más altos, con una media de 1258,8 [mm] en el periodo observado. Además, los índices de sequía muestran un aumento en la frecuencia e intensidad para todas las escalas (12, 24 y 48 meses), especialmente en el futuro lejano (2065-2100).

## ***AGRADECIMIENTOS***

Primero, quiero agradecer a mi familia por siempre apoyarme y creer en mí, su respaldo ha sido fundamental en cada paso de mi vida. Gracias a mis papás por fomentar en mí el deseo de aprender y el interés por la ciencia.

A mi grupo de *Babys Civiles*, la Vale, Dayana, Anto y Dayna, gracias por los momentos felices, las tardes de contar chismes, y también por los llantos compartidos en los momentos de mayor estrés. También agradezco al Manu y al Cleme por su amistad y compañía.

Gracias a mis amigas del liceo y a mis amigos de la sección 3, por todos esos años de amistad y por las juntas en la casa del Chepi. A mis compañeros de la sala de memoristas, les agradezco por los consejos académicos y las tardes de conversación sobre la vida.

Quiero expresar mi agradecimiento por la oportunidad de realizar mi última práctica profesional en la isla. Gracias, Dayna, y a los chicos de Geo, así como al Departamento de Geología y Departamento de Ingeniería Civil por su apoyo. Agradezco a la gente de CONAF que nos recibió en la isla y a la comunidad Ma'u Henua por su buena disposición.

Agradezco a Jacqueline Suárez, secretaria del área de Recursos Hídricos y Medio Ambiente, por estar siempre preocupada de que estuviéramos bien, escucharnos y brindarnos sus consejos cuando los necesitábamos.

Finalmente, doy gracias a todos los profesores que me acompañaron a lo largo de mi vida académica, en especial al profesor Víctor Manríquez, por hacer que me gustaran las matemáticas. También quiero agradecer a la profesora Ximena Vargas por su sabiduría, su confianza en mí y por haberme guiado en este proceso. A Ignacio Toro, mi profesor co-guía, y a Eduardo Muñoz, miembro de mi comisión, les agradezco sus comentarios, que me permitieron lograr la mejor versión de esta memoria. Asimismo, quiero agradecer a Hernán Morales por su ayuda con la corrección de sesgo, que fue esencial para obtener los resultados de este estudio.

# TABLA DE CONTENIDO

1	Introducción.....	1
1.1	Motivación.....	1
1.2	Objetivos.....	2
1.2.1	Objetivo general.....	2
1.2.2	Objetivos específicos.....	2
1.3	Estructura del documento.....	2
2	Marco teórico.....	3
2.1	Cambio climático.....	3
2.1.1	Escenarios climáticos.....	4
2.1.2	Modelos de circulación general y técnicas de escalamiento.....	6
2.1.3	Incertidumbre en las proyecciones climáticas y selección de GCMs.....	7
2.2	Definiciones de sequía.....	9
2.2.1	SPI.....	12
2.2.2	SPEI.....	13
2.2.3	Índice de Anomalía Pluviométrica (RAI).....	14
2.2.4	Índice de Aridez de Martonne.....	15
2.2.5	Cálculo de la Evapotranspiración.....	16
2.3	Estudios previos de cambio climático en la Isla Rapa Nui.....	17
3	Caracterización zona de estudio.....	20
3.1	Antecedentes generales.....	20
3.2	Caracterización geológica y geomorfológica.....	21
3.3	Clima y meteorología.....	24
3.4	Actividades productivas y derechos de agua.....	27
4	Metodología y datos.....	30
4.1	Variables meteorológicas.....	31
4.1.1	Datos observados.....	31
4.1.2	Datos climáticos simulados por GCM.....	31

4.2	Procesamiento de los datos .....	32
4.2.1	Datos observados .....	32
4.2.2	Etapa futura .....	32
4.2.3	Selección de GCMs.....	34
4.3	Estimación de la evapotranspiración e Índices de sequía.....	35
<b>5</b>	<b>Resultados y Análisis .....</b>	<b>37</b>
5.1	Proyecciones climáticas.....	37
5.2	Evapotranspiración potencial.....	45
5.3	Proyección de eventos de sequía .....	47
5.3.1	SPI.....	47
5.3.2	SPEI .....	49
5.3.3	RAI.....	54
5.4	Índice de Aridez de Martonne (AI) .....	56
<b>6</b>	<b>Conclusiones.....</b>	<b>58</b>
	<b>Bibliografía.....</b>	<b>60</b>
	<b>Anexos.....</b>	<b>67</b>
	Anexo A: Humedales Isla Rapa Nui.....	67
	Anexo B: Modelos de Circulación General.....	70
	Anexo C: Proyecciones Climáticas .....	74
	Anexo D: Evapotranspiración Potencial.....	77
	Anexo E: Índices de sequía .....	80

## **ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 2-1:	Escenarios de proyecto CMIP5.....	5
Tabla 2-2:	Descripción de los tipos de sequía. ....	9
Tabla 2-3:	Nombres y siglas de los indicadores básicos en base a datos de estaciones. Fuente: (Dictuc & DGA, 2021) .....	10
Tabla 2-4:	Indicadores e índices de sequía. Fuente: (OMM y GWP, 2016). ....	11

Tabla 2-5: Clasificación del SPI y SPEI. Fuente: (McKee y otros, 1993) .....	14
Tabla 2-6: Clasificación RAI. Fuente: (van Rooy, M.P, 1965).....	15
Tabla 2-7: Clasificación climas con AI. Fuente: (Mercado Mancera y otros, 2014). .....	16
Tabla 2-8: Métodos de estimación de la evapotranspiración y sus fórmulas para el cálculo. ....	16
Tabla 2-9: Resultados de Downscaling de Precipitación y Temperatura, RCP 4,5 y 8,5. Fuente: (Gatica & Toro, 2020). .....	19
Tabla 3-1: Uso de suelo en la Isla. Fuente: (CONAF, 2019) .....	23
Tabla 3-2: Precipitación y temperatura, media mensual y anual.....	25
Tabla 3-3: Derechos de agua concedidos para la comuna de Isla de Pascua. Fuente: (DGA, 2024). .....	29
Tabla 4-1: Variables utilizadas para la descarga de los GCM. Fuente: (Copernicus, 2021).....	31
Tabla 4-2: Descripción de los datos descargados para CMIP5. Fuente: (Copernicus, 2021). ....	32
Tabla 5-1: Resultados GCMs brutos. ....	37
Tabla 5-2: Resultados corrección de sesgo MBCn modelos seleccionados. ....	39
Tabla 5-3: Resultados corrección de sesgo MBCn, periodos estudio Gatica y Toro. ....	40
Tabla 5-4: Resultados de evapotranspiración potencial para los distintos métodos de cálculo, periodo observado (1970-2023). ....	45
Tabla 5-5: Análisis de sensibilidad ETP.....	45
Tabla 5-6: Resultados SPI periodo observado.....	47
Tabla 5-7: Resultados SPI, GCMs periodo 1970-2023. ....	48
Tabla 5-8: Resultados SPI, GCMs periodos futuros. ....	49
Tabla 5-9: Resultados SPEI con Hargreaves, periodo observado. ....	50
Tabla 5-10: Resultados SPEI con Hargreaves, GCMs periodo 1970-2023.....	51

Tabla 5-11: Resultados SPEI con Hargreaves, GCMs periodos futuros. ....	51
Tabla 5-12: Resultados RAI periodo observado.....	54
Tabla 5-13: Resultados RAI, GCMs periodo 1970-2023. ....	55
Tabla 5-14: Resultados RAI, GCMs periodos futuros. ....	56

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Historia del cambio de la temperatura global y causas del calentamiento reciente. Fuente: (IPCC, 2021).....	4
Figura 2-2: Emisiones de combustibles fósiles compatibles simuladas mediante los modelos CMIP5 para los cuatro escenarios RCP. Series temporales de emisiones anuales. Fuente: (IPCC, 2013).....	6
Figura 2-3: Diagrama esquemático de la corrección de sesgo. Fuente: (Pica-Téllez y otros, 2020). .....	7
Figura 2-4: Proceso de estimación de proyecciones de variables climáticas bajo escenarios de cambio climático. Fuente: (SEA, 2023). ....	7
Figura 2-5: Ahu Tonariki, centro ceremonial más grande de Rapa Nui, ubicado en la zona costera noreste.....	18
Figura 3-1: Mapa de la zona de estudio.....	20
Figura 3-2: Curva hipsométrica isla Rapa Nui. ....	22
Figura 3-3: Pendiente isla Rapa Nui. Fuente: (CONAF, 2017).....	22
Figura 3-4: Cobertura y uso de suelo. Fuente: (CONAF, 2019) .....	23
Figura 3-5: Estación meteorológica Mataveri. ....	24
Figura 3-6: Climograma estación Mataveri período 1970-2023. ....	25
Figura 3-7: Precipitaciones anuales, estación Mataveri período 1970-2023.....	26

Figura 3-8: Curvas de variación estacional para temperatura media y precipitación, en el periodo observado (1970-2023).....	26
Figura 3-9: Espejo de agua dentro del cráter del volcán Rano Kau. ....	27
Figura 3-10: Ubicación de pozos y mapa de dirección del movimiento conceptual de agua subterránea. Fuente: (DGA, Montgomery & Associates Consultores Ltda., 2011).....	28
Figura 4-1: Diagrama de la metodología.....	30
Figura 4-2: Resolución horizontal de GCMs respecto al tamaño de la isla Rapa Nui. Ejemplo asociado a GCM CSIRO-Mk3-6-0.....	33
Figura 4-3: Esquema modelos GCM descargados. ....	34
Figura 4-4: Esquema de un evento hipotético de sequía. En línea naranja se ilustra una serie de SPI. La línea punteada de color verde indica el umbral por debajo del cual se considera sequía. La magnitud del evento es el producto de la duración y la intensidad (área rayada entre el comienzo y el fin del evento). Fuente: (Podestá y otros, 2020). ....	36
Figura 5-1: Curva de variación estacional de precipitación para el periodo histórico, a la izquierda con los GCMs brutos y a la derecha luego de la corrección de sesgo.....	38
Figura 5-2: Número de días que presentan precipitación, a la derecha aplicando corrección de sesgo en el periodo futuro completo y a la izquierda aplicando corrección en ventanas de 35 años. ....	39
Figura 5-3: Evolución temporal de las variables en estudio bajo el escenario RCP 8,5. ....	41
Figura 5-4: Curva de variación estacional de precipitación. ....	42
Figura 5-5: Curva de duración de precipitación, GCMs seleccionados. ....	43
Figura 5-6: Curva de duración de temperatura media, GCMs seleccionados. ....	44
Figura 5-7: Evolución de la evapotranspiración potencial bajo escenario RCP 8,5.....	46
Figura 5-8: Resultados de sequías índice SPI, periodo observado. ....	48
Figura 5-9: Resultados de sequías índice SPEI, periodo observado.....	50
Figura 5-10: Frecuencia eventos, SPEI escala 24 meses, Thornthwaite. ....	53

Figura 5-11: Frecuencia eventos, SPEI escala 24 meses, Hargreaves.....	53
Figura 5-12: Frecuencia eventos, SPEI escala 24 meses, Oudin.....	54
Figura 5-13: RAI, periodo observado.....	55
Figura 5-14: Frecuencia Índice de Aridez de Martonne.....	57

# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 Motivación

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) define la sequía como un periodo de condiciones anormalmente secas durante el tiempo suficiente como para causar un desequilibrio hidrológico grave. La humedad y las aguas subterráneas almacenadas por el suelo también resultan afectadas por los aumentos en la evapotranspiración, el incremento en la temperatura y por la disminución de la precipitación. Se prevé que en muchas regiones aumentará la probabilidad de fenómenos compuestos con un mayor calentamiento global (nivel de confianza alto). En particular, es probable que las olas de calor y las sequías simultáneas sean más frecuentes (IPCC, 2021).

Durante la 28ª Conferencia de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (COP28), se reafirmó la vulnerabilidad aguda de las comunidades insulares del Pacífico frente al cambio climático (Programa Cambio Climático en Rapa Nui, 2023). Algunos sistemas únicos y amenazados, incluidos ecosistemas y culturas, ya están en riesgo debido al cambio climático. Como otras comunidades isleñas en el Océano Pacífico, Rapa Nui enfrenta el impacto adverso del cambio climático, la contaminación por plásticos y otros desafíos ambientales (ONU, 2018).

Rapa Nui, es una isla de origen volcánico, ubicada en el Océano Pacífico Sur a aproximadamente 3.700 km de la costa chilena, posee una extensión de 164 km<sup>2</sup> y su principal fuente de agua dulce es un sistema acuífero subterráneo. Debido a la alta permeabilidad de su suelo volcánico, existe escurrimiento superficial de forma intermitente, pues se producen grandes volúmenes de recarga de agua subterránea por infiltración de agua lluvia, es decir, no presenta ríos en su superficie (DGA, Montgomery & Associates Consultores Ltda., 2011). El Parque Nacional Rapa Nui, que cubre aproximadamente el 43% del territorio de la isla, fue declarado Patrimonio Mundial de la UNESCO en la categoría Bien Cultural, gracias a que la isla alberga esculturas arqueológicas únicas en el mundo llamadas *moai*.

Esto hace que sea fundamental estudiar el impacto del cambio climático en la isla, especialmente la disponibilidad futura de agua para la recarga de su acuífero, que es altamente vulnerable. En los últimos años, la población flotante de la isla ha aumentado y se espera que continúe creciendo, lo que incrementará la demanda de agua para consumo y, por ende, las extracciones desde el sistema subterráneo. Dada las características del acuífero de la Isla, un aumento no sustentable de las extracciones producirá un aumento en la salinidad de agua subterránea, y, por ende, una disminución del recurso hídrico para uso potable (Gracia Serrano y otros, 2016). Este estudio se enfoca en desarrollar una propuesta metodológica que permita reducir la incertidumbre en las proyecciones de sequía en la isla Rapa Nui. Esto se realiza mediante la utilización de modelos climáticos globales bajo el escenario RCP 8,5, el cual representa un contexto de altas emisiones con concentraciones de gases de efecto invernadero

(GEI) en rápido aumento a lo largo del siglo XXI. Además, se analiza la influencia de la elección del método de estimación de la evapotranspiración potencial en las proyecciones de sequías.

Gatica y Toro (2020) evaluaron las precipitaciones y temperaturas medias mensuales en Rapa Nui, utilizando diversos modelos climáticos globales para dos escenarios climáticos RCP 4,5 y 8,5, escalando las variables mediante el método *Quantile Delta Mapping* (QDM). Esta investigación analiza si, al cambiar el método de escalamiento por un método multivariado como el MBCn y restringir la evaluación solo a algunos modelos que representen adecuadamente las variables meteorológicas en el período histórico, se modifican las conclusiones futuras y se logra reducir la incertidumbre.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo general**

Generar una propuesta metodológica para disminuir la incertidumbre en las proyecciones de índices de sequía obtenidos utilizando diferentes métodos de escalamiento estadístico en la Isla Rapa Nui.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

1. Determinar índices de sequía proyectados con modelos GCM disponibles bajo escenario RCP 8,5 usando un método estadístico multivariado.
2. Analizar el impacto del método de estimación de evapotranspiración en el cálculo de índices de sequía.
3. Establecer metodología para reducir incertidumbre en las proyecciones de los índices de sequía.

## **1.3 Estructura del documento**

La organización de este documento se describe a continuación:

- Capítulo 2: Se presenta el Marco Teórico, en donde se expone una síntesis de la información existente en la literatura referente a los temas que se desarrollan en la presente memoria.
- Capítulo 3: Se caracteriza la zona de estudio, incorporando aspectos como antecedentes generales, geología y geomorfología, clima, uso de agua, entre otros factores.
- Capítulo 4: Se detalla la propuesta de metodología a utilizar para estimar la evapotranspiración potencial y los índices de sequía.
- Capítulo 5: Se presentan los resultados obtenidos para la corrección de sesgo de las variables climáticas, la evapotranspiración potencial estimada mediante distintos métodos, y los índices de sequía, junto con su respectivo análisis.
- En el Capítulo 6: Se exponen las principales conclusiones del estudio.

## 2 MARCO TEÓRICO

En este capítulo, se presenta una síntesis de la información existente en la literatura referente a los temas que se desarrollan en la presente memoria. En primer lugar, se contextualiza el cambio climático, incluyendo escenarios climáticos, modelos de circulación general y técnicas de escalamiento. A continuación, se definen los índices de sequía y los métodos de cálculo de la evapotranspiración potencial. Además, se caracteriza la incertidumbre de las proyecciones climáticas y se presentan resultados de estudios previos de índices de sequía en la isla.

### 2.1 Cambio climático

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), define en su artículo 1° el cambio climático como un “cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables”, es decir, es la variación del estado del clima identificable (por ejemplo, mediante pruebas estadísticas) en las variaciones del valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante largos períodos de tiempo, generalmente decenios o períodos más largos (IPCC, 2023) .

El *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), creado en 1988, es el órgano internacional encargado de evaluar los conocimientos científicos relativos al cambio climático. Desde el inicio de sus funciones, ha realizado diversas publicaciones de reportes e informes, desarrollando su labor en tres grupos de trabajo, Grupo de trabajo I: La base científica; Grupo de trabajo II: Impactos, adaptación y vulnerabilidad; y Grupo de trabajo III: Mitigación del cambio climático. Además, cuenta con un equipo especial sobre los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero.

El último reporte publicado por el IPCC en el 2023 es el Sexto Informe de Evaluación (AR6). Durante el año 2021, el Grupo de Trabajo I publicó un resumen para responsables de políticas, en donde se detallan las bases físicas del cambio climático. En dicho resumen, se menciona que el calentamiento de la atmósfera, el océano y la tierra es indudablemente debido a la influencia humana. La Figura 2-1 muestra que la influencia humana ha provocado un calentamiento en el clima a un ritmo sin precedentes en al menos 2.000 años. Se observa en esta figura, el cambio en la temperatura global en la superficie del planeta reconstruido y simulado, evidenciándose en el periodo 1850- 2020 el gran impacto del factor humano en el aumento de la temperatura superficial.

También se indica que es probable que la influencia humana haya incrementado la posibilidad de que se produzcan fenómenos extremos compuestos desde la década de 1950, estos fenómenos son la combinación de diversas amenazas que contribuyen a un riesgo social y medioambiental. Entre estos fenómenos se incluye las de calor y sequías simultáneas, inundaciones compuestas, condiciones

meteorológicas compuestas propicias para los incendios forestales, entre otros. Esto se evidencia en una mayor frecuencia de las olas de calor y sequías simultáneas a escala global (nivel de confianza alto), en condiciones meteorológicas favorables para la ocurrencia de incendios forestales en algunas regiones de todos los continentes habitados (nivel de confianza medio) y las inundaciones compuestas en algunos lugares (nivel de confianza medio) (IPCC, 2021).

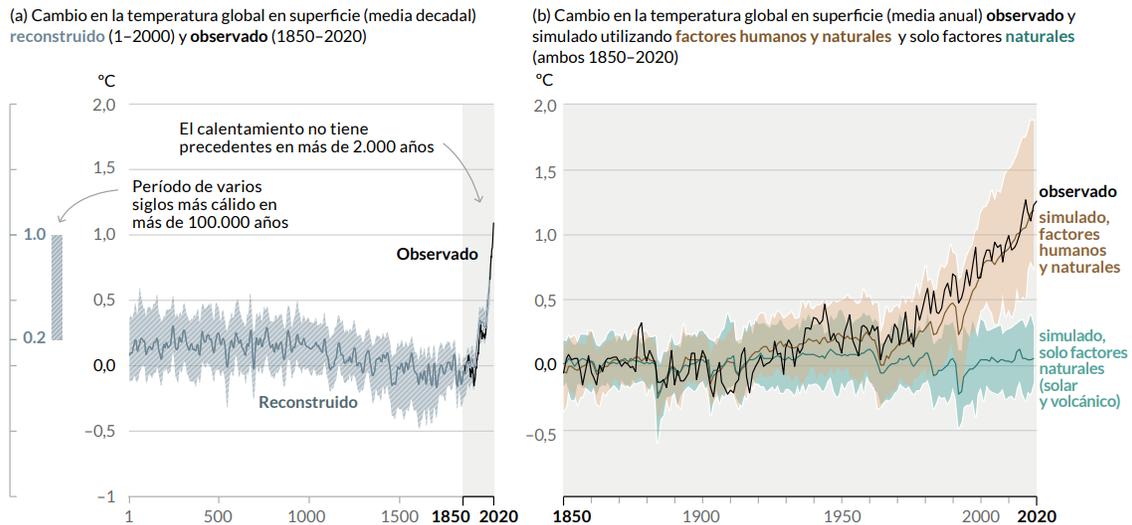


Figura 2-1: Historia del cambio de la temperatura global y causas del calentamiento reciente. Fuente: (IPCC, 2021).

El IPCC finalizó el Reporte de síntesis para el Sexto Informe de Evaluación durante la 58ª sesión del Panel, celebrada en Interlaken, Suiza, del 13 al 19 de marzo de 2023. En dicho informe se menciona que el cambio climático ha reducido la seguridad alimentaria y ha afectado la seguridad hídrica, lo que dificulta el avance para alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Además, ha ocasionado el calentamiento y la acidificación de los océanos, lo que afecta negativamente a la obtención de recursos provenientes del mar como la pesca y la acuicultura de mariscos. Otro impacto del cambio climático es que aproximadamente la mitad de la población mundial sufre actualmente una grave escasez de agua durante al menos parte del año, debido a una combinación de factores climáticos y no climáticos (confianza media) (IPCC, 2023).

### 2.1.1 Escenarios climáticos

De acuerdo con el IPCC, se define un *escenario climático* como una descripción plausible y coherente de cómo podría desarrollarse el sistema climático en el futuro, basada en supuestos específicos sobre el crecimiento de la población, el desarrollo económico, las tecnologías energéticas, las políticas y otros factores que influyen en las emisiones de gases de efecto invernadero y en los cambios en el uso de la tierra. Por lo tanto, los escenarios de cambio climático permiten comprender la variación que sufren los climas regionales al aumentar las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI), además de

entender cómo algunos sistemas vulnerables pueden experimentar consecuencias negativas frente al cambio climático.

En los informes de evaluación emitidos por el IPCC se ha actualizado y cambiado la nomenclatura de los escenarios de emisión. En el Tercer (2000) y Cuarto Informe de Evaluación (2007), se utilizaron los *Special Report on Emissions Scenarios* (SRES), que se dividen en cuatro familias principales (A1, A2, B1 y B2). Cada una de estas familias presenta sus propias características y supuestos sobre el crecimiento económico, la población mundial, la distribución de la energía, entre otros factores.

En el Quinto Informe de Evaluación (2014) se incluye el proyecto CMIP5 (*Coupled Model Intercomparison Project Phase 5*), el cual presenta escenarios de proyecciones de cambio climático denominados *Representative Concentration Pathways* (RCPs). Estos RCPs incluyen cuatro escenarios futuros posibles de emisiones de gases de efecto invernadero (Figura 2-2). A continuación, en la Tabla 2-1 se detalla cada uno de estos escenarios:

*Tabla 2-1: Escenarios de proyecto CMIP5.*

<b>Escenarios</b>	<b>Descripción</b>
RCP 2,6	Representa un escenario de bajas emisiones en el que las concentraciones de GEI alcanzan una emisión máxima cercana en el año 2020 y luego disminuyen rápidamente durante el siglo XXI. Este escenario está asociado con un forzamiento radiativo de aproximadamente +2,6 [W/m <sup>2</sup> ] al año 2100.
RCP 4,5	Es un escenario de emisiones moderadas en el que las concentraciones de GEI aumentan durante gran parte del siglo XXI, pero se estabilizan después debido a la implementación de políticas de mitigación. El forzamiento radiativo en el año 2100 se estima en alrededor de 4,5 [W/m <sup>2</sup> ].
RCP 6,0	Describe un escenario de emisiones relativamente altas en el que las concentraciones de GEI aumentan significativamente durante el siglo XXI. El forzamiento radiativo en el año 2100 es de aproximadamente 6,0 [W/m <sup>2</sup> ].
RCP 8,5	Representa un escenario de altas emisiones en el que las concentraciones de GEI continúan aumentando rápidamente durante todo el siglo XXI. Este es el escenario de referencia utilizado para evaluar los impactos del cambio climático si no se toman medidas significativas para reducir las emisiones. El forzamiento radiativo en el año 2100 es de alrededor de 8,5 [W/m <sup>2</sup> ].

En la sexta y última versión del Informe de Evaluación (AR6), se incorporan factores de desarrollo socioeconómico en los escenarios climáticos. Se utiliza el término *Shared Socio-economic Pathways* (SSP), representado como SSPx-y, donde “x” es el escenario socioeconómico e “y” al valor del forzante radiativo aproximado al año 2100.

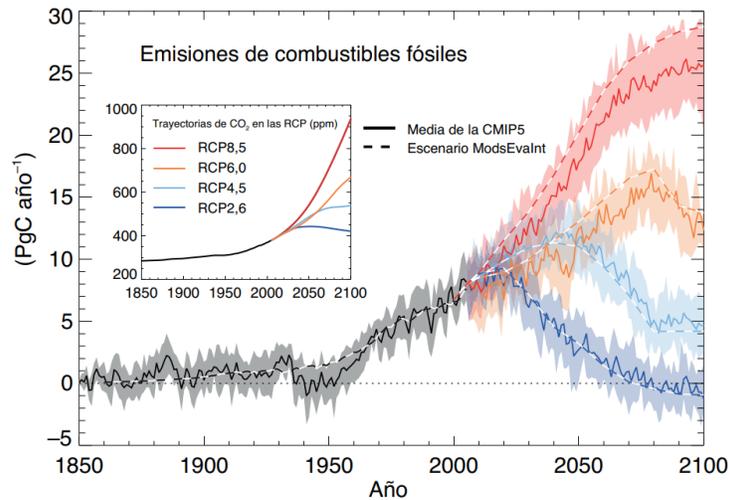


Figura 2-2: Emisiones de combustibles fósiles compatibles simuladas mediante los modelos CMIP5 para los cuatro escenarios RCP. Series temporales de emisiones anuales. Fuente: (IPCC, 2013).

### 2.1.2 Modelos de circulación general y técnicas de escalamiento

Los modelos de circulación general atmosférica (*Global Climate Models*, GCM) consisten en una cuadrícula o resolución espectral tridimensional de resolución espacial de 100-200 km. Estos modelos determinan la presión de superficie y las distribuciones verticales de velocidad, temperatura, densidad y vapor de agua como funciones de tiempo de leyes físicas, como la ley hidrostática, la primera ley de la termodinámica, la ley de conservación de masa, entre otras. Mediante estos modelos es posible modelar y predecir el comportamiento de ciertas variables atmosféricas de interés para diferentes escenarios futuros de emisión de GEI (SEA, 2023).

Los GCM permiten simular procesos de gran escala, como las progresiones de altas y bajas presiones o corrientes oceánicas, entre otros. Sin embargo, en estudios hidrológicos es necesario realizar un escalamiento (*downscaling*) de estos modelos para ajustar la escala en la estimación de las variables meteorológicas, lo que permite representar los procesos hidrológicos. Existen dos tipos de escalamiento: el dinámico, que realiza un modelo climático regional (RCM) de mayor resolución, y el estadístico, que establece relaciones estadísticas entre la información de los GCM y los datos observados. Entre las técnicas de escalamiento y corrección de sesgo (Figura 2-3) utilizadas en la actualidad se encuentran:

- a. *Quantile Delta Mapping* (QDM): Propuesta por (Cannon y otros, 2015) conserva los cambios absolutos o relativos proyectados por el modelo en los cuantiles, mientras que corrige los sesgos sistemáticos en los cuantiles de la serie modelada con respecto a los valores observados. Este método se aplica solo a una variable. Este método fue utilizado en el proyecto *Aplicación de la metodología de actualización del Balance Hídrico Nacional en las cuencas de la parte sur de la Macrozona Austral e Isla de Pascua* (DGA, 2019).

- b. *Multivariate Bias Correction algorithm* (MBCn): Esta técnica fue propuesta por (Cannon A. J.)(2018). La diferencia con el método anterior es que esta es una corrección multivariada, es decir, se puede corregir más de una variable a la vez, por ejemplo, precipitación y temperatura. El principal beneficio del MBCn es que permite corregir la dependencia entre variables y no se limita a corregir una medida específica de dependencia conjunta (Gateño, 2022). Este método fue utilizado el estudio *Proyección de la frecuencia de eventos de sequía para Rapa Nui escenarios de cambio climático RCP 4,5 Y 8,5* (Toro y otros, 2022).

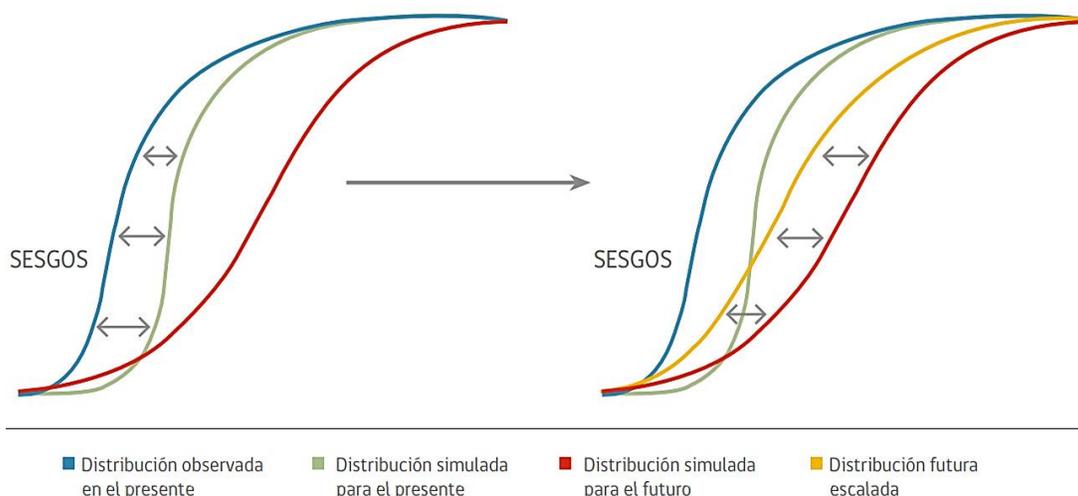


Figura 2-3: Diagrama esquemático de la corrección de sesgo. Fuente: (Pica-Téllez y otros, 2020).

### 2.1.3 Incertidumbre en las proyecciones climáticas y selección de GCMs

Para obtener proyecciones de variables atmosféricas, es necesario realizar un proceso de varias etapas (Figura 2-4), cada una con diferentes grados de dificultad e incertidumbre.



Figura 2-4: Proceso de estimación de proyecciones de variables climáticas bajo escenarios de cambio climático. Fuente: (SEA, 2023).

En el AR6, se menciona que las proyecciones de los modelos climáticos muestran que las incertidumbres en las concentraciones de CO<sup>2</sup> en la atmósfera para 2100 están dominadas por las diferencias entre los escenarios de emisiones. En estos informes emitidos por el IPCC se considera esencial realizar un análisis de incertidumbre y crear diversos escenarios para medir y transmitir la incertidumbre asociada con las predicciones climáticas. Esto ayuda a los tomadores de decisiones a mejorar su capacidad para planificar y ajustarse ante los cambios climáticos futuros.

Luego de escoger un escenario para el proceso de estimación de proyecciones de variables climáticas, es necesario realizar la selección de GCM. En la literatura existen diversos estudios sobre este tema, Gateño (2022) propuso una metodología basada en el desempeño histórico, evaluando 27 modelos (y su promedio) de la Sexta Fase de Intercomparación de Modelos (CMIP6) durante el periodo 1979-2014. Su análisis abarca cuatro aspectos de las series de precipitaciones y temperaturas extremas: (i) variabilidad interanual; (ii) correlación espacial de la media climatológica; (iii) reproducción temporal del ciclo medio anual; y (iv) la tendencia anual.

El estudio *Evaluating CMIP6 Models for climate impact assessments in Chile* (2023) presenta un marco para la evaluación de simulaciones mensuales de precipitación y temperatura de 27 modelos del CMIP6, aplicado a cinco regiones de Chile para obtener proyecciones climáticas anuales y estacionales más precisas. Los GCMs se evalúan de acuerdo con el Índice de Desempeño Pasado (PPI), inspirado en la Eficiencia de Kling-Gupta, que evalúa promedios climatológicos, variabilidad interanual, ciclo estacional y patrones espaciales. La capacidad de los GCMs de reproducir la variabilidad interanual se expresa como el  $ratio_{\sigma} = \sigma_m / \sigma_o$  donde  $\sigma_m$  y  $\sigma_o$  representan las desviaciones estándar modeladas y observadas, respectivamente. Para evaluar la capacidad de cada GCM de reproducir los patrones espaciales climatológicos, se calcula el coeficiente de correlación de Pearson ( $r_{spatial}$ ) entre los valores anuales simulados y observados en cada cuadrícula. También se utiliza el coeficiente de correlación de Pearson ( $r_{cycle}$ ) entre los valores climatológicos mensuales modelados y observados para evaluar la capacidad de los GCMs de replicar los ciclos intraanuales.

Otro estudio (Toro Mena y otros, 2023), establece criterios para seleccionar GCMs con el fin de aplicarlos en balances de agua para operaciones mineras. Utilizando diversas pruebas estadísticas, este estudio busca reducir la incertidumbre y evaluar el desempeño de los GCMs en los escenarios SSP2-4,5 y 5-8,5. Para esto, se consideran cuatro criterios generales definidos por el IPCC (2001): antigüedad, resolución, validez y representatividad, concluyendo que estos criterios de selección pueden ser flexibilizados/modificados en función de los resultados obtenidos para cada una de las áreas de estudio y/o parámetros de interés.

En 2024, investigadores del *Advanced Mining Technology Center* (AMTC) y de la Universidad de Chile, proponen una guía metodológica para la selección 18 GCMs del CMIP6, interpolados al producto meteorológico en rejilla CR2METv2.0 (0,05° x 0,05°) para la región norte de Chile (17°S - 32°S). Se incorporan tres criterios clave: representación de la climatología histórica (PPI), representación de índices de climas húmedos extremos (Índice Integrado de Impacto Climático - CI3) y preservación de la señal de cambio climático (Criterios de Desempeño de Señal Climática – SCPI). Entre los resultados del estudio se destaca que la evaluación histórica muestra que la variabilidad interanual es la más influyente en los resultados del PPI, tanto para precipitación como para temperaturas (mínima y máxima) (Jerez y otros, 2024).

## 2.2 Definiciones de sequía

Las sequías son una parte normal del clima y pueden darse en todos los regímenes climáticos del mundo, incluso en desiertos y bosques lluviosos (OMM y GWP, 2016). Estas tienen distintas causas, algunas son naturales y otras relacionadas con actividades humanas, sin embargo, el cambio climático aumenta la frecuencia, severidad y duración de las sequías. Generalmente, estas se agrupan en meteorológicas, agrícolas, hidrológicas y socioeconómicas. A continuación, en la Tabla 2-2 se define cada tipo de sequía:

*Tabla 2-2: Descripción de los tipos de sequía.*

<b>Tipo de sequía</b>	<b>Descripción</b>
Meteorológica	Las sequías meteorológicas son eventos temporales y recurrentes que originan escasez de precipitación (Campos-Aranda, 2017). Comúnmente se dice que este tipo de sequía es la que origina los demás tipos.
Hidrológica	Hace referencia a una deficiencia en el caudal o volumen de aguas superficiales o subterráneas (Valiente, 2001). Por lo tanto, la sequía hidrológica contempla un aumento de la frecuencia de los caudales bajos y la disminución en la magnitud de los caudales extremos bajos (MMA, 2020).
Agrícola y ecológica	En función del bioma afectado, se define como un período con un déficit anormal de humedad del suelo, que es resultado de la escasez combinada de precipitaciones y del exceso de evapotranspiración, durante el crecimiento afecta la producción de los cultivos o el funcionamiento del ecosistema en general (IPCC, 2021).
Socioeconómica	Afección de la escasez de agua a las personas y a la actividad económica como consecuencia de la sequía. No es necesario que se produzca una restricción del suministro de agua, sino que basta con que algún sector económico se vea afectado por la escasez hídrica con consecuencias económicas desfavorables (MITECO, 2024).

Los índices estandarizados se definen como un valor numérico que representa el número de desviaciones estándar de una variable para un periodo de acumulación respecto a la condición media. Dado que los regímenes climáticos y los sectores afectados por las sequías son muy variados, no existen índices que puedan aplicarse a todos los tipos de sequía. Por ello, se han establecido diversas metodologías para calcular índices o indicadores, lo que permite seleccionar la metodología más apropiada según el desarrollo cronológico, la zona, el tipo de clima, y el tipo de sequía.

Los indicadores pueden asociarse a diferentes tipos de sequía y a los parámetros de entrada necesarios para su estimación. Por ejemplo, el Índice normalizado de precipitación (SPI) y el índice de severidad de sequía de Palmer (PDSI) están asociados a la sequía meteorológica, mientras que el Índice de sequía por humedad en el suelo (SMDI) y el índice de sequía Keetch- Bryam (KBDI) permiten cuantificar la sequía hidrológica. Para la sequía agrícola, se puede utilizar el índice de sequía específico de cultivo (CSDI) o el Índice de aporte de agua superficial (SWSI). En el caso de la sequía socioeconómica, esta se cuantifica a través de las relaciones de pérdidas económicas derivadas de la escasez hídrica, o el número de personas

afectadas por restricciones de abastecimiento de agua y, en casos extremos, el recuento de fallecidos (Valiente, 2001).

La Tabla 2-3 muestra los índices de sequía propuestos por la DGA y Dictuc (Dictuc & DGA, 2021) en el contexto de un estudio destinado a perfeccionar las capacidades de la DGA en la gestión de ciclos de sequía y escasez. En la Tabla 2-4 se presenta información extraída desde el *Manual de Indicadores e Índices de Sequía* (OMM y GWP, 2016), que resume los índices asociados a variables meteorológicas como precipitación, evapotranspiración potencial, temperatura, entre otras. Además, clasifica la facilidad de uso de estos índices mediante colores: verde, amarillo o rojo, dependiendo de factores como la accesibilidad del programa de cálculo, la cantidad de datos requeridos, y la complejidad de los cálculos.

Tabla 2-3: Nombres y siglas de los indicadores básicos en base a datos de estaciones. Fuente: (Dictuc & DGA, 2021)

Internacional (inglés)		Nacional (español)		Variables y unidad
Nombre	Sigla	Nombre	Sigla	
<i>Standardized Precipitation Index</i>	SPI	Índice de Precipitación Estandarizado	IPE	Precipitación [mm]
<i>Standardized Stream Flow Index</i>	SSFI	Índice de caudales Estandarizado	ICE	Caudal [m <sup>3</sup> /s]
<i>Standardized Water level Index</i>	SWI	Índice de nivel de Agua Subterránea Estandarizado	IASE	Nivel de acuífero [m]
<i>Standardized Precipitation Evapotranspiration Index</i>	SPEI	Índice de Precipitación-Evapotranspiración Estandarizado	IPEE	Precipitación y Evapotranspiración Potencial [mm]

Tabla 2-4: Indicadores e índices de sequía. Fuente: (OMM y GWP, 2016).

Meteorología	Página	Facilidad de uso	Parámetros de entrada	Información adicional
Índice de anomalía de la aridez (AAI)	11	Verde	P, T, ETP, ET	Disponible con fines operativos para India
Deciles	11	Verde	P	Fácil de calcular; los ejemplos de Australia resultan útiles
Índice de sequía de Keetch-Byram (KBDI)	12	Verde	P, T	Los cálculos se basan en el clima de la zona de interés
Porcentaje de precipitación habitual	12	Verde	P	Cálculos sencillos
Índice normalizado de precipitación (SPI)	13	Verde	P	Marcado por la OMM como punto de partida para la vigilancia de sequías meteorológicas
Anomalía ponderada y normalizada de la precipitación (WASP)	15	Verde	P, T	Utiliza datos reticulares para vigilar la sequía en regiones tropicales
Índice de aridez (AI)	15	Amarillo	P, T	También se puede utilizar en clasificaciones climáticas
Índice Z de China (CZI)	16	Amarillo	P	Concebido para mejorar los datos del SPI
Índice de humedad de los cultivos (CMI)	16	Amarillo	P, T	Se necesitan valores semanales
Índice de zonas de sequía (DAI)	17	Amarillo	P	Ofrece un indicio de la evolución en la estación del monzón
Índice de reconocimiento de sequías (DRI)	17	Amarillo	P, T	Se necesitan valores mensuales de temperatura y precipitación
Índice de sequía efectiva (EDI)	18	Amarillo	P	Programa disponible mediante contacto directo con el autor
Coefficiente hidrotérmico de Selyaninov (HTC)	19	Amarillo	P, T	Cálculos fáciles y varios ejemplos de la Federación de Rusia
Índice de sequía de la NOAA (NDI)	19	Amarillo	P	Es mejor utilizarlo en aplicaciones agrícolas
Índice de severidad de sequía de Palmer (PDSI)	20	Amarillo	P, T, CAD	No se le ha asignado el color verde debido a la complejidad de los cálculos y a la necesidad de disponer de datos de series completas
Índice Z de Palmer	20	Amarillo	P, T, CAD	Uno de los numerosos productos de los cálculos del PDSI
Índice de anomalía pluviométrica (RAI)	21	Amarillo	P	Se necesitan datos de series completas
Índice autocalibrado de severidad de sequía de Palmer (sc-PDSI)	22	Amarillo	P, T, CAD	No se le ha asignado el color verde debido a la complejidad de los cálculos y a la necesidad de disponer de datos de series completas
Índice normalizado de anomalías (SAI)	22	Amarillo	P	Se utilizan datos puntuales para describir las condiciones regionales
Índice estandarizado de precipitación y evapotranspiración (SPEI)	23	Amarillo	P, T	Se necesitan datos de series completas; productos similares al SPI, pero con componente de temperatura
Índice de sequía de referencia para la agricultura (ARID)	23	Rojo	P, T, Mod	Producido en el sureste de Estados Unidos de América; no se ha probado lo suficiente fuera de esta región
Índice de sequía específico para cultivos (CSDI)	24	Rojo	P, T, TPR, V, Rad, CAD, Mod, CD	Se necesitan datos de calidad de muchas variables, lo que dificulta su uso
Índice para reclamaciones por sequía (RDI)	25	Rojo	P, T, MN, EM, CF	Similar al Índice del abastecimiento de las aguas superficiales, pero contiene un componente de temperatura

Nota. En los parámetros de entrada se utilizan las siguientes siglas, AS= aguas subterráneas, CAD = contenido de agua disponible, CC = coeficiente de cultivo, CF = caudales fluviales, CS = cobertura del suelo, DC = datos de

cultivos, DHS = déficit hídrico del suelo, EM = embalse, ER = ecorregión, ET = evapotranspiración, ETP = evapotranspiración potencial, MN = manto de nieve, Mod = modelado, P = precipitación, Rad = radiación solar, Sat = satélite, T = temperatura, TPR = temperatura del punto de rocío, TS = tipo de suelo, V = datos sobre el viento, Varios = varios indicadores.

## 2.2.1 SPI

El Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) es un valor numérico que representa el número de desviaciones estándar de la precipitación caída, para un periodo de acumulación respecto a la media. Fue desarrollado en 1992 en Estados Unidos por McKee y otros.

Una de las ventajas de la metodología de cálculo del SPI es su simplicidad, ya que solo requiere información histórica de precipitaciones en la zona de estudio de al menos 30 años. Sin embargo, una desventaja de este índice es que no considera como forzante de entrada el componente de la temperatura, que es importante para el balance hídrico general y el uso del agua en una región. Además, el SPI no considera la evapotranspiración, lo que limita su capacidad para capturar el efecto del aumento de temperaturas (asociado al cambio climático) en la demanda y disponibilidad de humedad (Keyantash, 2023).

Para determinar el índice, se ajusta la precipitación observada a una función distribución acumulada (CDF), generalmente Gamma o Pearson III. Luego, utilizando la aproximación de Zelen y Severo (1965, citado por (Jerez Toledo, 2021)), la CDF se transforma en una variable normal estándar  $Z$ , con media cero y varianza uno:

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

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

$$H(x) = q + (1 - q) \cdot G(x) \quad (2-3)$$

En donde  $c_i$  y  $d_i$  son coeficientes,  $t$  es variable,  $H(x)$  es la función de probabilidad acumulada,  $q$  es la probabilidad de tener valores de precipitación iguales a cero y,  $G(x)$  es la función de distribución acumulada de la función Gamma incompleta, que se ajusta a los datos de precipitación observada.

Una vez que los datos de precipitación son transformados a una variable normal estándar, se procede al cálculo del SPI (Keyantash, 2023), definido como:

$$SPI = \frac{P - P^*}{\sigma_p} \quad (2-4)$$

En donde:

- $P$ : Precipitación observada en el período de interés.
- $P^*$ : Precipitación media histórica.
- $\sigma_p$ : Desviación estándar de la precipitación histórica.

### 2.2.2 SPEI

El Índice de Precipitación-Evapotranspiración Estandarizado (SPEI) fue creado por Vicente-Serrano y otros en el Instituto Pirenaico de Ecología, en Zaragoza (España). Utiliza como base el SPI, pero incluye tanto la precipitación como el componente de la evapotranspiración potencial (ETP), de manera que el índice tiene en cuenta el efecto de la temperatura en la aparición de sequías mediante un cálculo básico de balance hídrico. Sus componentes de entrada son datos mensuales de precipitación y temperatura. Dado que utiliza datos de temperatura, el SPEI es adecuado para analizar el efecto del cambio climático en los productos de los modelos de acuerdo con distintos supuestos futuros.

Entre sus desventajas, se encuentra la necesidad de disponer de un conjunto de datos completos en serie para la temperatura y la precipitación, lo que puede limitar su uso si no se cuenta con datos suficientes. Además, SPEI puede no detectar inmediatamente situaciones de sequía que se desarrollan con rapidez, debido a que es un índice mensual.

Para calcular el SPEI, se utiliza un balance hídrico climático definido como  $D_i = P_i - ET_0$  (2-5), donde  $P_i$  es la precipitación y  $ET_0$  es la evapotranspiración potencial para un periodo  $i$ . Este balance se puede obtener para diferentes escalas temporales  $k$  (un mes, dos meses, seis meses, etc.).

Los valores de  $D$  se ajustan a una distribución de probabilidad para transformar los valores originales en unidades estandarizadas. Esto permite que los valores sean comparables tanto en el espacio como en el tiempo, y en diferentes escalas temporales del SPEI. Para el ajuste, se selecciona la distribución Log-logística. La ecuación para calcular el SPEI se presenta a continuación (Vicente-Serrano, 2024):

$$SPEI = W - \left( \frac{C_0 + C_1W + C_2W^2}{1 + d_1W + d_2W^2 + d_3W^3} \right) \quad (2-6)$$

$$W = \sqrt{-2 \ln P} \text{ para } P \leq 0,5 \quad (2-7)$$

En donde  $P$  es la probabilidad de exceder un valor  $D$  determinado, calculada como  $P= 1-F(x)$ . Si  $P > 0,5$ ,  $P$  se reemplaza por  $1-P$  y el signo resultante de SPEI se invierte. Las constantes utilizadas en la fórmula son:  $C_0 = 2,515517$ ,  $C_1 = 0,802853$ ,  $C_2 = 0,010328$ ,  $d_1 = 1,432788$ ,  $d_2 = 0,189269$  y  $d_3 = 0,001308$ . La Tabla 2-5 presenta la clasificación que se utiliza para interpretar los resultados de los índices SPI y SPEI en términos de condiciones de humedad o sequía.

Tabla 2-5: Clasificación del SPI y SPEI. Fuente: (McKee y otros, 1993)

Valor	Clasificación
$\geq 2,00$	Extremadamente húmedo
1,50 a 1,99	Severamente húmedo
1,00 a 1,49	Moderadamente húmedo
0 a 0,99	Ligeramente húmedo (cercano a lo normal)
0 a -0,99	Sequía ligera (cercano a lo normal)
-1,00 a -1,49	Sequía moderada
-1,50 a -1,99	Sequía severa
$\leq -2,00$	Sequía extrema

### 2.2.3 Índice de Anomalía Pluviométrica (RAI)

El Índice de Anomalía Pluviométrica (RAI), desarrollado por van Rooy (1965), se utiliza para representar periodos de sequía y humedad en una zona (Sadiq y otros, 2020). Para su cálculo, los valores de precipitación mensual del periodo de estudio se ordenan de manera ascendente. Luego, se calcula el promedio de los diez valores de precipitación más altos y el de los diez más bajos. Los índices RAI positivos y negativos se determinan utilizando la media de estos diez valores extremos. La fórmula para calcular el RAI positivo y negativo es la siguiente:

$$RAI = +3 \frac{P - \bar{P}}{M - \bar{P}} \quad (2-8)$$

$$RAI = -3 \frac{P - \bar{P}}{m - \bar{P}} \quad (2-9)$$

Donde:

- $P$ : Precipitación para el año específico.
- $\bar{P}$ : Precipitación media de todos los registros para el periodo.
- $M$ : Media de los diez registros de precipitación más altos para el periodo en estudio.
- $m$ : Media de los diez registros de precipitación más bajos para el periodo en estudio.

El signo positivo o negativo de las ecuaciones anteriores se relaciona con las anomalías de precipitación positivas o negativas. Los valores de RAI obtenidos se clasifican de acuerdo con la Tabla 2-6:

Tabla 2-6: Clasificación RAI. Fuente: (van Rooy, M.P, 1965).

Valor	Clasificación
$\geq 3,00$	Extremadamente húmedo
2,00 a 2,99	Muy húmedo
1,00 a 1,99	Moderadamente húmedo
0,50 a 0,99	Ligeramente húmedo
0,49 a -0,49	Casi normal
-0,50 a -0,99	Ligeramente seco
-1,00 a -1,99	Moderadamente seco
-2,00 a -2,99	Muy seco
$\leq -3,00$	Extremadamente seco

#### 2.2.4 Índice de Aridez de Martonne

El índice de aridez de Martonne (AI) (De Martonne, 1925), define la aridez como la relación entre la precipitación y la temperatura media. Se puede emplear para clasificar los climas de distintas regiones, porque la relación de la precipitación con la temperatura sirve para determinar el régimen climático de una zona según la

Tabla 2-7 (OMM y GWP, 2016). Aunque puede indicar situaciones de sequía en zonas áridas, su principal función es categorizar climas, no evaluar eventos de sequía como lo hacen otros índices, como el SPI o el SPEI.

Entre sus ventajas está que es fácil de calcular ya que solo necesita dos datos de entrada (precipitación y temperatura), mientras que su punto débil es que no tiene en cuenta el arrastre de sequía de un año a otro, por lo que puede tardar en reaccionar en determinados climas. Su cálculo a escala mensual se expresa en la siguiente fórmula (Mercado Mancera y otros, 2010):

$$AI = \frac{12 \times P}{T + 10} \quad (2-10)$$

Donde,  $P$ : Precipitación media mensual en mm y  $T$ : Temperatura media mensual en °C.

Tabla 2-7: Clasificación climas con AI. Fuente: (Mercado Mancera y otros, 2014).

Valor	Zona
0 – 5	Desiertos (Hiperárido)
5 – 10	Semidesierto (Árido)
10 - 20	Semiárido de tipo mediterráneo
20 – 30	Subhúmedo
30 – 60	Húmeda
> 60	Perhúmeda

## 2.2.5 Cálculo de la Evapotranspiración

Thornthwaite (1948) introdujo el concepto de evapotranspiración potencial (ETP) como una medida de la demanda atmosférica de humedad bajo un clima o condición climática determinada. La ETP se define como la máxima cantidad de agua que puede evaporarse desde un suelo completamente cubierto de vegetación, que se desarrolla en condiciones óptimas y en el supuesto caso de no existir limitaciones en el suministro de agua (Sánchez Martínez, 2001).

Para varios índices de sequía, como el SPEI, se necesita la evapotranspiración como variable de entrada. En caso de no contar con mediciones en el sector de estudio, existen diversos métodos para estimar la evapotranspiración potencial. La Tabla 2-8 describe algunas de estas metodologías y fórmulas para su cálculo:

Tabla 2-8: Métodos de estimación de la evapotranspiración y sus fórmulas para el cálculo.

Método	Descripción	Ecuación
Thornthwaite (1948)	Este método calcula el índice de calor en base a la temperatura media mensual, luego se corrige según el número máximo de horas de sol y el número de días del mes.	$ETP = DL \left( \frac{10T_m}{I} \right)^K \quad (2-11)$ $K = 0,49 + 1,8 \left( \frac{I}{100} \right) - 0,77 \left( \frac{I}{100} \right)^2 + 0,67 \left( \frac{I}{100} \right)^3 \quad (2-12)$ $I = \sum_{k=1}^{12} \left( \frac{T_k}{5} \right)^{1,51} \quad (2-13)$

Método	Descripción	Ecuación
Turc (1961)	Este método es uno de los clásicos en todo el mundo y fue propuesto por L. Turc basándose en balances hídricos realizados en cuencas de ríos y en resultados de experiencias con métodos directos en ciertas regiones de Francia, Escocia y África del Norte.	$ETP = 0,4(R_s + 50) \left( \frac{T_a}{T_a + 15} \right) \left( \frac{1 + (50 - RH)}{70} \right) \quad (2-14)$
Penman-Monteith (1965)	Corresponde a una modificación realizada por J.L. Monteith a la formulación propuesta por H.L. Penman (1948).	$ETP = \frac{\Delta R_n + \gamma(e_a - e_d)W}{\lambda \rho \left[ \Delta + \gamma \left( 1 + \frac{r_s}{r_a} \right) \right]} \quad (2-15)$ $W = \left( \frac{1500}{r_a} \right) \quad (2-16)$ $r_a = \left( \frac{208}{U} \right) \quad (2-17)$
Hargreaves y Samani (1985)	Permite el cálculo de la evapotranspiración potencial utilizando la temperatura y radiación solar. Este método es recomendable cuando la información meteorológica es limitada.	$ETP = 0,0023 (T_{media} + 17,78)(T_{max} - T_{min})^{0,5} R_a \quad (2-18)$
Oudin (2005)	Oudin propuso un método para calcular la evapotranspiración potencial para su uso en un modelo de lluvia-esorrentía, para esto, estudió cuáles variables atmosféricas eran las más relevantes para calcular la evapotranspiración en 27 modelos simulados en 308 cuencas de Francia, Australia y Estados Unidos.	$ETP = \frac{R_e}{\lambda \rho} \frac{T_a + 5}{100} \text{ si } T_a + 5 > 0 \quad (2-19)$ $ETP = 0 \text{ De lo contrario} \quad (2-20)$

*Nota.* Donde, ETP: Evapotranspiración potencial [mm día<sup>-1</sup>], D: Números de días en el mes, L: Factor de corrección, que se ajusta a la longitud del mes, T<sub>m</sub> Temperatura media mensual [°C], R<sub>s</sub>: Radiación solar media diaria [cal cm<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>], T<sub>a</sub>: Temperatura media diaria [°C], RH: Humedad relativa [%], Δ: Pendiente de la curva de presión vapor [kPa °C<sup>-1</sup>], R<sub>n</sub>: Radiación neta [MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>], γ: Constante psicrométrica [kPa °C<sup>-1</sup>], ρ: Densidad del agua (=1000 [kg L<sup>-1</sup>]), e<sub>a</sub>: Presión de vapor actual [Pa], e<sub>d</sub>: Presión de vapor de saturación [Pa], r<sub>s</sub>: Resistencia al flujo de vapor de agua en la superficie [s/m], r<sub>a</sub>: Resistencia aerodinámica del aire [s/m], U: Velocidad del viento medida a 2 m de altura [m s<sup>-1</sup>], T<sub>media</sub>: Temperatura media diaria [°C], T<sub>máxima</sub>: Temperatura máxima diaria [°C], T<sub>mínima</sub>: Temperatura mínima diaria [°C], R<sub>a</sub>: Radiación solar [MJ/m<sup>2</sup>/día] y R<sub>e</sub>: Radiación evaporable [MJ/m<sup>2</sup>/día].

### 2.3 Estudios previos de cambio climático en la Isla Rapa Nui

En el año 2014, se estudiaron los impactos del cambio climático sobre el borde costero de la isla. Se dedujo que el cambio climático provocará un aumento significativo en el nivel del mar para el año 2100, lo que provocaría inundaciones en sectores con importancia para el turismo y las infraestructuras portuarias, lo que tendría un gran impacto en la economía de la isla (Quilliam y otros, 2014).

El informe *World Heritage and Tourism in a Changing Climate* (2016) ofrece una visión general de la creciente vulnerabilidad de los sitios del Patrimonio Mundial a los impactos del cambio climático y las posibles implicaciones para el turismo global. En ese informe, se menciona que las proyecciones indican que los principales efectos del cambio climático en la isla serán la escasez de agua debido a la reducción de las precipitaciones de verano, el aumento en el nivel del mar, inundaciones costeras y erosión. Esto último, afectaría directamente a los *ahu* (plataformas ceremoniales donde se ubican los *moai*) y a los *moai* (grandes estatuas de piedra) que se encuentran en su mayoría en las zonas costeras de la isla (Figura 2-5).



*Figura 2-5: Ahu Tongariki, centro ceremonial más grande de Rapa Nui, ubicado en la zona costera noreste.*

Otro estudio en la isla es el de aplicación de la metodología de actualización del Balance Hídrico Nacional. Este estudio utiliza las forzantes proporcionadas por los modelos de cambio climático para evaluar los cambios en los montos de precipitación, evapotranspiración y escorrentía. Este análisis se basa en el escenario RCP 8,5 con los modelos CSIRO-MK3-6-0, CCSM4, MIROC-ESM e IPSL-CM5A-LR. Las variables de precipitación y temperatura fueron escaladas a las coordenadas de la estación Mataverí mediante la técnica QDM. El estudio concluye que las variaciones promedio más significativas se producen en los montos medios anuales de evapotranspiración, escorrentía y recarga. Los casos extremos corresponden a los modelos CSIRO-MK3-6-0 y MIROC-ESM, que presentan variaciones de precipitación en torno a  $\pm 15\%$  respectivamente, respecto al periodo histórico. También se observa que, respecto al periodo histórico, la escorrentía media anual disminuye en promedio un 8%, mientras que, la evapotranspiración media anual se incrementa en un 12%. A partir de la disminución de la escorrentía y recarga, se puede deducir que la disponibilidad hídrica de Rapa Nui se verá reducida en un contexto de cambio climático (DGA, 2019).

Gatica y Toro (2020) presentaron en el XXIV Congreso de la Sociedad Chile de Ingeniería Hidráulica (SOCHID) una investigación sobre la proyección de la frecuencia de eventos de sequía en Rapa Nui bajo los escenarios de cambio climático RCP 4,5 y 8,5, en donde utilizaron el método QDM para escalar y corregir el sesgo de las variables. A partir de las proyecciones climáticas de ese estudio, se concluye que para el futuro lejano (2061-2100) la precipitación media anual de la isla descenderá entre un 5,4 y 15,5%, mientras que la temperatura media anual aumentará entre 1,0 y 1,8°C (Tabla 2-9). Además, para un

periodo móvil de 48 meses y RCP 8,5, las sequías extremas de rara ocurrencia en el pasado (1/30) pasarían a ser relativamente frecuentes (1/4) en el futuro cercano (2021-2060) y ser la condición más frecuente ( $>1/2$ ) en el futuro lejano (2061-2100). La investigación sugiere que se debe considerar el efecto conjunto de la precipitación y temperatura sobre el análisis de sequías, ya que el índice SPI (que solo considera precipitación) proyecta cambios menores en comparación con el SPEI (que considera tanto precipitación como temperatura), por lo que no considerar el aumento de temperaturas en la evaluación puede llevar a subestimar el impacto del cambio climático sobre la severidad de las sequías.

Tabla 2-9: Resultados de Downscaling de Precipitación y Temperatura, RCP 4,5 y 8,5. Fuente: (Gatica & Toro, 2020).

Rapa Nui	RCP 4,5				RCP 8,5			
	Precipitación		Temperatura		Precipitación		Temperatura	
	Media (mm)	$\Delta$ (%)	Media (°C)	$\Delta$ (°C)	Media (mm)	$\Delta$ (%)	Media (°C)	$\Delta$ (°C)
<b>1970-2018</b>	1.167	-	20,6	-	1.167	-	20,6	-
<b>F. Cercano</b>	1.133	-2,9%	21,2	+0,6	1.110	-5,0%	21,4	+0,8
<b>F. Lejano</b>	1.104	-5,4%	21,6	+1,0	987	-15,5%	22,4	+1,8

Otro estudio (Toro y otros, 2023) se enfoca en la proyección de precipitaciones máximas o extremas para Rapa Nui bajo los escenarios SSP 2-4,5 y 5-8,5, analizando, en particular, el potencial efecto del cambio climático sobre la precipitación y la Precipitación Máxima Probable (PMP) para periodos de 24 y 72 horas, utilizando 31 GCMs. Las series de precipitaciones máximas de los GCMs fueron corregidas con el método *Unbiased Quantile Mapping* (UQM).

Para el periodo de 72 horas, los GCMs proyectan incrementos que son ligeramente más severos que los estimados para un periodo de 24 horas. Esto indica que, a medida que aumenta la duración, el efecto del cambio climático sobre el posible aumento en la magnitud de los eventos extremos de precipitación en la isla también crece. Sin embargo, estos resultados presentan un alto nivel de incertidumbre.

### 3 CARACTERIZACIÓN ZONA DE ESTUDIO

#### 3.1 Antecedentes generales

La zona de estudio corresponde a la isla Rapa Nui, que forma parte del territorio chileno desde 1888. Administrativamente, la provincia y comuna de Isla de Pascua pertenece a la Región de Valparaíso y está ubicada en el Océano Pacífico Sur, a una distancia de 3.700 km de la costa de Chile. La isla tiene forma triangular, ya que se formó por la erupción de tres volcanes que se encuentran actualmente inactivos, ubicados en cada vértice: el Puakatiki en el sector de Poike, Rano Kau, y Maunga Terevaka. La isla (Figura 3-1) posee un área de 164 km<sup>2</sup>, y su elevación máxima es de 505 m en el sector norte donde se ubica el volcán Maunga Terevaka.

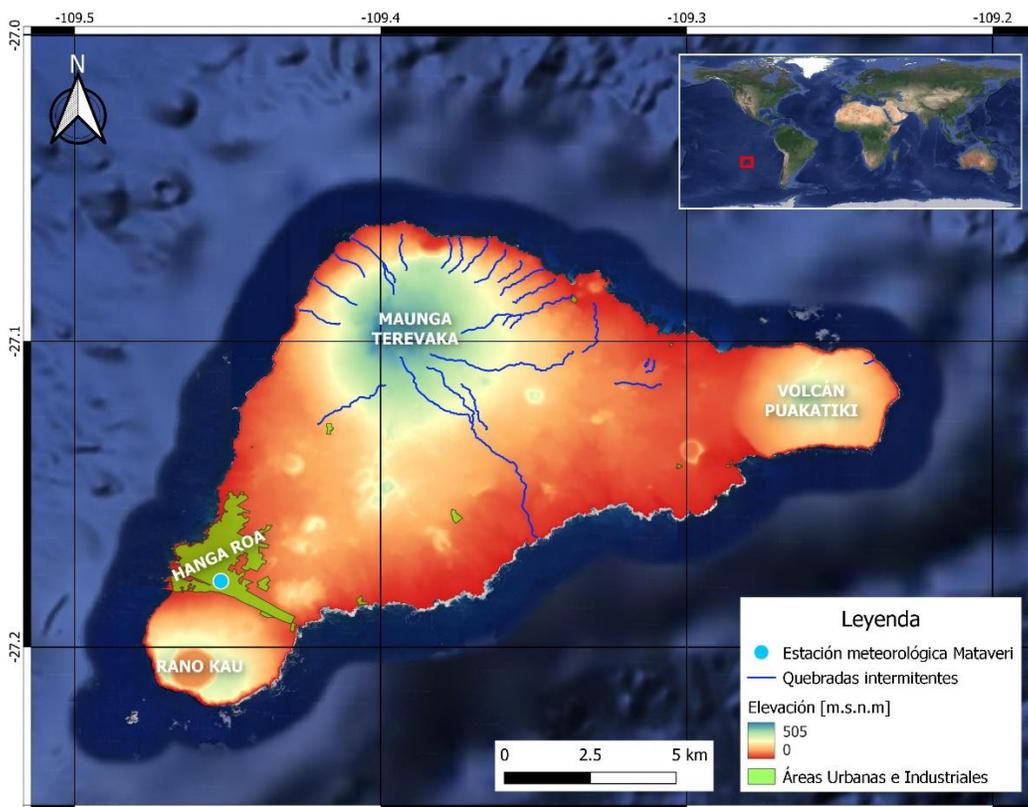


Figura 3-1: Mapa de la zona de estudio.

Según el Censo de Población y Vivienda del año 2017, la comuna de Isla de Pascua tenía una población de 7.750 habitantes. Las proyecciones del Instituto Nacional de Estadísticas (INE) indicaban un incremento del 12,8% para el año 2023, lo que daría un total de 8.743 habitantes. En el año 2017, en la zona urbana había 7.322 habitantes, lo que revela que la mayoría de la población se concentra en Hanga Roa, la única ciudad de la isla, ubicada en el sector sudoeste.

Es importante destacar que la mayor parte del territorio de la isla (43%) pertenece al Parque Nacional Rapa Nui (PNRN), el cual en el año 1995 fue declarado Patrimonio Mundial de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) en la categoría Bien Cultural. El parque fue coadministrado por la Corporación Nacional Forestal (CONAF) y la comunidad indígena Ma'u Henua, esta última, constituida por miembros del pueblo Rapa Nui. En marzo de 2018 el Estado de Chile hizo entrega de la administración total del Parque al pueblo Rapa Nui, el que se comprometió a ejecutar, administrar, preservar, conservar y proteger permanentemente su biodiversidad y recursos naturales, paisajísticos, culturales y patrimoniales (Comunidad indígena Ma'u Henua, 2024).

La isla atrae a una gran cantidad de turistas chilenos y extranjeros a lo largo de todo el año, en el 2017 un total 60.856 turistas visitaron el Parque Nacional Rapa Nui (Subsecretaría de Turismo, 2024). Esto ocasiona que la isla aumente su población flotante, por esta razón, en el año 2018 se promulgó la Ley 21.070 la cual establece que toda persona, chilena o extranjera, que ingrese a Isla de Pascua, podrá permanecer en el territorio especial por un período máximo de treinta días, esto con el fin de controlar la capacidad de carga demográfica de Rapa Nui considerando criterios de desarrollo sostenible. Para esto, se está desarrollando un Plan de Gestión de Capacidad de Carga Demográfica (PGCD).

### **3.2 Caracterización geológica y geomorfológica**

La isla es solo la punta de una gran montaña volcánica que se eleva 3.000 [m] sobre el lecho oceánico (Rull del Castillo, 2016), el que se encuentra en un *hotspot* (punto caliente) de la corteza terrestre entre las placas tectónicas de Nazca y del Pacífico. Dado que entre estas placas hay un límite divergente o constructivo se produce nueva corteza terrestre ya que surge magma que forma dorsales oceánicas o montañas submarinas. El suelo que la conforma es de origen volcánico, derivado ya sea de cenizas o lavas descompuestas, delgados o muy delgados y con frecuentes afloramientos de lava. La mayoría de ellos están cubiertos de piedras volcánicas y fragmentos de lava, existiendo sectores donde estos materiales se encuentran en gran densidad (80 y 95%) (CONAF, 1997).

El volcán Terevaka es un volcán de tipo escudo cuya construcción habría comenzado hace aproximadamente 1 millón de años. Es el punto más alto de la isla, con una elevación de 505 [m.s.n.m], según el Modelo de Elevación Digital (DEM) publicado en el 2021 por el Centro de información de Recursos Naturales (CIREN). En la Figura 3-2 se muestra la curva hipsométrica de la isla, donde se destaca que el 50% del área insular presenta una elevación superior a 420 [m.s.n.m]. La costa sur de la isla está formada por pequeñas bahías, mientras que en el sector norte se observan acantilados de menor altura (alrededor de 100 [m.s.n.m]). En cambio, los sectores de Poike y Rano Kau presentan grandes acantilados, formados por la abrasión marina, con elevaciones entre 100 y 300 [m.s.n.m] (CONAF, 2017).

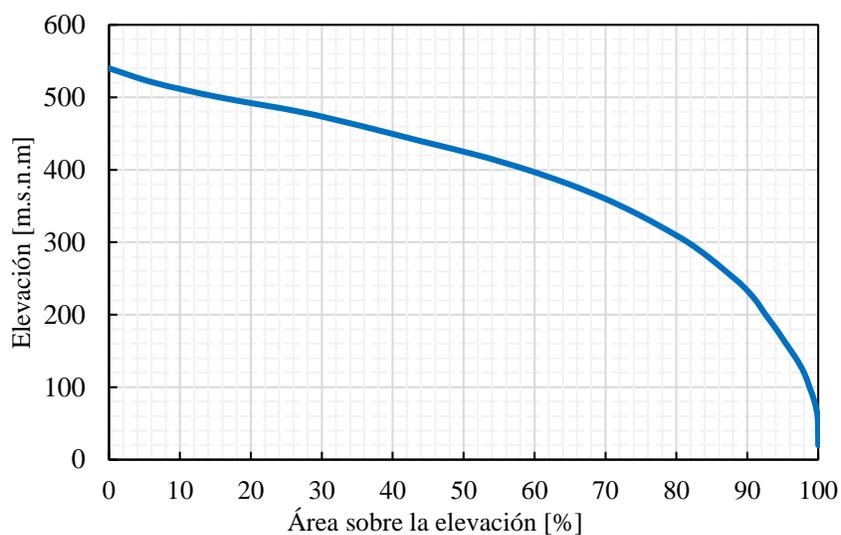


Figura 3-2: Curva hipsométrica isla Rapa Nui.

La Figura 3-3, muestra que la pendiente de los suelos de la isla varía entre 1% y 3%, con sectores de 4% a 15%. Los conos volcánicos presentan pendientes de 5% a 20% y en algunos casos superan el 40% (CONAF, 2017).

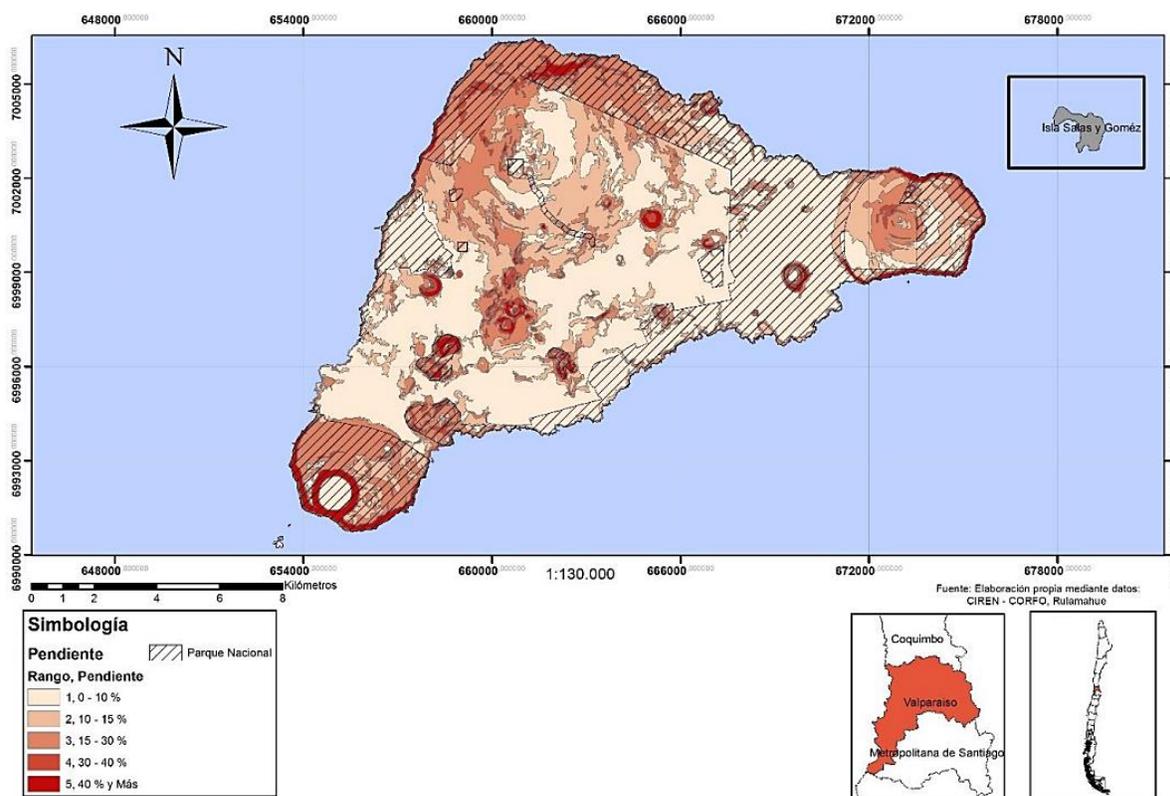


Figura 3-3: Pendiente isla Rapa Nui. Fuente: (CONAF, 2017).

La Figura 3-4 muestra los distintos tipos de cobertura de suelo en la isla obtenidos desde el levantamiento cartográfico de uso del suelo y vegetación a escala 1:50.000 actualización año 2019 de CONAF. Se observa en la Tabla 3-1: que predomina las praderas y matorrales (~76,7%), terrenos agrícolas (~11,1%), bosques (~6,6%), áreas urbanas e industriales (~3,5%), áreas desprovistas de vegetación (~1,4%), humedales (~0,6%) y cuerpos de agua (~0,02%).

Tabla 3-1: Uso de suelo en la Isla. Fuente: (CONAF, 2019)

Uso de suelo	Superficie	Uso [%]
Áreas Urbanas e Industriales	6 km <sup>2</sup>	3,5
Terrenos Agrícolas	18 km <sup>2</sup>	11,1
Praderas y Matorrales	126 km <sup>2</sup>	76,7
Bosques	11 km <sup>2</sup>	6,6
Humedales	1 km <sup>2</sup>	0,6
Áreas sin Vegetación	2 km <sup>2</sup>	1,4
Cuerpos de Agua	0,04 km <sup>2</sup>	0,02

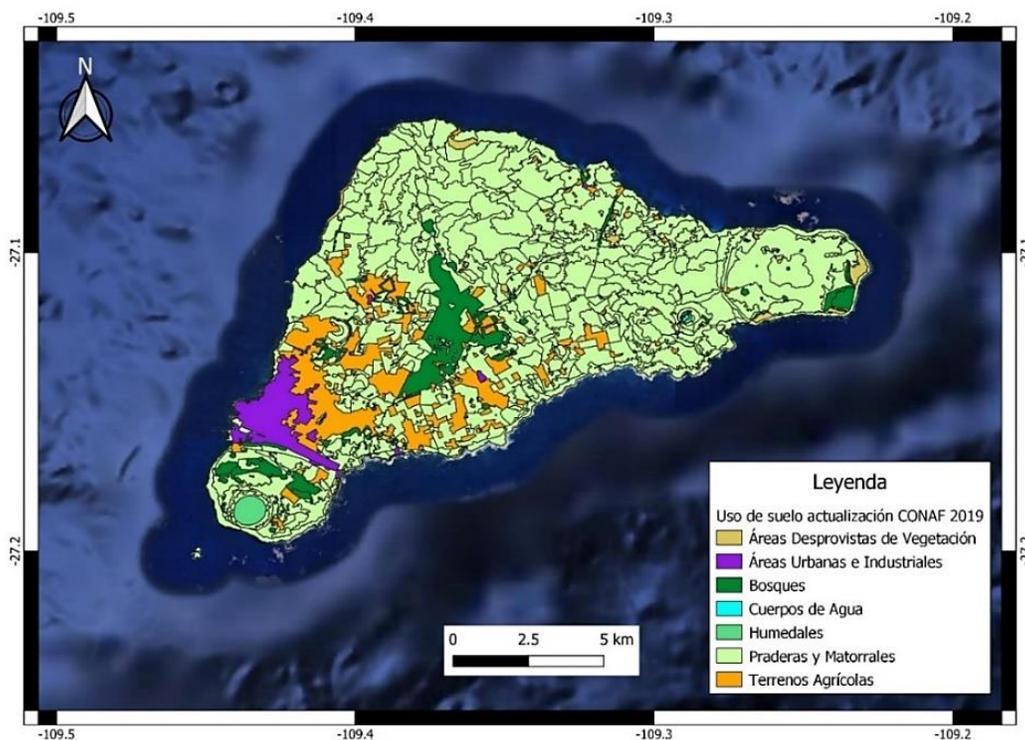


Figura 3-4: Cobertura y uso de suelo. Fuente: (CONAF, 2019)

La isla posee 3 humedales: Rano Kau, Rano Raraku y Ava Ranga Uka. Estos humedales depuran el agua y ayudan a alimentar la napa subterránea que entrega agua potable a la isla, además, son reservorios de diversidad biológica, ya que son el hábitat de especies medicinales, helechos endémicos y plantas nativas, por lo tanto, los humedales son parte importante del patrimonio histórico y cultural de la isla (CONAF, 2022). En el Anexo A se describe cada humedal con más detalle.

### 3.3 Clima y meteorología

La estación meteorológica Mataveri Isla de Pascua Ap. [DMC: 270001] (Figura 3-5) está a cargo de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) y es la que posee el mayor registro de datos históricos. Dicha estación se encuentra ubicada dentro del recinto del Aeropuerto Mataveri, aproximadamente a 1 km del volcán Rano Kau, específicamente en las coordenadas:  $-27,15889^{\circ}$ ,  $-109,43250^{\circ}$  a 69 m de altura. Esta estación posee registros de precipitación (agua caída, acumulada en 6 horas), humedad relativa, entre otros desde el año 1954 y datos como la temperatura desde el año 1961. En el año 2010 se actualizó la estación a una automática, la cual cumple funciones sinópticas y climatológicas.



*Figura 3-5: Estación meteorológica Mataveri.*

El clima de Isla de Pascua es de tipo tropical lluvioso, de acuerdo con los datos de esta estación y al estudio de Gatica y Toro (2020), en el periodo 1970-2019 la isla presenta una precipitación media anual de 1.150 mm y una temperatura media anual de 20,6 °C. Se observa en la Tabla 3-2 y en el Climograma de la Figura 3-6, que las temperaturas medias mínimas se presentan entre junio y septiembre, mientras que las temperaturas medias máximas ocurren entre enero y marzo. Por otro lado, los mayores montos de precipitación se dan entre los meses de abril y mayo, mientras que los menores se producen en el mes de noviembre, con una media de 67,4 [mm].

Tabla 3-2: Precipitación y temperatura, media mensual y anual.

Media	En	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Precipitación [mm]	75,7	76,3	92,0	128,1	130,4	106,4	107,0	97,8	91,8	80,4	67,4	77,2	1130,3
Temperatura media [°C]	23,3	23,7	23,2	21,9	20,2	18,9	18,1	18,0	18,3	19,1	20,5	21,9	20,6

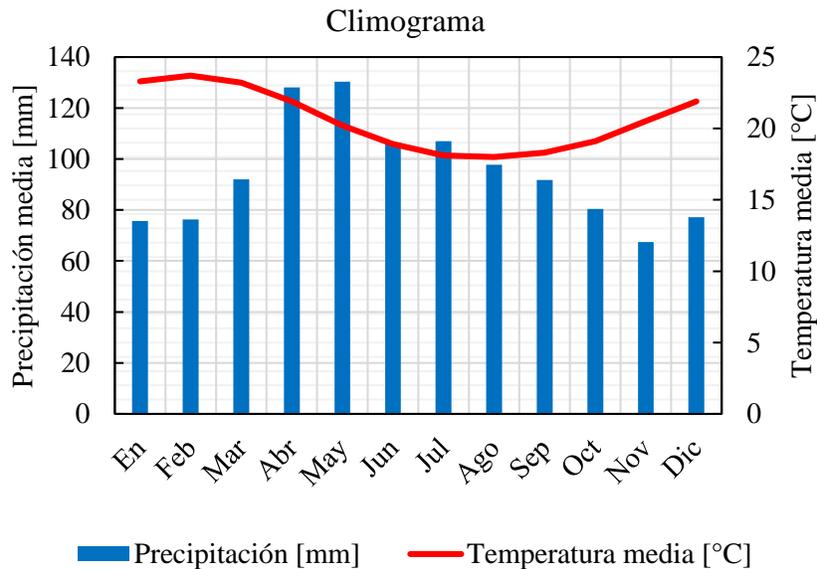
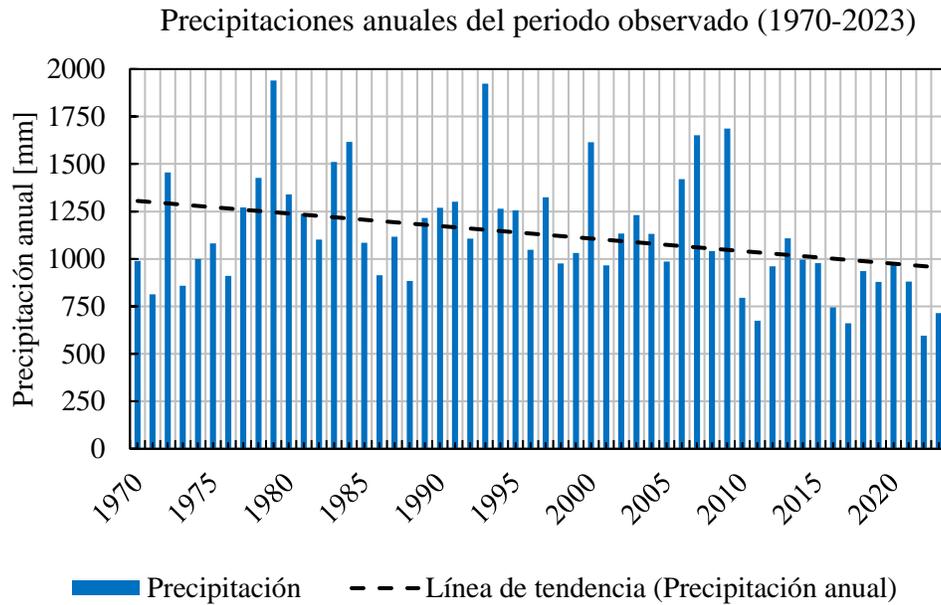


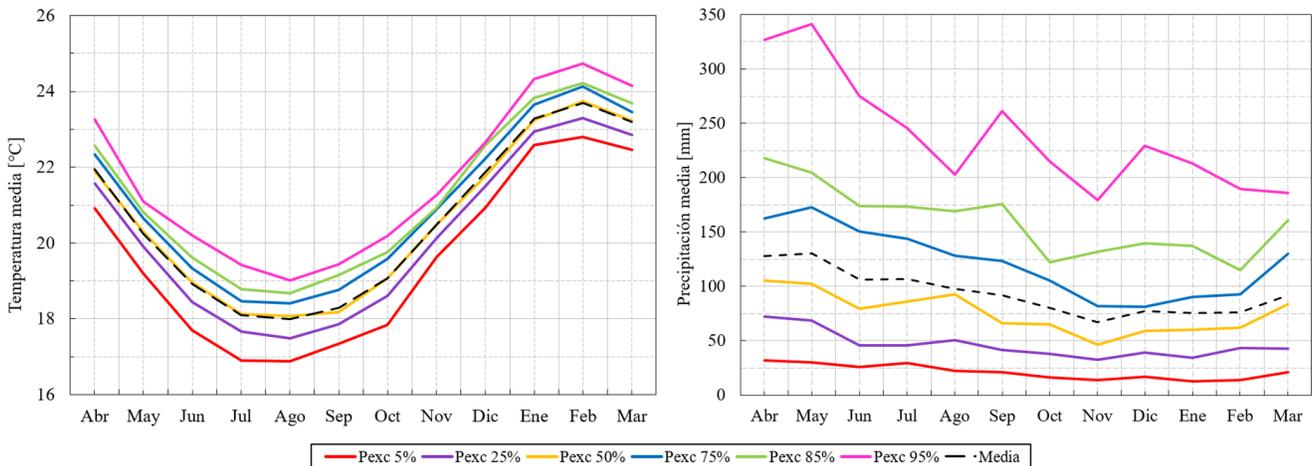
Figura 3-6: Climograma estación Mataveri período 1970-2023.

En la Figura 3-7, se presentan las precipitaciones anuales desde el año 1970 al 2023. El año con mayor precipitación es 1979 con 1940 [mm], mientras que el año que registró la menor cantidad de precipitación es el 2022 con 597 [mm]. La línea negra muestra la tendencia hacia la reducción de los montos anuales de precipitación a lo largo del tiempo.



*Figura 3-7: Precipitaciones anuales, estación Mataveri período 1970-2023.*

La Figura 3-8 presenta patrones de variabilidad estacional para la temperatura media y la precipitación en el periodo observado (1970-2023). La temperatura media muestra una variación estacional que muestra valores más cálidos entre los meses de enero a abril, mientras que los valores mínimos se registran entre los meses de julio y septiembre. La precipitación muestra que los mayores montos ocurren en los meses de abril y mayo, los eventos extremos de precipitación (Pexc95%) tienen una alta variabilidad, mientras que los percentiles bajos se mantienen relativamente constantes durante el año.



*Figura 3-8: Curvas de variación estacional para temperatura media y precipitación, en el periodo observado (1970-2023).*

### 3.4 Actividades productivas y derechos de agua

Los principales sectores económicos de la isla son el turismo, junto con la pesca y acuicultura. La principal actividad productiva de la isla es la pesca, principalmente de salmón, y la extracción de moluscos (MINAGRI, INE, ODEPA, 2022). Aunque en la actualidad la agricultura y la ganadería se practican a pequeña escala, estas actividades siguen siendo relevantes para el consumo y la economía local. Es importante destacar que la ganadería fue el gran motor de la economía insular desde fines del siglo XIX hasta la década 1960 (Foerster, 2021). A partir de entonces, ese motor comenzó a ser reemplazado por la industria del turismo, que se basa en la arqueología, la antropología, y el atractivo paisajístico de la isla (MINAGRI, INE, ODEPA, 2022).

La principal fuente de agua dulce en la isla Rapa Nui es un sistema acuífero subterráneo, cuya recarga anual promedio varía entre 3.200 y 4.700 litros por segundo [L/s] (DGA, Montgomery & Associates Consultores Ltda., 2011), siendo su principal fuente de recarga la infiltración del agua lluvia.

Debido a las características altamente permeables del suelo de origen volcánico, solo existe escurrimiento superficial de forma intermitente, pues se producen grandes volúmenes de recarga de agua subterránea por infiltración de agua lluvia, es decir, no presenta ríos en su superficie (DGA, Montgomery & Associates Consultores Ltda., 2011). Sin embargo, en ciertas quebradas se presentan escorrentías de forma no permanente que se activan ante fuertes precipitaciones. Además, se almacena agua en los humedales de la isla, sin embargo, actualmente, solo en el cráter del volcán Rano Kau se almacena agua dulce (Figura 3-9).



*Figura 3-9: Espejo de agua dentro del cráter del volcán Rano Kau.*

En el año 1964, la Corporación de Fomento de la Producción (CORFO) inició la perforación de pozos captadores de aguas subterráneas para suplir las necesidades de agua de la población y de la actividad

pecuaria. Actualmente, la Sociedad Agrícola y Servicios Isla de Pascua SpA (SASIPA) provee de agua potable y electricidad a la isla, como se observa en la (Figura 3-10) existen 30 pozos en total, SASIPA cuenta con 10 pozos a cargo (Pozos N°7, 21, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29 y 31) de los cuales 6 son de extracción, dichos pozos están ubicados en distintos puntos de Hanga Roa.

Durante 2023, la empresa SASIPA produjo un total de 1.717 mil m<sup>3</sup> de agua potable, con un promedio mensual de 143 mil (SASIPA SpA., 2023), lo que equivale aproximadamente a 54,45 [L/s]. De este total, 856 mil m<sup>3</sup> fueron vendidos a 3.487 clientes, mientras que el resto se destinó a ventas internas para otros servicios de SASIPA y a pérdidas de volumen, las cuales sumaron a 861 mil m<sup>3</sup> o 27, 3 [L/s]. Este volumen se reincorpora al acuífero.

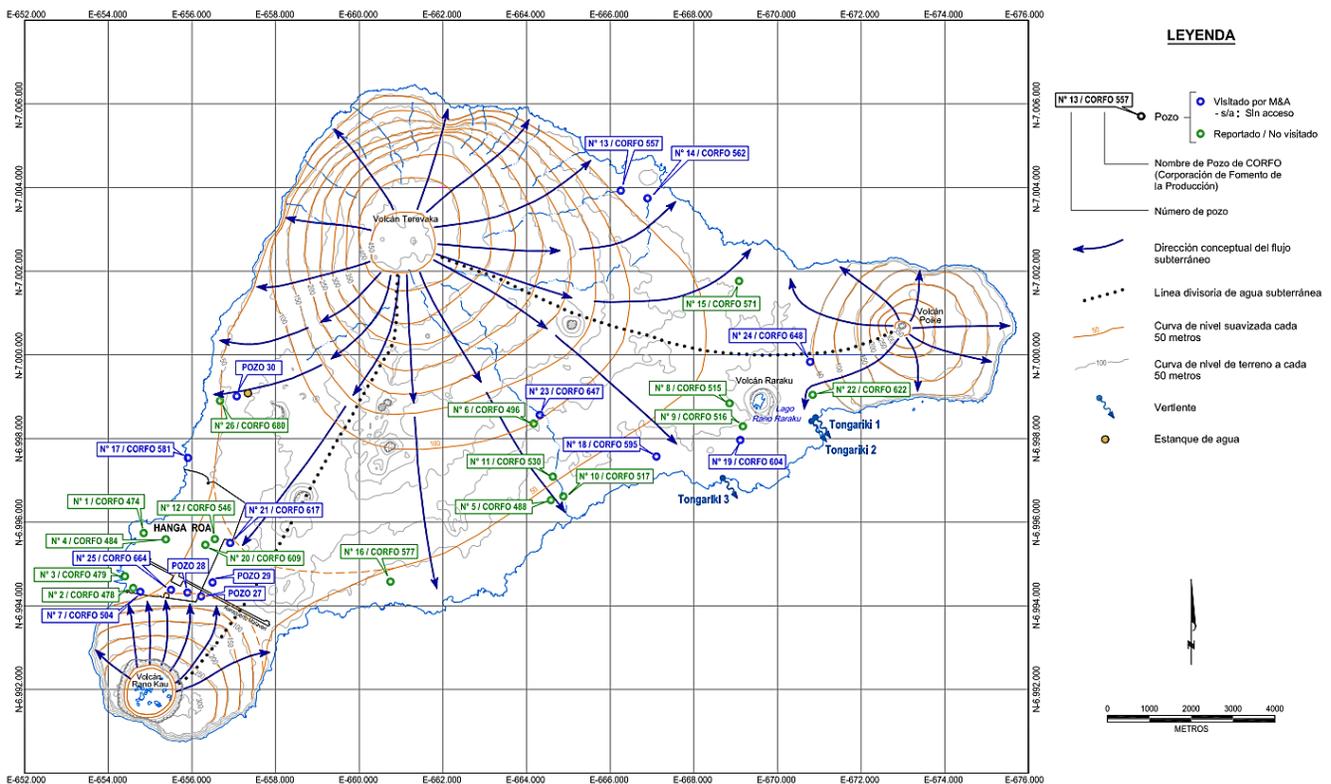


Figura 3-10: Ubicación de pozos y mapa de dirección del movimiento conceptual de agua subterránea. Fuente: (DGA, Montgomery & Associates Consultores Ltda., 2011).

De acuerdo con el registro de derechos de aprovechamiento de agua de la DGA, se tiene en la Tabla 3-3: el listado de derechos concedidos a la comuna de Isla de Pascua en la Región de Valparaíso, que da un total de caudal anual promedio de 13,4 [L/s]. Todos estos derechos son de tipo consuntivo y ejercicio del derecho permanente y continuo. Solo para los derechos otorgados al señor Alfonso Rapu Haoa, se declara el uso del agua, en este caso se utiliza para la Bebida/Usó Doméstico/Saneamiento.

Tabla 3-3: Derechos de agua concedidos para la comuna de Isla de Pascua. Fuente: (DGA, 2024).

<b>Nombre solicitante</b>	<b>Caudal Anual Promedio [L/s]</b>	<b>UTM Norte Captación</b>	<b>UTM Este Captación</b>
Alfonso Rapu Haoa	2	6994579	660742
Agrícola y servicios Isla de Pascua LTDA.	2	6994582	655097
Agrícola y servicios Isla de Pascua LTDA.	2	6995748	657250
Agrícola y servicios Isla de Pascua LTDA.	3,5	6994619	655834
Agrícola y servicios Isla de Pascua LTDA.	0,4	6999249	657413
Agrícola y servicios Isla de Pascua LTDA.	3,5	6999469	656560
<b>Total</b>	<b>13,4</b>		

## 4 METODOLOGÍA Y DATOS

En este capítulo, se detalla la metodología utilizada para la obtención de las variables meteorológicas durante el periodo observado en la estación meteorológica Mataveri, así como para el periodo histórico y futuro de los GCM bajo el escenario RCP 8,5. También se describe el procedimiento para calcular la evapotranspiración potencial utilizando tres métodos diferentes: Thornthwaite, Hargreaves y Oudin. Finalmente, se presenta el detalle del cálculo de diferentes índices de sequía. La Figura 4-1 muestra un diagrama de la metodología que se propone para reducir la incertidumbre en las proyecciones de índices de sequía.

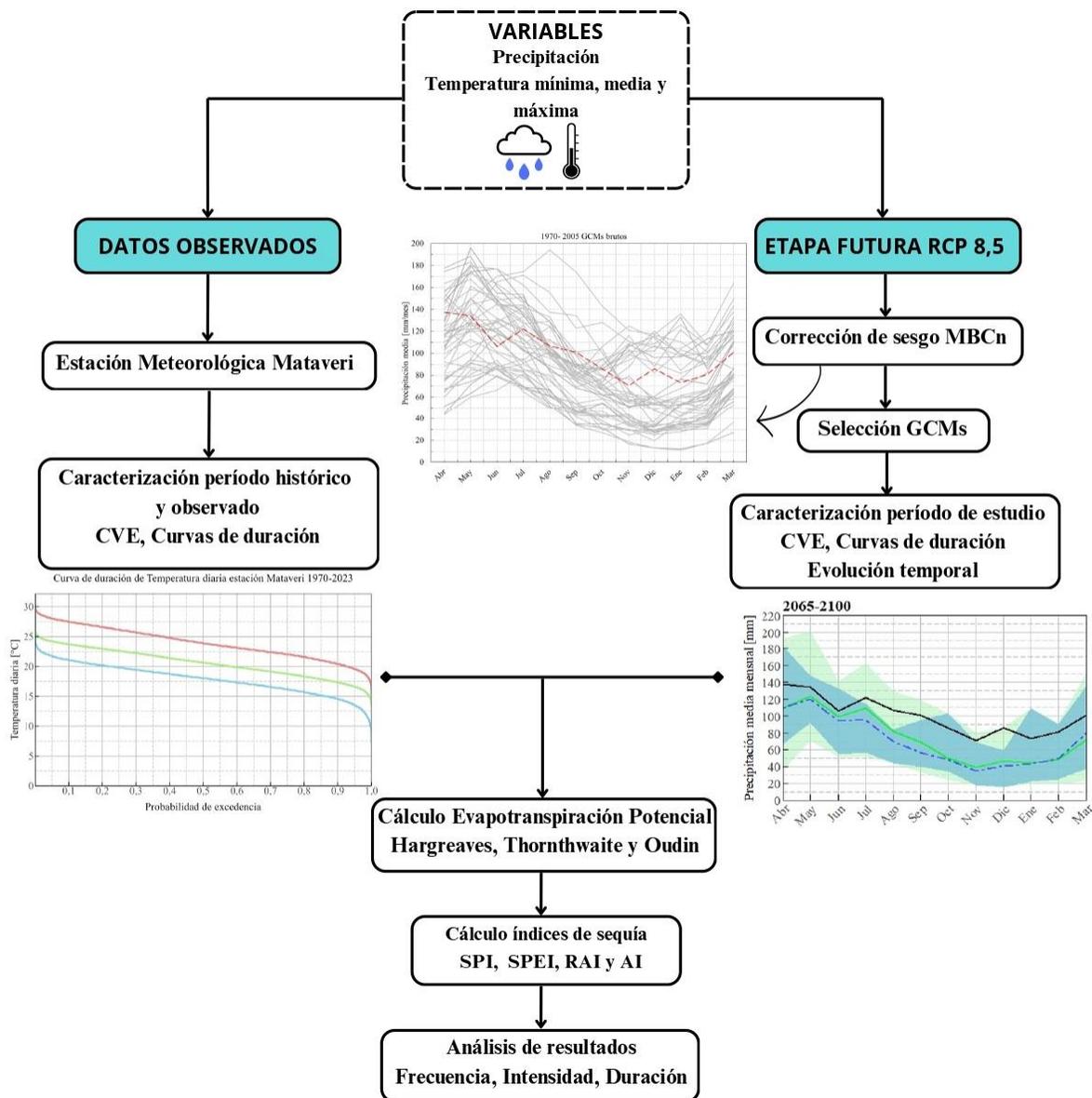


Figura 4-1: Diagrama de la metodología.

## 4.1 Variables meteorológicas

### 4.1.1 Datos observados

Los datos de la estación meteorológica Mataveri se obtienen desde la Dirección Meteorológica de Chile (DGAC, 2024), se obtiene la información registrada por la estación Mataveri ingresando su código [DMC: 270001].

Para el presente estudio, se descargó la información histórica de la estación a escala diaria para las variables precipitación, temperatura máxima, temperatura media y temperatura mínima dentro del periodo observado 1970-2023.

### 4.1.2 Datos climáticos simulados por GCM

Para incorporar al estudio el cambio climático, se considera la base de datos del servidor FTP (*File Transfer Protocol*) del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR). Se puede acceder a los datos llenando el formulario disponible en su sitio web (CR2, 2024). En este servidor se descarga la información de las simulaciones del proyecto CMIP5 a escala global para los experimentos en el periodo histórico que suelen ir desde el año 1850 hasta 2005. Además, se descarga los GCM para el escenario RCP 8,5 el cual generalmente incluye información de proyecciones futuras desde el 2006 al año 2100.

El escenario RCP 8,5 cuenta con 44 modelos y 46 variables, los que a su vez pueden poseer más de un ensamble o realización (Copernicus, 2023). La Tabla 4-1 describe las variables descargadas para el escenario en estudio.

Tabla 4-1: Variables utilizadas para la descarga de los GCM. Fuente: (Copernicus, 2021).

Variable	Nombre	Unidad	Descripción
2m temperatura	Tas	K	Temperatura del aire cerca de la superficie.
2m temperatura mínima en las últimas 24 horas	Tasmin	K	Temperatura mínima diaria del aire cerca de la superficie.
2m temperatura máxima en las últimas 24 horas	Tasmax	K	Temperatura máxima diaria del aire cerca de la superficie.
Flujo medio de precipitación	Pr	kg m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>	Cantidad de agua por unidad de área y tiempo.

*Nota.* Para trabajar con las temperaturas, se realizó su conversión a grados Celsius [°C] ( $K - 273,15 = °C$ ). Además, se transformó el flujo de precipitación a milímetros por día [mm/día] ( $1 \text{ kg/m}^2/\text{s} = 86400 \text{ mm/día}$ ).

La Tabla 4-2 muestra una descripción de los datos descargados. Para el estudio, se considera Futuro Cercano al periodo comprendido entre 2029 y 2064 y Futuro Lejano al comprendido entre 2065 y 2100.

Tabla 4-2: Descripción de los datos descargados para CMIP5. Fuente: (Copernicus, 2021).

Tipo de datos	Grilla
Proyección	Grilla regular latitud-longitud
Cobertura horizontal	Global
Resolución horizontal	Desde 0,125° x 0,125° a 5° x 5° dependiendo del experimento
Cobertura vertical	Las variables se proporcionan en un solo nivel, que puede diferir entre variables
Cobertura temporal	Desde 1850 a 2300 (depende del experimento)
Resolución temporal	Día
Formato de archivo	NetCDF (.nc)

## 4.2 Procesamiento de los datos

### 4.2.1 Datos observados

Los datos observados se dividen en dos periodos de 35 años: 1970-2005 (etapa histórica) y 1988-2023, abarcando así el periodo completo 1970-2023. Se calculan las curvas de duración de precipitación y temperaturas a escala diaria. Posteriormente, se acumulan los datos diarios para obtener las series de datos mensuales de las variables analizadas. A partir de estas series, se obtienen las curvas de variación estacional tanto para la precipitación como para la temperatura. Además, se calcula probabilidad acumulada de los datos diarios utilizando la fórmula de Weibull (4-1) para obtener la Curva de Duración.

$$p(x(i)) = \frac{i}{n + 1} \quad (4-1)$$

Donde  $n$  es la cantidad de datos, e  $i$  corresponde al dato  $i$ -ésimo.

### 4.2.2 Etapa futura

Se trabaja con archivos NetCDF descargados para el escenario RCP 8,5, extrayendo la información diaria de precipitación, temperatura media, temperatura máxima y temperatura mínima de la celda del GCM que contiene a la isla (como se muestra en la Figura 4-2). Este proceso se repite tanto para el periodo histórico como para el periodo futuro. Posteriormente, se filtra esta información para obtener los datos diarios en el periodo comprendido entre 1970 y 2100.

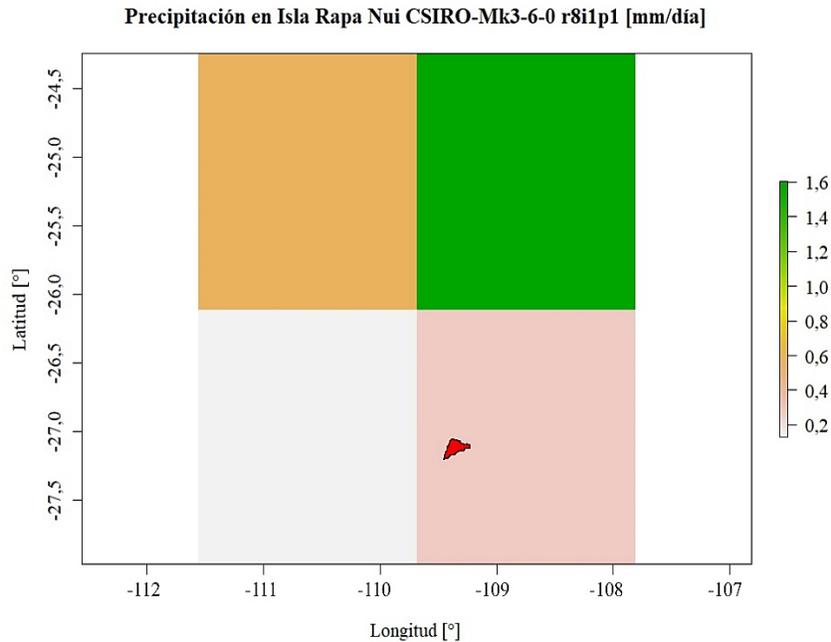


Figura 4-2: Resolución horizontal de GCMs respecto al tamaño de la isla Rapa Nui. Ejemplo asociado a GCM CSIRO-Mk3-6-0.

Después de resumir la información proporcionada por los GCM, se procede a corregir el sesgo de los datos utilizando el método MBCn. Esta corrección se basa en la información histórica de la estación Mataveri, abarcando el periodo histórico de 1970 a 2005. En primer lugar, se corrigen los datos de precipitación y temperatura media considerando el periodo futuro completo, que se extiende desde 2006 a 2100. Para asegurar que la cantidad de información de los GCM sea consistente y debido a que la mayoría de los GCM no consideran los años bisiestos, se eliminan estos años de todos los conjuntos de datos de los GCM. Posteriormente, se lleva a cabo una nueva corrección que incluye, además de la precipitación, las variables de temperatura máxima y mínima.

En segundo lugar, se lleva a cabo la corrección simultánea de las cuatro variables (tas, tasmax, tasmin y pr) pero considerando el periodo futuro en ventanas móviles de 35 años. Este proceso requiere una mayor capacidad computacional en comparación con el método anterior.<sup>1</sup>

En la Figura 4-3, se muestran los modelos GCM que fueron corregidos utilizando el método MBCn. En la Tabla B-1 del Anexo B, se incluye información más detallada sobre cada GCM. Solo se corrigieron estos modelos debido a problemas encontrados al procesar los demás, tales como falta de consistencia en el ensamble o realización entre el periodo histórico y futuro, espaciado desigual de las celdas, y una menor cantidad de datos diarios en comparación con otros GCM.

<sup>1</sup> Este enfoque es propuesto por Hernán Morales como parte de un trabajo en desarrollo para publicación.

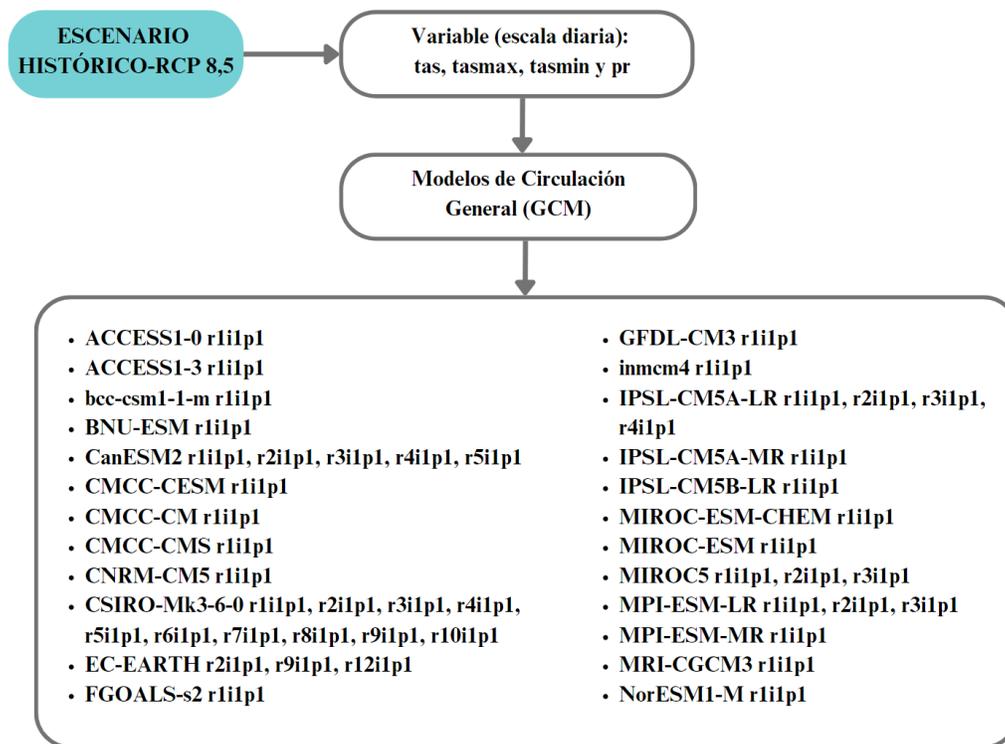


Figura 4-3: Esquema modelos GCM descargados.

### 4.2.3 Selección de GCMs

Para reducir la incertidumbre de los resultados, se seleccionan ciertos GCM para continuar con los cálculos. Para esto, se evalúa el desempeño de cada GCM en el periodo observado (1970-2023) construyendo una curva de variación estacional para todas las variables en dicho periodo, luego se compara estas curvas de los GCM con los datos registrados en la estación. Esto permite determinar si los GCM corregidos representan las variaciones estacionales de los datos observados. Mediante una inspección visual, se puede descartar aquellos GCM que se desvían significativamente de los valores esperados, se presta especial atención a la variable de precipitación, ya que la temperatura no presenta grandes variaciones. Luego, se aplica el siguiente criterio:

- Variabilidad estacional: Se utiliza los datos de la CVE de los GCM en el periodo observado para evaluar su comportamiento y capacidad de simular las condiciones meteorológicas observadas en la estación. Como la precipitación es la variable que más varía, se calcula la diferencia entre  $Pr_{error} = Pr_{GCM} - Pr_{OBS}$ . Los valores cercanos a 0 indican que el GCM reproduce de forma adecuada la variabilidad estacional, mientras que los valores positivos indican una sobreestimación y los negativos indican una subestimación. Aplicando este criterio, pero en escala porcentual  $\left(Pr_{error} = \frac{Pr_{GCM} - Pr_{OBS}}{Pr_{OBS}} \times 100\right)$  se descartan los modelos que presentan un error igual a  $\pm 10\%$  en más de 2 meses (ver Tabla B-2).

De esta forma, uniendo ambos criterios, se seleccionan los siguientes modelos:

- CanESM2 r2i1p1
- CMCC-CMS r1i1p1
- CSIRO-Mk3-6-0 r4i1p1, r5i1p1, r8i1p1 y r9i1p1
- IPSL-CM5A-LR r3i1p1
- IPSL-CM5B-LR r1i1p1
- MIROC5 r2i1p1
- NorESM1-M r1i1p1

### 4.3 Estimación de la evapotranspiración e Índices de sequía

Se estima la evapotranspiración potencial tanto para los datos registrados en la estación meteorológica Mataveri como para los GCM corregidos utilizando tres métodos distintos: Thornthwaite (Ecuación (2-11)), Hargreaves (Ecuación (2-18)) y Oudin (Ecuación (2-19)). Posteriormente, estos datos se utilizan en el balance hídrico necesario para calcular el índice SPEI.

Los índices SPI y SPEI se calculan utilizando el paquete SPEI, disponible en el lenguaje de código abierto y libre acceso R (Beguiría y otros, 2023). Para cada índice, se utiliza la función de distribución predeterminada: Gamma para SPI y Log-logistic para SPEI, tanto para los periodos histórico y observado como en los escenarios futuros. Los índices se calculan para las escalas 12, 24 y 48 meses, siguiendo el estudio de Gatica y Toro (2020), que justifica estas escalas dada la relativa homogeneidad estacional de la precipitación observada en Mataveri y la dependencia con el agua subterránea para el suministro de agua potable en la isla. Las mismas escalas se emplean para determinar el índice RAI, utilizando un código (García & L'Hermite, 2018).

Es importante mencionar que para el cálculo de estos índices se fijó un periodo de referencia en los GCMs desde el año 1970 al 2005 (periodo histórico), este periodo permite estimar parámetros o cuantiles necesarios para estimar la distribución teórica de la precipitación, lo que es útil para medir los cambios futuros de las variables climáticas y evaluar así el impacto del cambio climático y las sequías.

Una vez obtenidos los índices, se analizan los episodios de sequía. Para clasificar estos episodios, se emplean las tablas correspondientes: SPI y SPEI Tabla 2-5 y RAI Tabla 2-6. Los episodios de sequía comienzan cuando el índice cae por debajo del umbral establecido en la clasificación. Las características analizadas que se muestran en la Figura 4-4, son las siguientes:

- Duración: Periodo durante el cual el índice se encuentra por debajo del umbral seleccionado.
- Intensidad media: Promedio de valores del índice durante el tiempo en que está por debajo del umbral.

- Magnitud (o Área): Acumulación del déficit por debajo del umbral durante el periodo de sequía, calculada como el producto de la duración y la intensidad.
- Frecuencia porcentual: Proporción de veces que un episodio de sequía ocurre dentro de un periodo de tiempo determinado, expresada como un porcentaje del número total de eventos en el periodo de estudio.

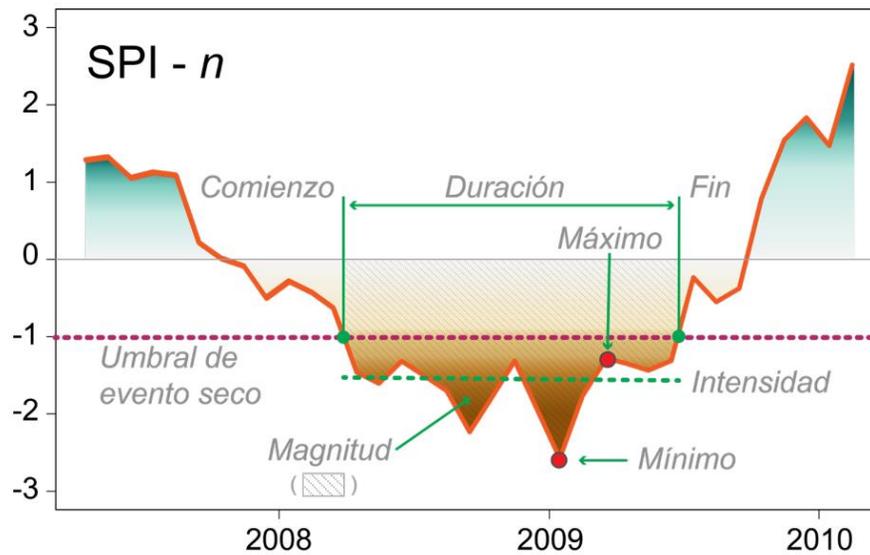


Figura 4-4: Esquema de un evento hipotético de sequía. En línea naranja se ilustra una serie de SPI. La línea punteada de color verde indica el umbral por debajo del cual se considera sequía. La magnitud del evento es el producto de la duración y la intensidad (área rayada entre el comienzo y el fin del evento). Fuente: (Podestá y otros, 2020).

Se calcula a escala mensual el Índice de Aridez de Martonne (AI). Luego de obtener los resultados, estos se clasifican mediante la

Tabla 2-7. Con los datos clasificados, se realiza un gráfico de frecuencia de cada clasificación en los periodos 1970-2005, 1988-2023 y los futuros cercano (2029-2064) y lejano (2065-2100).

## 5 RESULTADOS Y ANÁLISIS

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de las proyecciones climáticas en la isla Rapa Nui tras aplicar la corrección de sesgo MBCn a los modelos de circulación general (GCMs) bajo el escenario RCP 8,5. Además, se incluyen los resultados del cálculo de la evapotranspiración utilizando tres métodos diferentes, y finalmente, se muestran los resultados de los índices de sequía y del índice de Aridez de Martonne proyectados.

### 5.1 Proyecciones climáticas

La Tabla 5-1 presenta la media, desviación estándar y variación de las variables meteorológicas de precipitación y temperaturas para los GCMs brutos, sin corrección de sesgo ni selección de modelos. Se observa que, para la precipitación, los GCMs proyectan una disminución del 17,6 [%] y del 24,3 [%] en los futuros cercano y lejano, respectivamente. En el caso de la temperatura media, se proyecta un aumento de aproximadamente 2 [°C] para los periodos futuros. Para la temperatura mínima, los GCMs estiman un aumento de 4,1 [°C] en el futuro cercano y de 4,4 [°C] en el futuro lejano en comparación con las temperaturas observadas. En cuanto a la temperatura máxima, los GCMs proyectan valores inferiores a los observados, con una disminución de 2,6 [°C] en el futuro cercano y de 1,0 [°C] en el futuro lejano.

Tabla 5-1: Resultados GCMs brutos.

Rapa Nui	RCP 8,5 GCMs Brutos											
	Precipitación			Temperatura media			Temperatura mínima			Temperatura máxima		
	Media [mm]	Desv. Est [mm]	$\Delta$ [%]	Media [°C]	Desv. Est [°C]	$\Delta$ [°C]	Media [°C]	Desv. Est [°C]	$\Delta$ [°C]	Media [°C]	Desv. Est [°C]	$\Delta$ [°C]
Observaciones (1970-2023)	1.130	302,4	-	20,6	0,3	-	17,8	0,4	-	24,0	0,5	-
Histórico (1970-2005)	1.047	222,0	-	20,8	0,3	-	20,3	0,3	-	21,1	0,3	-
1988-2023	1.029	221,0	-	20,9	0,4	-	20,5	0,3	-	21,3	0,4	-
F. Cercano (2029-2064)	932	207,2	-17,6	21,6	0,3	+1,8	21,3	0,3	+4,1	21,4	1,6	-2,6
F. Lejano (2065-2100)	856	197,9	-24,3	22,6	0,3	+2,0	22,2	0,3	+4,4	22,9	0,3	-1,0

*Nota.* La celda de color celeste representa los valores medios anuales de las variables registradas en la estación meteorológica Mataverí.

A continuación, se exponen los resultados de la corrección de sesgo aplicada a las variables climáticas para los modelos de circulación general bajo el escenario RCP 8,5. La Figura 5-1 muestra cómo, en la curva de variación estacional de precipitación, los GCMs brutos, representados en color gris se ajustan al comportamiento de los datos observados en el periodo histórico (1970-2005) tras aplicar la corrección de sesgo MBCn.

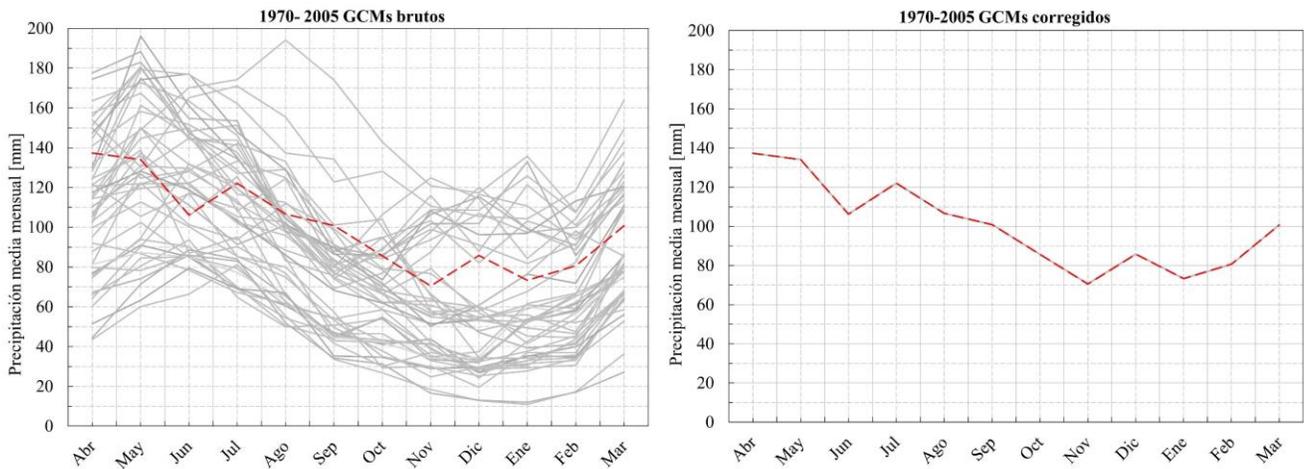


Figura 5-1: Curva de variación estacional de precipitación para el periodo histórico, a la izquierda con los GCMs brutos y a la derecha luego de la corrección de sesgo.

En la Figura 5-2, se presenta la diferencia en el número de días con precipitación según diferentes formas de aplicar el método MBCn. En el gráfico de la izquierda, se observa un aumento abrupto en la cantidad de días con precipitación a partir del año 2005, coincidiendo con el último año del periodo histórico considerado para la corrección. Esto no ocurre en el gráfico de la derecha, donde al aplicar el método de corrección utilizando el periodo futuro en ventanas móviles de 35 años, se mejora el comportamiento de la cantidad de días con precipitación. Ambos gráficos indican una tendencia a la disminución de los días con precipitación en el futuro, sin embargo, debido a su mejor comportamiento, se opta por utilizar la corrección de sesgo con el periodo futuro en ventanas móviles de 35 años para el resto de los resultados.

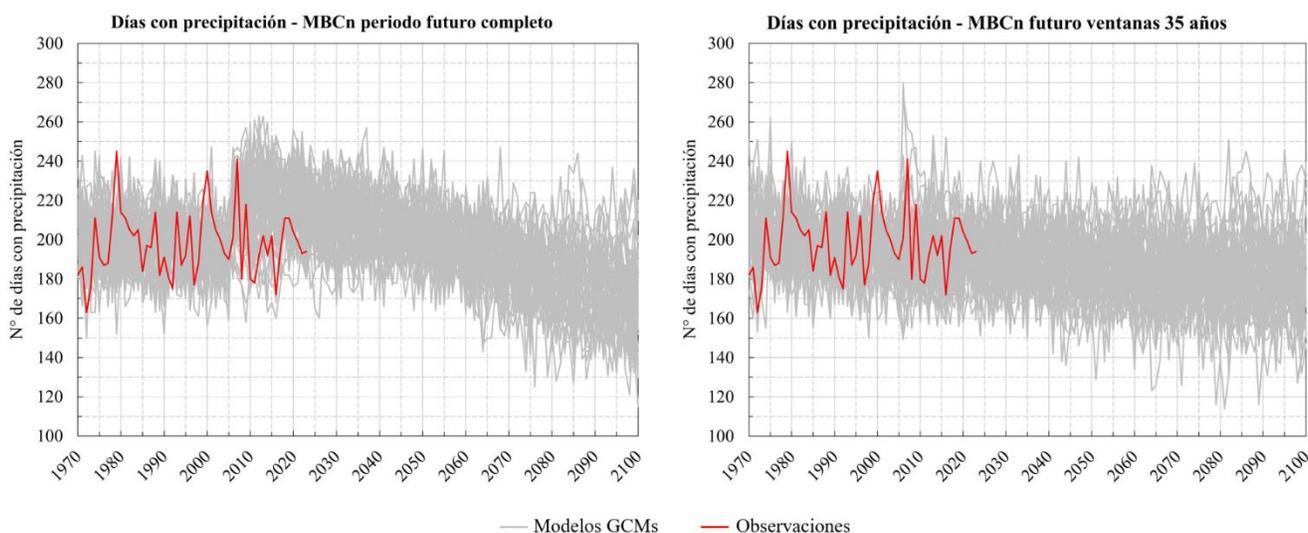


Figura 5-2: Número de días que presentan precipitación, a la derecha aplicando corrección de sesgo en el periodo futuro completo y a la izquierda aplicando corrección en ventanas de 35 años.

Los resultados de la precipitación y las temperaturas corregidas con el método MBCn se muestran en la Figura 5-3, mientras que las proyecciones y variaciones simuladas por los GCMs se presentan en la Tabla 5-2. Se proyecta, con los GCMs seleccionados, una reducción del 24,3% en la precipitación total anual en el futuro lejano (2065-2100). Respecto a la temperatura, se espera un aumento de 1,9 [°C] en las temperaturas media y máxima, y de 2,2 [°C] en la temperatura media.

Tabla 5-2: Resultados corrección de sesgo MBCn modelos seleccionados.

Rapa Nui	RCP 8,5											
	Precipitación			Temperatura media			Temperatura mínima			Temperatura máxima		
	Media [mm]	Desv. Est [mm]	$\Delta$ [%]	Media [°C]	Desv. Est [°C]	$\Delta$ [°C]	Media [°C]	Desv. Est [°C]	$\Delta$ [°C]	Media [°C]	Desv. Est [°C]	$\Delta$ [°C]
Observaciones (1970-2023)	1.130	302,4	-	20,6	0,3	-	17,8	0,4	-	24,0	0,5	-
Histórico (1970-2005)	1.204	350,0	-	20,6	0,5	-	17,9	0,6	-	24,0	0,4	-
1988-2023	1.107	327,6	-	20,8	0,5	-	18,1	0,6	-	24,2	0,5	-
F. Cercano (2029-2064)	987	298,3	-12,7	21,6	0,4	+1,0	19,0	0,5	+1,1	24,9	0,4	+0,9
F. Lejano (2065-2100)	856	252,5	-24,3	22,5	0,6	+1,9	20,0	0,5	+2,2	25,9	0,4	+1,9

Nota. La celda de color celeste representa los valores medios anuales de las variables registradas en la estación meteorológica Mataveri.

En la Tabla 5-3 se presentan los resultados de la corrección de sesgo de la precipitación y las temperaturas de los modelos seleccionados comparados con el estudio realizado por Gatica y Toro (2020). Se observa que para el periodo 1970-2018, las precipitaciones y temperaturas medias corregidas son similares, ya que corresponden a los datos registrados en la estación meteorológica Mataverí, sin embargo, se observa una diferencia de 4 [mm] en la precipitación del periodo. Esta diferencia puede deberse a la inclusión en este estudio de los datos de precipitación del año 1990, los cuales no estaban disponibles en el análisis de Gatica y Toro.

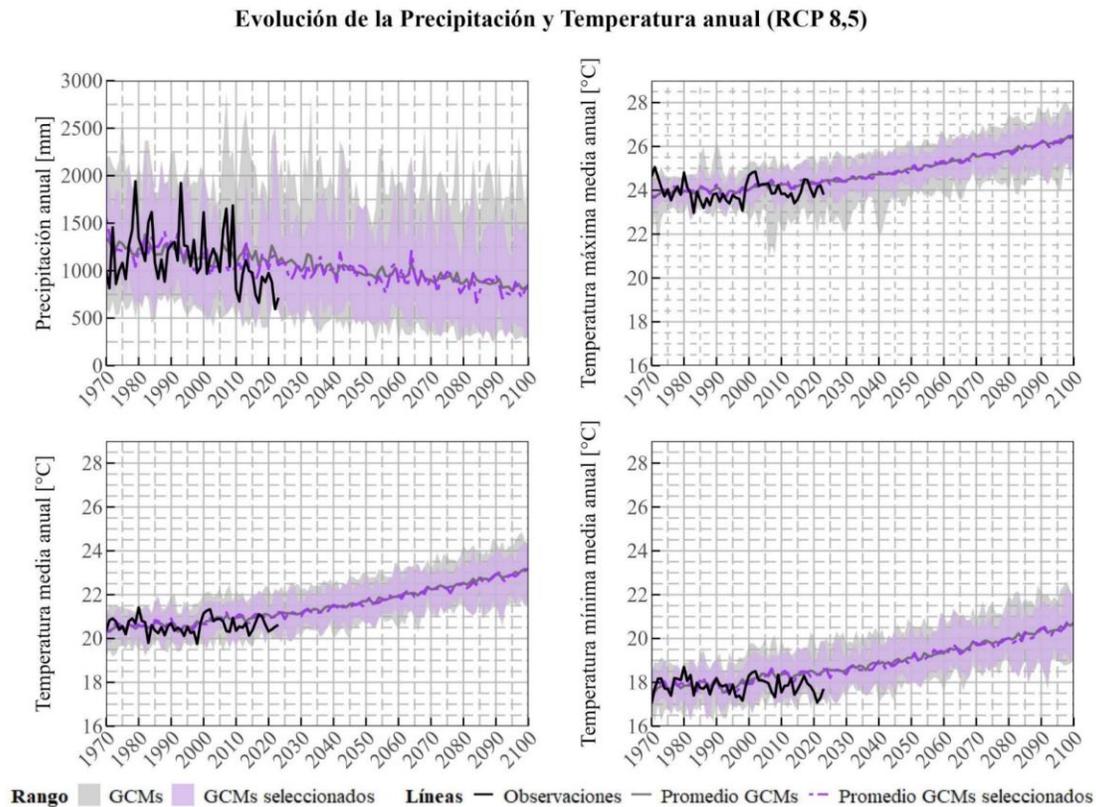
Al analizar los periodos futuros, se observan diferencias más notorias en las proyecciones de precipitación. En el Futuro cercano (2021-2060), la media de precipitación corregida en el estudio de Gatica y Toro (G&T) es de 1.133 [mm], superior a los 995 [mm] obtenidos en este análisis. El porcentaje de disminución es de 14,4% en este estudio, mientras que en el estudio de G&T la reducción es de 2,9%. En el Futuro lejano (2061-2100), la reducción también es mayor en este análisis (25,2%) en comparación con el 5,4% obtenido por G&T. Estas diferencias se pueden deber a los distintos métodos de corrección utilizados: MBCn en este estudio y QDM en el de Gatica y Toro, otra razón que explica la diferencia es que la media de G&T proviene de analizar muchos más modelos, mientras que, en este caso, se realizó una preselección.

*Tabla 5-3: Resultados corrección de sesgo MBCn, periodos estudio Gatica y Toro.*

<b>Rapa Nui</b>		<b>RCP 8,5</b>							
Periodo	Estudio	Precipitación		Temperatura media		Temperatura mínima		Temperatura máxima	
		Media [mm]	$\Delta$ [%]	Media [°C]	$\Delta$ [°C]	Media [°C]	$\Delta$ [°C]	Media [°C]	$\Delta$ [°C]
1970-2018	Actual	1.163	-	20,6	-	17,9	-	24,0	-
	G&T	1.167	-	20,6	-	-	-	-	-
F. Cercano (2021-2060)	Actual	995	-14,4	21,4	+0,8	18,8	+0,9	24,8	+0,8
	G&T	1.133	-2,9	21,4	+0,8	-	-	-	-
F. Lejano (2061-2100)	Actual	870	-25,2	22,5	+1,9	20,0	+2,1	25,8	+1,9
	G&T	1.104	-5,4	22,4	+1,8	-	-	-	-

Se observa en la Figura 5-3 la evolución proyectada para la precipitación y las temperaturas anuales máxima, media y mínima bajo el escenario de cambio climático RCP 8,5, desde el año 1970 hasta el 2100. La línea negra representa las observaciones anuales de las variables, mientras que el área morada muestra la envolvente de los GCMs seleccionados y el área gris abarca el rango considerando todos los GCMs corregidos. A partir de los gráficos y de la tabla anterior, se deduce que se proyecta una disminución en la precipitación anual hacia finales del siglo XXI. Ocurre lo contrario para las temperaturas, ya que muestran un incremento significativo en los valores anuales, lo que es consistente con el escenario de altas emisiones del escenario RCP 8,5. Al observar las áreas grises y moradas, que

indican el grado de incertidumbre, se aprecia que al seleccionar ciertos GCMs se reduce la variabilidad en todos los gráficos, manteniéndose la tendencia de los valores promedio por periodo. Esto se observa en que la envolvente morada es más estrecha, lo que indica una reducción de incertidumbre en las proyecciones.



*Figura 5-3: Evolución temporal de las variables en estudio bajo el escenario RCP 8,5.*

En la Figura 5-4 se presentan las curvas de variación estacional (CVE) de la precipitación media mensual, tanto para el periodo observado como para las proyecciones futuras de los GCMs, las figuras equivalentes para tas, tasmin, tasmax y ETP se presentan en los Anexos C y D. Se observa que, luego de aplicar la corrección de sesgo, los promedios de todos los GCMs en el periodo histórico (1970-2005) coinciden con los valores observados. En este periodo, se registra un valor máximo en el mes de abril, con aproximadamente 140 [mm/mes], seguido de un descenso que presenta *peaks* en los meses de julio (120 [mm/mes]) y diciembre (85 [mm/mes]), alcanzando su valor mínimo en noviembre con 70 [mm/mes].

En el periodo 1988-2023, el área de color verde representa la variabilidad al considerar todos los modelos de circulación general, mientras que el área de color celeste corresponde a la selección de ciertos GCMs. Las proyecciones muestran una variabilidad estacional que se ajusta a las observaciones del periodo 1970-2005. Sin embargo, el promedio de las observaciones del periodo 1988-2023 (línea negra segmentada) presenta una disminución notable en el mes de abril y un aumento en julio, con el resto de los meses situándose por debajo de la media histórica.

Para el futuro cercano (2029-2064), se observa un incremento en la incertidumbre del área verde, asociada a los valores de máxima precipitación mensual. De manera similar, el área de color celeste también aumenta su tamaño en comparación con los periodos anteriores, lo que sugiere que para el periodo futuro hay un mayor rango de incertidumbre. Además, se aprecia que algunos modelos proyectan *peaks* de precipitación en octubre y otro de menor magnitud en enero, mientras que muestran una disminución notable en la precipitación a partir de julio, tanto para el promedio de los GCMs seleccionados como al considerar todos los modelos. A pesar de esto, la variabilidad mensual de la precipitación se mantiene, ya que la curva del promedio de los GCMs conserva la forma de la CVE del periodo histórico.

En el futuro lejano (2065-2100), según las proyecciones, el valor máximo de precipitación ya no ocurrirá en el mes de abril, sino que se retrasará hasta mayo. El mes con la menor precipitación seguirá siendo noviembre, pero el *peak* de precipitación que se producía en diciembre será menos marcado. Además, se observa una mayor diferencia entre el promedio al considerar todos los modelos y el promedio al seleccionar solo algunos. El promedio de los GCMs seleccionados (representado por la línea segmentada azul) se encuentra por debajo del promedio al seleccionar todos los modelos (línea verde), especialmente entre los meses de julio y septiembre. Sin embargo, ambos promedios están por debajo de la línea negra, lo que indica que los modelos seleccionados proyectan una menor precipitación hacia finales del siglo.

### Curva de Variación Estacional Precipitación

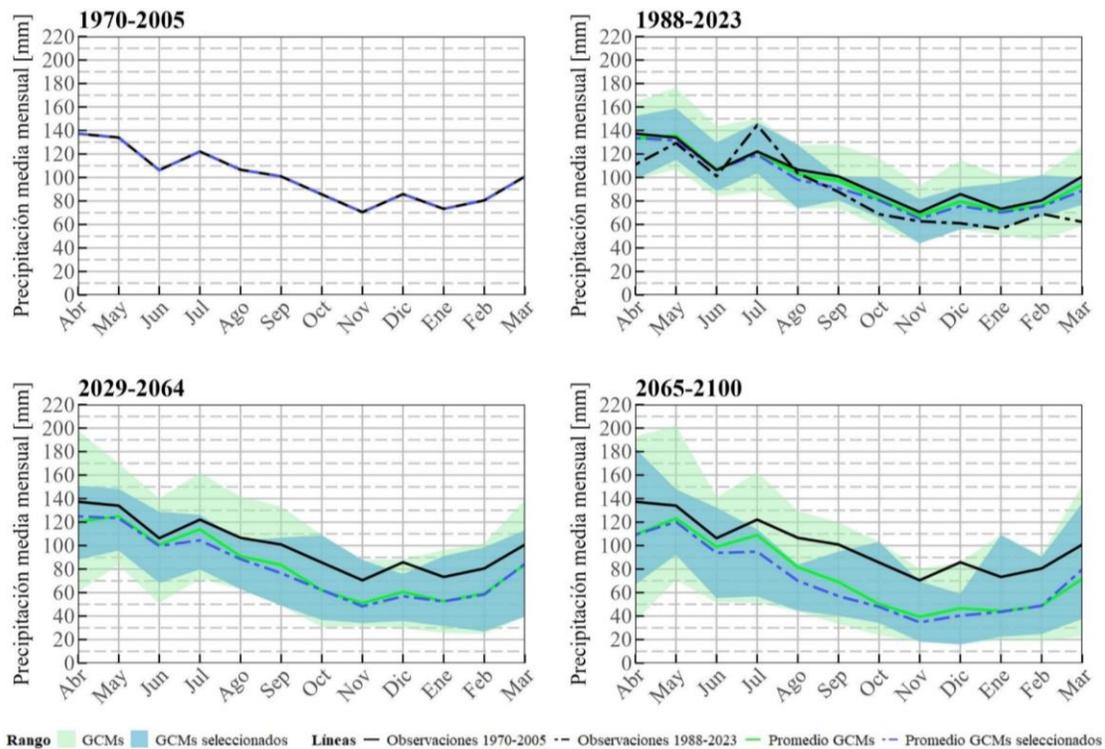


Figura 5-4: Curva de variación estacional de precipitación.

Centrándose en los GCMs seleccionados y en los datos registrados por la estación meteorológica, se elaboraron las curvas de duración de precipitación que se presentan en la Figura 5-5. La probabilidad de excedencia indica la probabilidad de que un evento de precipitación diaria supere un determinado umbral de intensidad. En este caso, las curvas de duración solo incluyen los días de lluvia. Se presentan cuatro gráficos, en donde cada uno corresponde a un periodo de tiempo diferente. El primero muestra la precipitación observada en el periodo 1970-2005 (línea negra), mientras que el resto de las líneas, que están superpuestas, corresponden a los modelos GCM seleccionados.

En el periodo 1988-2023, las curvas de los modelos de circulación general están por debajo de la curva segmentada de color negro, que representa las observaciones de ese mismo periodo. En el futuro cercano (2029-2064), se observa que el modelo CMCC-CMS r1i1p1 (curva verde) es el que proyecta la menor probabilidad de excedencia, y en general, todos los GCMs se encuentran por debajo de la curva de las observaciones del periodo 1970-2005. Finalmente, en el futuro lejano, el modelo CMCC-CMS r1i1p1 sigue proyectando la menor probabilidad de excedencia de precipitación, mientras que el modelo MIROC5 r2i1p1 (curva celeste) proyecta, a partir del 30% de probabilidad de excedencia, una mayor probabilidad de lluvia que los demás GCMs.

### Curva de Duración de Precipitación

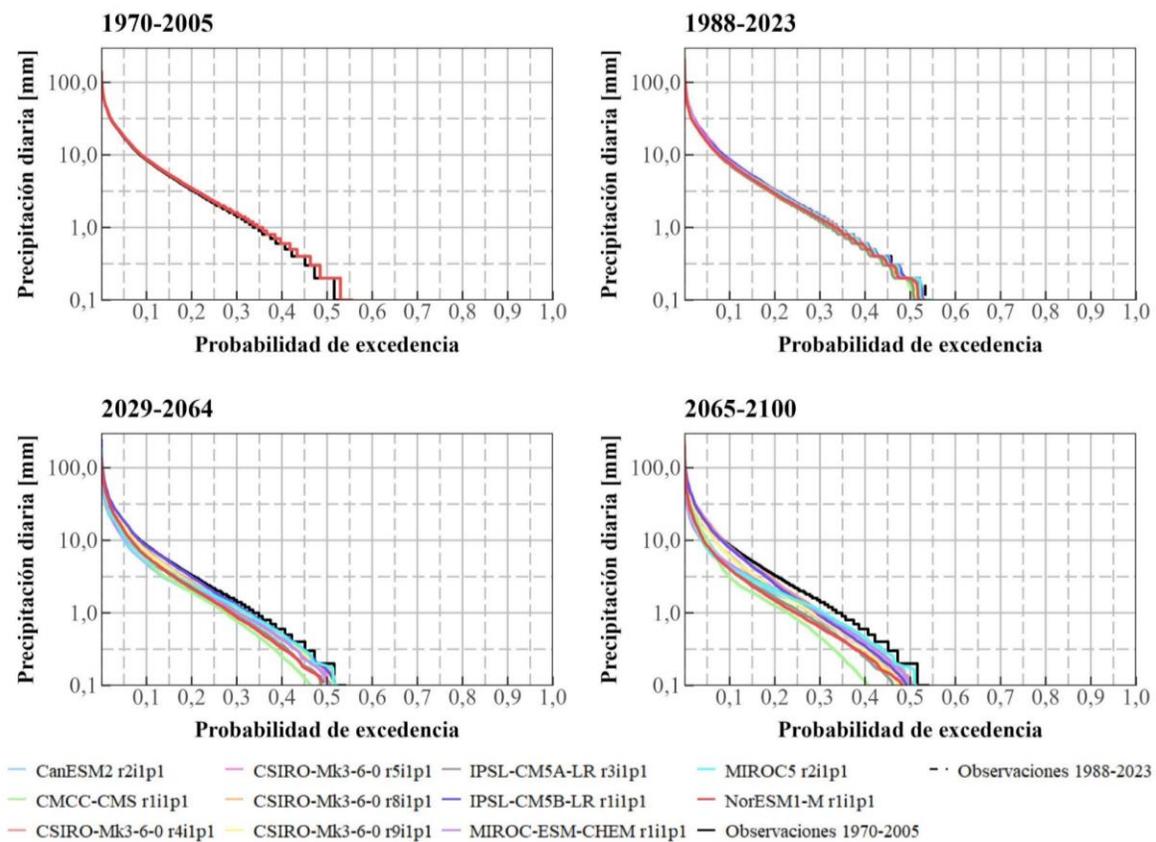


Figura 5-5: Curva de duración de precipitación, GCMs seleccionados.

La Figura 5-6 muestra las curvas de duración asociadas a la temperatura media para los cuatro periodos de estudio. El primer gráfico corresponde al periodo histórico 1970-2005, donde se observa en color negro la curva de duración de la temperatura media observada, con los GCMs siguiendo el mismo comportamiento. Luego, en el periodo 1988-2023 se aprecia que las curvas de los GCMs están ligeramente por sobre la curva negra, lo que indica que los modelos de circulación general proyectan temperaturas superiores a las observadas.

En los periodos futuros, para el futuro cercano, la forma de la curva se mantiene, pero las proyecciones de los GCMs están por sobre la curva de los datos observados en el periodo histórico. En el futuro lejano, el modelo NorESM1-1 r1i1p1 (curva roja) proyecta el menor aumento de temperatura, mientras que el modelo IPSL-CM5A-LR r3i1p1 (curva verde oscuro) proyecta el mayor incremento para el periodo.

### Curva de Duración de Temperatura media

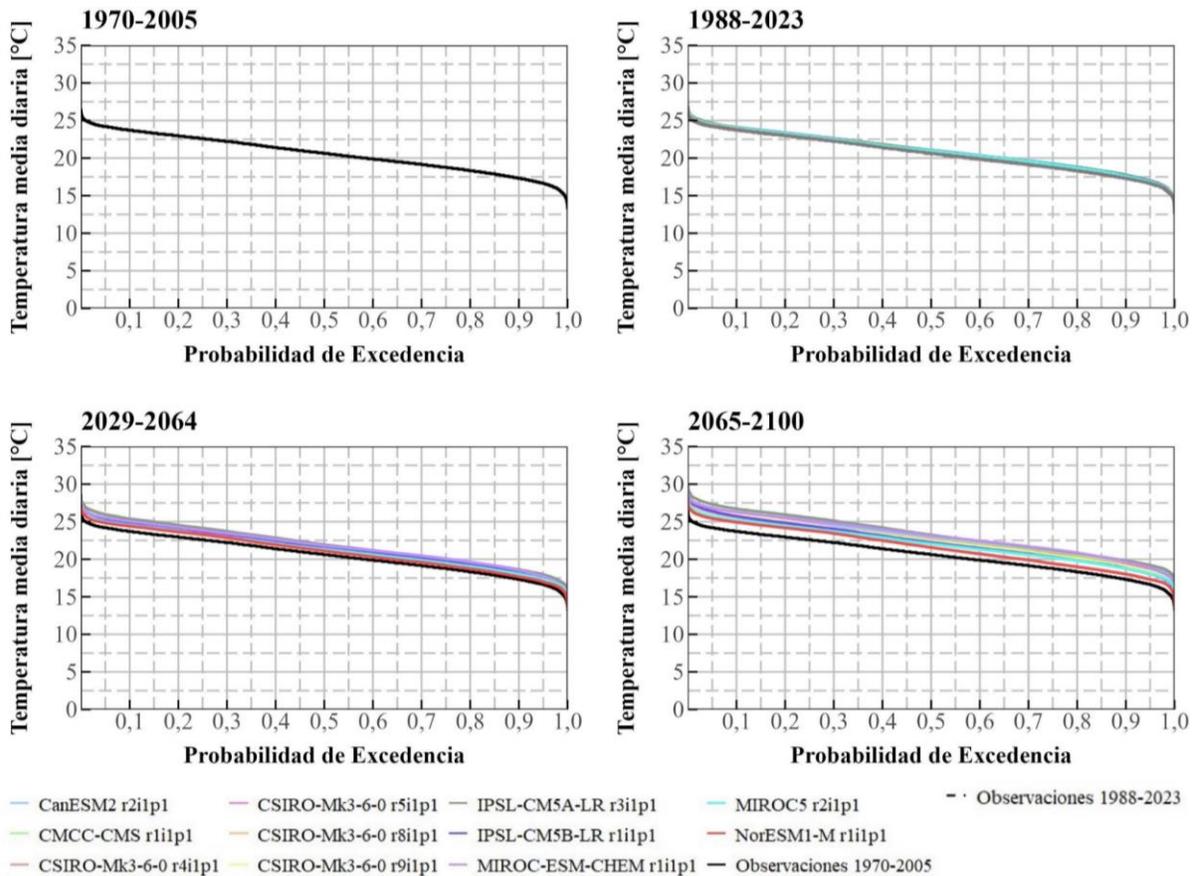


Figura 5-6: Curva de duración de temperatura media, GCMs seleccionados.

## 5.2 Evapotranspiración potencial

En la Tabla 5-4 se muestra la evapotranspiración potencial calculada utilizando los datos observados en el periodo 1970-2023. Se observa que el método de cálculo que da como resultado el mayor valor de evapotranspiración potencial es Oudin, con una media de 1258,8 mm por año, seguido por Hargreaves con 1088,9 mm. Thornthwaite es el método que presenta el menor valor, con 956,3 mm. Aunque Oudin tiene la media mayor, su coeficiente de variación, de 2,6%, es menor que el de Hargreaves (2,9%), lo que sugiere que los valores de ETP obtenidos con el método de Oudin poseen una menor dispersión con respecto a su media en comparación con los de Hargreaves.

*Tabla 5-4: Resultados de evapotranspiración potencial para los distintos métodos de cálculo, periodo observado (1970-2023).*

Método	Media anual [mm]	Desv. Estándar [mm]	Varianza	Coef. de Var. [%]
Hargreaves	1088,9	31,1	969,7	2,9
Thornthwaite	956,3	24,1	581,6	2,5
Oudin	1258,8	33,1	1094,4	2,6
Thornthwaite Gatica y Toro (1970-2018)	956,3	23,8	567,3	2,5

A partir de los datos registrados por la estación meteorológica, se realizó un análisis de sensibilidad para evaluar el impacto del aumento de temperatura en los resultados de la ETP anual calculada con los tres métodos. La Tabla 5-5 muestra los resultados de este análisis para los periodos observados. Se aprecia que el método de Thornthwaite es el que presenta la mayor variación, con un incremento aproximado de 16,2% ante un aumento de 2 [°C] de temperatura. El método de Hargreaves es el que muestra la menor variación, al incrementar la temperatura 2 [°C], la ETP varía solo un 5,18% en comparación con los resultados obtenidos a partir de los datos originales.

*Tabla 5-5: Análisis de sensibilidad ETP.*

Periodo	Aumento de Temperatura	Thornthwaite	Hargreaves	Oudin
1970-2005	+1°C	7,5%	2,6%	3,9%
	+2°C	16,2%	5,2%	7,9%
1988-2023	+1°C	7,4%	2,6%	3,9%
	+2°C	16,2%	5,2%	7,9%

Lo analizado en la tabla anterior también se observa en la Figura 5-7, que muestra la evolución de la ETP anual bajo el escenario RCP 8,5. En el Anexo D se presentan los gráficos de CVE para cada método de estimación. El método de Thornthwaite muestra los menores valores de evapotranspiración anual, pero, al mismo tiempo, es el que presenta mayor variación hacia el futuro, ya que, como se discutió previamente, es más sensible al aumento de temperatura. También se observa que los modelos se ajustan

mejor en el periodo 1970-2023 a la ETP calculada con los datos observados (curva de color negro) y con el método de Thornthwaite.

Por otro lado, el método de Oudin es el que presenta los mayores valores de evapotranspiración anual, y en cuanto a su variación ante el incremento de temperatura, sigue el comportamiento esperado, con un aumento en la evapotranspiración en el futuro. El método de Hargreaves también muestra un incremento en la evapotranspiración, aunque en menor magnitud que los métodos anteriores.

Además, se observa mayor incertidumbre asociada al área gris, que representa el comportamiento al considerar todos los GCMs, lo cual puede deberse a que este método que considera tanto la temperatura media como las temperaturas máximas y mínimas. En modelos como el ACCESS1-0 r1i1p1, ACCESS1-3 r1i1p1, EC-EARTH r12i1p1 y MPI-ESM-MR r1i1p1, la temperatura media superaba a la máxima en más de 250 días dentro del periodo 1970-2100 (antes y después de la corrección de sesgo), lo que afecta la tendencia de las proyecciones, ya que las curvas asociadas a estos modelos son las que se alejan de las demás proyecciones.

#### Evolución de la Evapotranspiración potencial anual (RCP 8,5)

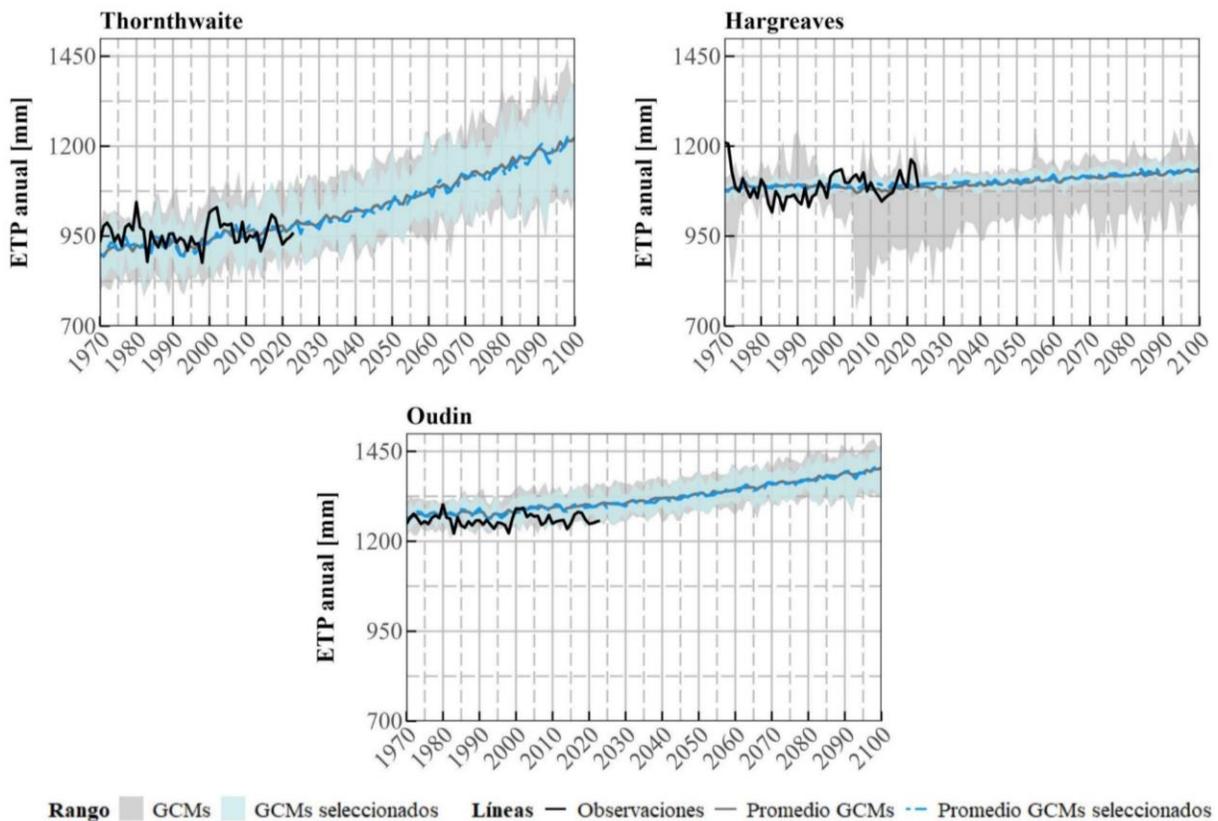


Figura 5-7: Evolución de la evapotranspiración potencial bajo escenario RCP 8,5.

### 5.3 Proyección de eventos de sequía

A continuación, se presentan los resultados de los distintos índices de sequía y del índice de Aridez de Martonne, para los datos observados y las proyecciones futuras bajo el escenario RCP 8,5. Solo se incluyen las clasificaciones de sequía secas más extremas, en el Anexo E se detalla cada una de las clasificaciones para el periodo observado.

#### 5.3.1 SPI

En la Tabla 5-6 se presenta el índice SPI para las escalas 12, 24 y 48 meses, abarcando los periodos observados: el histórico (1970-2005) y el comprendido entre 1988-2023. Se observa que, en la escala de 12 meses, el número de sequías es mayor en el periodo 1988-2023, ya que en el periodo histórico solo se registra una sequía severa con una duración de un mes. Además, las sequías severas superan en cantidad a las extremas. En cuanto a la intensidad, las sequías en el periodo 1988-2023, presentan una mayor severidad con respecto al periodo anterior, ya que el valor del índice es más negativo y su duración total también aumenta. Esto se relaciona con que este periodo incluye el año 2010, donde se observa el efecto de la megasequía, razón por la cual el periodo 1988-2023 muestra una mayor severidad, duración y frecuencia de sequías. Esto se aprecia también en la Figura 5-8, donde a partir del año 2010, se presentan sequías severas y extremas. Al analizar la frecuencia de las sequías severas, se observa que a medida que aumenta la escala del índice, aumenta también la frecuencia de sequía, esto no ocurre en el caso de la sequía extrema pues para la escala de 12 y 24 meses la frecuencia es de 3,2% y en la escala de 48 meses la frecuencia disminuye a 0,9%.

*Tabla 5-6: Resultados SPI periodo observado.*

Índice		N° sequías		Intensidad Media [-]		Duración Total [meses]		Frecuencia [%]	
Clasificación	SPI	1970-2005	1988-2023	1970-2005	1988-2023	1970-2005	1988-2023	1970-2005	1988-2023
Sequía severa	12	1	12	-1,53	-1,70	1	21	0,2	4,9
	24	0	10	-	-1,75	0	39	0,0	9,0
	48	0	6	-	-1,78	0	50	0,0	11,6
Sequía extrema	12	0	5	-	-2,26	0	14	0,0	3,2
	24	0	3	-	-2,08	0	14	0,0	3,2
	48	0	3	-	-2,05	0	4	0,0	0,9

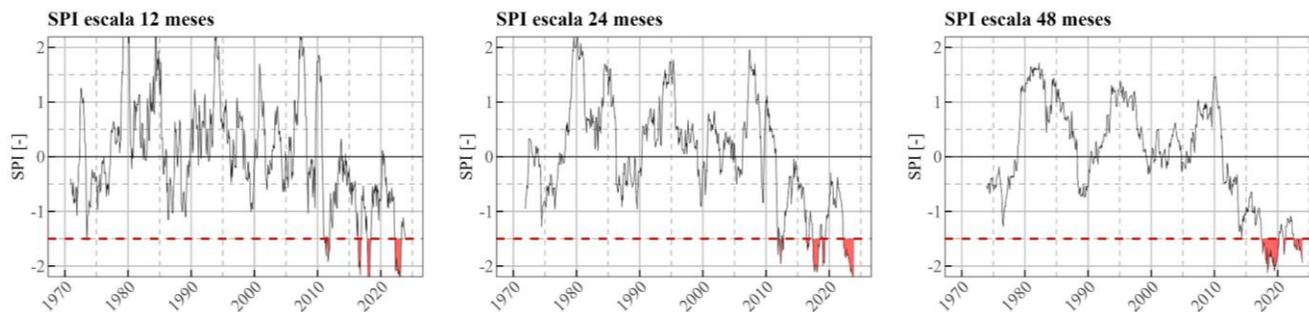


Figura 5-8: Resultados de sequías índice SPI, periodo observado.

La Tabla 5-7 muestra los resultados del índice SPI para dos modelos GCM: CSIRO-Mk3-6-0 r9i1p1 y NorESM1-M r1i1p1. Estos modelos presentan el menor error promedio (0,3% y -0,7%, respectivamente) al comparar los valores de precipitación mensual observada con los simulados por los GCMs (ver Tabla B-2). Se observa que ambos modelos proyectan un mayor número y frecuencia de sequías severas y extremas con respecto a la Tabla 5-6. Además, el modelo CSIRO-Mk3-6-0 r9i1p1 proyecta una menor intensidad media para las sequías severas en relación con los datos observados.

Tabla 5-7: Resultados SPI, GCMs periodo 1970-2023.

GCM	Índice		N° sequías		Intensidad Media [-]		Duración Total [meses]		Frecuencia [%]	
	Clasificación	SPI	1970-2005	1988-2023	1970-2005	1988-2023	1970-2005	1988-2023	1970-2005	1988-2023
CSIRO-Mk3-6-0 r9i1p1	Sequía severa	12	5	14	-1,67	-1,70	16	26	5,0	6,0
		24	3	11	-1,71	-1,67	8	35	5,1	8,1
		48	4	10	-1,72	-1,65	10	74	3,1	17,1
	Sequía extrema	12	0	4	-	-2,16	0	6	0,7	1,4
		24	0	4	-	-2,14	0	9	0,2	2,1
		48	1	4	-2,19	-2,17	7	27	1,0	6,3
NorESM1-M r1i1p1	Sequía severa	12	5	15	-1,61	-1,73	14	27	4,5	6,3
		24	6	10	-1,77	-1,74	14	23	5,1	5,3
		48	2	7	-1,75	-1,67	17	38	4,2	8,8
	Sequía extrema	12	2	6	-2,14	-2,24	10	29	1,2	6,7
		24	3	4	-2,18	-2,29	15	30	2,2	6,9
		48	1	2	-2,06	-2,09	4	8	1,8	1,9

A partir de la Tabla 5-8, que presenta los resultados del índice SPI proyectados para ambos GCMs en los periodos futuros (2029-2064 y 2065-2100), se observa un aumento en el número de sequías de ambas categorías para el futuro lejano (2065-2100), en comparación con el periodo 2029-2064. El modelo NorESM1-M r1i1p1 proyecta una mayor frecuencia de sequía en ambas categorías respecto al periodo 1970-2023. Por ejemplo, en la escala de 12 meses, la frecuencia de sequías severas aumenta en el futuro

lejano de 6,3% a 21,1%, y en la escala de 48 meses pasa de 8,8% a 15,3%. En cuanto al modelo CSIRO-Mk3-6-0 r9i1p1, aunque proyecta una menor duración de los eventos de sequía severa en comparación al modelo NorESM1-M r1i1p1, se estima una duración total de 83 meses para las sequías extremas en la escala de 48 meses en el futuro cercano y 75 meses para el futuro lejano.

Tabla 5-8: Resultados SPI, GCMs periodos futuros.

GCM	Índice		N° sequías		Intensidad Media [-]		Duración Total [meses]		Frecuencia [%]	
	Clasificación	SPI	2029-2064	2065-2100	2029-2064	2065-2100	2029-2064	2065-2100	2029-2064	2065-2100
CSIRO-Mk3-6-0 r9i1p1	Sequía severa	12	15	23	-1,72	-1,72	36	62	8,3	14,4
		24	11	16	-1,78	-1,72	41	38	9,5	8,8
		48	13	9	-1,74	-1,65	55	38	12,7	8,8
	Sequía extrema	12	8	6	-2,26	-2,21	42	21	9,7	4,9
		24	6	4	-2,26	-2,33	40	29	9,3	6,7
		48	5	4	-2,37	-2,29	83	75	19,2	17,4
NorESM1-M r1i1p1	Sequía severa	12	28	27	-1,72	-1,69	68	91	15,7	21,1
		24	15	24	-1,76	-1,72	46	109	10,6	25,2
		48	15	11	-1,66	-1,67	79	66	18,3	15,3
	Sequía extrema	12	11	12	-2,18	-2,50	41	131	9,5	30,3
		24	7	12	-2,23	-2,44	53	179	12,3	41,4
		48	3	5	-2,24	-2,52	32	280	7,4	64,8

### 5.3.2 SPEI

En el caso del índice SPEI, se escogió el método Hargreaves para mostrar la comparación entre periodos, este método es el que posee menor error absoluto (promedio de -0,15 [mm]) entre la evapotranspiración potencial anual calculada con los datos observados y la obtenida con los GCMs en el periodo histórico (1970-2005). El detalle del error de los métodos Oudin (promedio de -1,56 [mm]) y Thornthwaite (promedio de +2,57 [mm]) se presenta en la Tabla D-1. En el Anexo E, se presentan algunas tablas con resultados asociados al método de Thornthwaite. La; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Tabla E-2 presenta los resultados del índice SPEI en el periodo observado, con los tres métodos de estimación de evapotranspiración potencial.

La Tabla 5-9 muestra los resultados del índice SPEI con Hargreaves y se observa que, para el periodo histórico, solo se registra una sequía severa para la escala de 12 meses, al igual que para el índice SPI, sin embargo, en el periodo 1988-2023 se presenta menor números de sequías severas con respecto al SPI. La frecuencia de la sequía severa es mayor que el de la sequía extrema en todas las escalas en estudio.

Tabla 5-9: Resultados SPEI con Hargreaves, periodo observado.

Índice		N° sequías		Intensidad Media [-]		Duración Total [meses]		Frecuencia [%]	
Clasificación	SPEI	1970-2005	1988-2023	1970-2005	1988-2023	1970-2005	1988-2023	1970-2005	1988-2023
Sequía severa	12	1	11	-1,57	-1,70	1	20	0,2	4,6
	24	0	9	-	-1,73	0	38	0,0	8,8
	48	0	5	-	-1,60	0	46	0,0	10,6
Sequía extrema	12	0	4	-	-2,25	0	15	0,0	3,5
	24	0	2	-	-2,05	0	6	0,0	1,4
	48	0	0	-	-	0	0	0,0	0,0

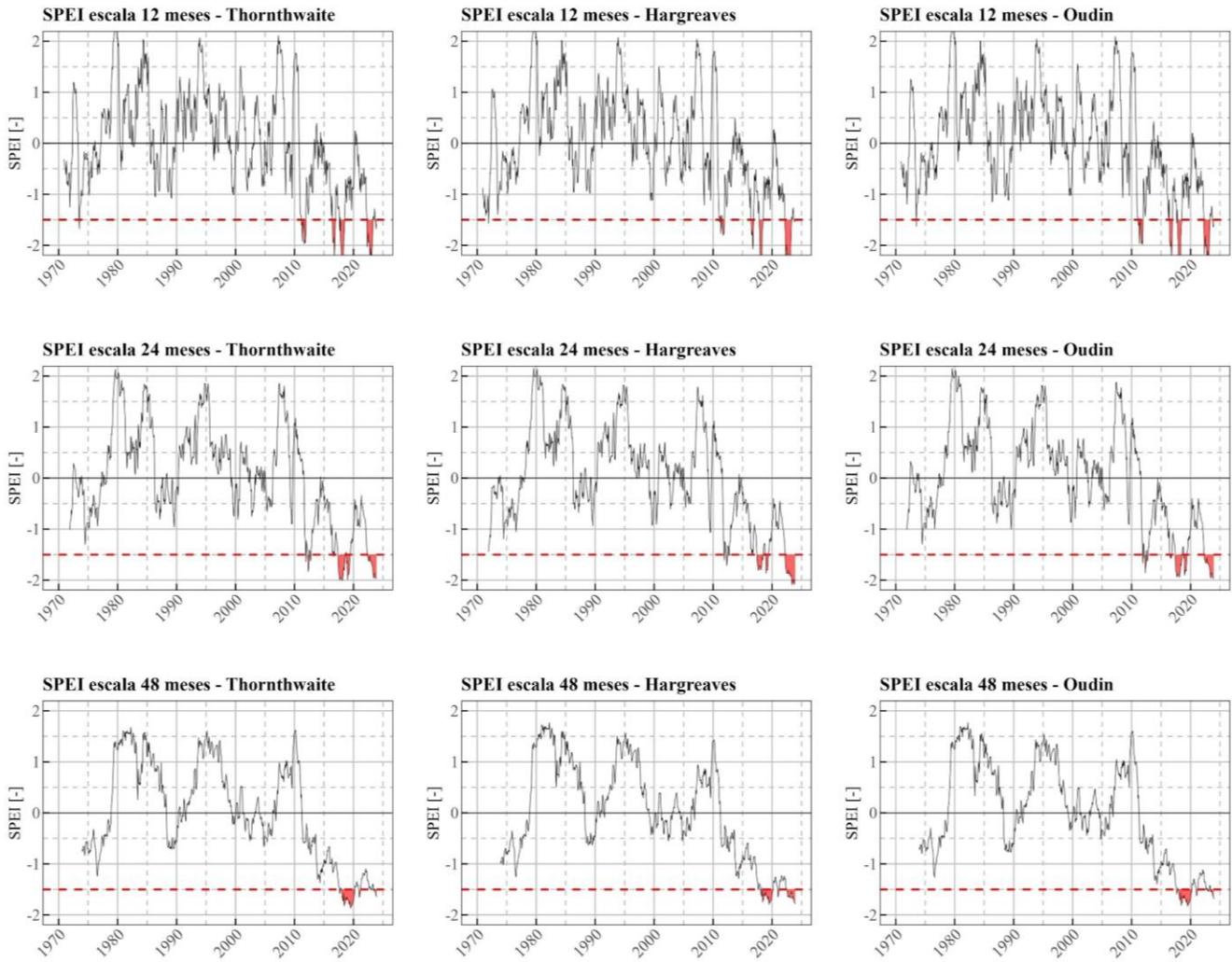


Figura 5-9: Resultados de sequías índice SPEI, periodo observado.

La Tabla 5-10 presenta los resultados en el periodo observado, de manera similar a la tabla anterior, pero en este caso asociados dos modelos GCM. Ambos proyectan una mayor de frecuencia y duración de sequías severas y extremas, tanto para el periodo histórico como para el comprendido entre 1988 y 2023.

Tabla 5-10: Resultados SPEI con Hargreaves, GCMs periodo 1970-2023.

GCM	Índice		N° sequías		Intensidad Media [-]		Duración Total [meses]		Frecuencia [%]	
	Clasificación	SPEI	1970-2005	1988-2023	1970-2005	1988-2023	1970-2005	1988-2023	1970-2005	1988-2023
CSIRO-Mk3-6-0 r9i1p1	Sequía severa	12	9	13	-1,72	-1,66	21	36	5,0	8,3
		24	5	15	-1,64	-1,70	21	49	5,1	11,3
		48	4	12	-1,77	-1,76	12	81	3,1	18,8
	Sequía extrema	12	1	5	-2,19	-2,30	3	13	0,7	3,0
		24	1	6	-2,21	-2,29	1	22	0,2	5,1
		48	2	5	-2,07	-2,18	4	24	1,0	5,6
NorESM1-M r1i1p1	Sequía severa	12	7	15	-1,64	-1,67	19	32	4,5	7,4
		24	6	11	-1,82	-1,74	21	32	5,1	7,4
		48	3	8	-1,69	-1,77	16	39	4,2	9,0
	Sequía extrema	12	1	5	-2,06	-2,12	5	23	1,2	5,3
		24	4	6	-2,04	-2,08	9	21	2,2	4,9
		48	1	3	-2,08	-2,12	7	13	1,8	3,0

De acuerdo con la Tabla 5-11, en los periodos futuros, los modelos GCM proyectan un aumento en el número de sequías, las cuales presentarán mayor intensidad, duración y frecuencia en comparación con el periodo observado.

Tabla 5-11: Resultados SPEI con Hargreaves, GCMs periodos futuros.

GCM	Índice		N° sequías		Intensidad Media [-]		Duración Total [meses]		Frecuencia [%]	
	Clasificación	SPEI	2029-2064	2065-2100	2029-2064	2065-2100	2029-2064	2065-2100	2029-2064	2065-2100
CSIRO-Mk3-6-0 r9i1p1	Sequía severa	12	20	31	-1,72	-1,79	34	72	7,9	16,7
		24	11	27	-1,69	-1,69	34	69	7,9	16,0
		48	11	17	-1,76	-1,75	53	88	12,3	20,4
	Sequía extrema	12	9	22	-2,32	-2,34	61	56	14,1	13,0
		24	6	11	-2,60	-2,42	72	56	16,7	13,0
		48	6	8	-2,13	-2,23	90	79	20,8	18,3

GCM	Índice		N° sequías		Intensidad Media [-]		Duración Total [meses]		Frecuencia [%]	
	Clasificación	SPEI	2029-2064	2065-2100	2029-2064	2065-2100	2029-2064	2065-2100	2029-2064	2065-2100
NorESM1-M rli1pi	Sequía severa	12	28	40	-1,73	-1,75	90	122	20,8	28,2
		24	21	30	-1,74	-1,77	65	149	15,0	34,5
		48	16	11	-1,73	-1,77	106	56	24,5	13,0
	Sequía extrema	12	8	14	-2,11	-2,23	20	112	4,6	25,9
		24	9	13	-2,10	-2,21	32	150	7,4	34,7
		48	6	6	-2,16	-2,41	49	302	11,3	69,9

Para evaluar el impacto del método de estimación de la evapotranspiración en el cálculo de índices de sequía, se realizaron gráficos de frecuencia de cada clasificación del índice SPEI según cada uno de los métodos. A continuación, la Figura 5-10, Figura 5-11 y Figura 5-12 muestran la frecuencia de cada clasificación del SPEI a una escala de 24 meses, de acuerdo con cada GCM, para los periodos 1970-2005, 1988-2023 y los futuros cercano (2029-2064) y lejano (2065-2100). En los tres métodos, se observa una tendencia a aumentar la frecuencia de las sequías moderadas, severa y extrema en los periodos futuros, especialmente en el futuro lejano, mientras que las condiciones húmedas disminuyen. En el periodo histórico, todos los métodos muestran que es más frecuente tener condiciones húmedas y cercanas a lo normal, sin embargo, en el periodo 1988-2023 ya se comienza a notar la tendencia hacia el aumento de las condiciones de sequía.

Al comparar los métodos de estimación de la ETP, se observa que con el método de Thornthwaite, las condiciones de sequía severa y extrema son más frecuentes en comparación con Hargreaves y Oudin, especialmente en el futuro lejano. Sin embargo, en el periodo histórico, Thornthwaite muestra una mayor frecuencia de condiciones cercanas a lo normal o ligeramente húmedas. Por otro lado, Hargreaves muestra una mayor frecuencia de condiciones húmedas en los periodos, lo que sugiere que sus proyecciones son menos extremas. Oudin, es sensible a las condiciones secas, pero no proyecta una frecuencia tan alta de sequías extremas en el futuro lejano como lo hace el método de Thornthwaite.

Esto confirma que las proyecciones de los índices de sequía son sensibles al método de estimación de la ETP. Si el método utilizado es sensible al aumento de temperatura, se generará un incremento en las condiciones secas relacionadas con el cambio climático. El método de Thornthwaite, por ejemplo, es el más sensible al incremento de temperatura, y reporta una mayor frecuencia de condiciones de sequía severa y extrema. Por esta razón, es fundamental ser cautelosos al elegir el método de estimación de la ETP para analizar sequías en el contexto del cambio climático.

### SPEI escala 24 meses: Thornthwaite

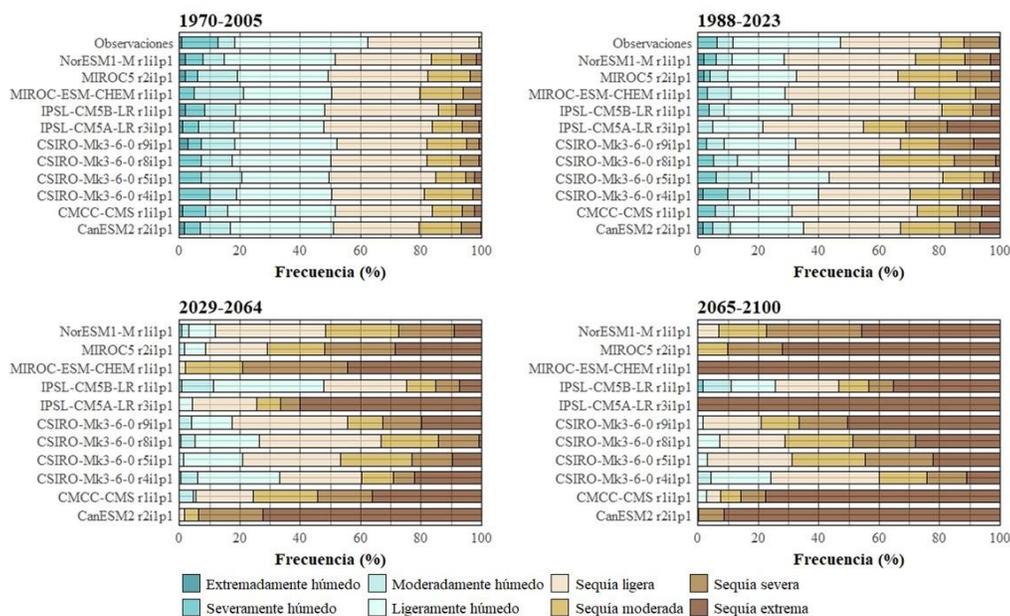


Figura 5-10: Frecuencia eventos, SPEI escala 24 meses, Thornthwaite.

### SPEI escala 24 meses: Hargreaves

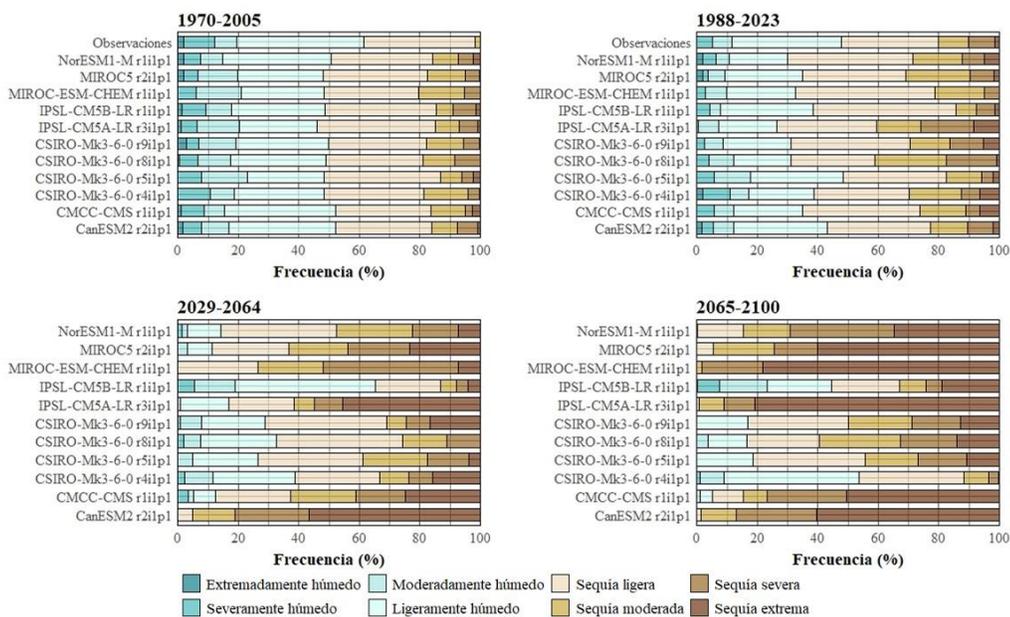


Figura 5-11: Frecuencia eventos, SPEI escala 24 meses, Hargreaves.

### SPEI escala 24 meses: Oudin

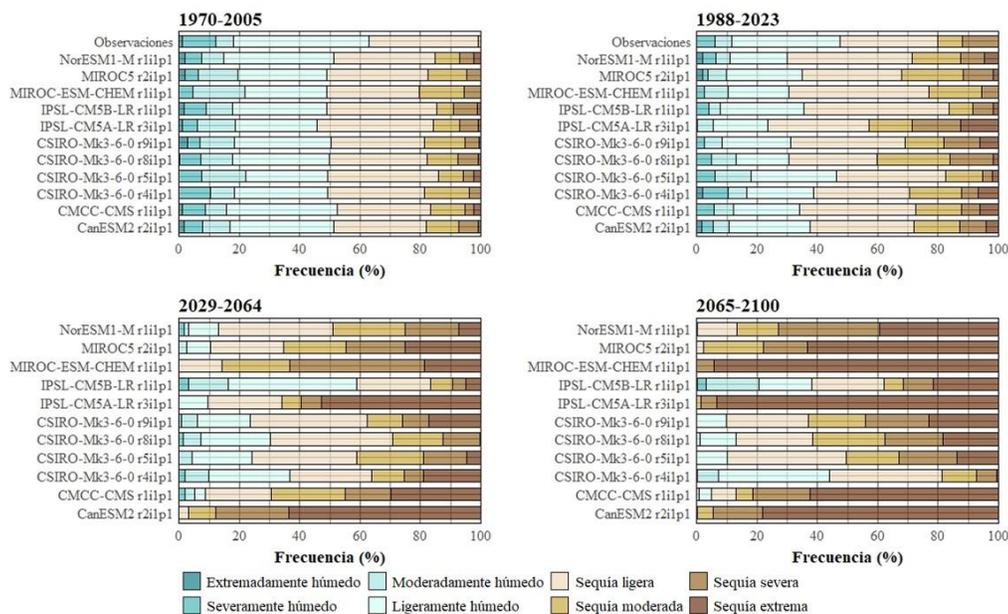


Figura 5-12: Frecuencia eventos, SPEI escala 24 meses, Oudin.

### 5.3.3 RAI

En la Tabla 5-12, se presentan los resultados del índice RAI (*Rainfall anomaly index*) de los datos registrados en la estación meteorológica Mataverí. Se observa que en el periodo histórico solo se producen condiciones muy secas en la escala de 12 y 48 meses, al cambiar el periodo al de 1988-2023 el número se incrementa a 36 en escala de 12 meses, 6 en escala de 24 meses y 10 en escala de 48 meses, mientras que se producen condiciones extremadamente secas en todas las escalas, siendo mayor en la escala de 48 meses con 5 eventos. Se observa también que la intensidad media de las sequías muy secas aumenta en las escalas de 12 y 24 meses al cambiar del periodo 1970-2005 al 1988-2023, mostrando el impacto del periodo de la megasequía. La duración de las sequías muy secas aumenta considerablemente en el periodo 1988-2023, en la escala de 12 meses pasa de 1 mes a 36 meses, y en la escala de 48 meses, de 1 mes a 69 meses.

Tabla 5-12: Resultados RAI periodo observado.

Índice		Nº sequías		Intensidad Media [-]		Duración Total [meses]		Frecuencia [%]	
Clasificación	RAI	1970-2005	1988-2023	1970-2005	1988-2023	1970-2005	1988-2023	1970-2005	1988-2023
Muy seco	12	1	36	-2,23	-2,30	1	36	0,2	5,7
	24	0	6	-2,04	-2,46	0	61	0,0	9,8
	48	1	10	-	-2,49	1	69	0,2	11,6

Índice		N° sequías		Intensidad Media [-]		Duración Total [meses]		Frecuencia [%]	
Clasificación	RAI	1970-2005	1988-2023	1970-2005	1988-2023	1970-2005	1988-2023	1970-2005	1988-2023
Extremadamente seco	12	0	4	-	-3,21	0	4	0,0	0,6
	24	0	1	-	-3,17	0	3	0,0	0,5
	48	0	5	-	-3,04	0	5	0,0	0,8

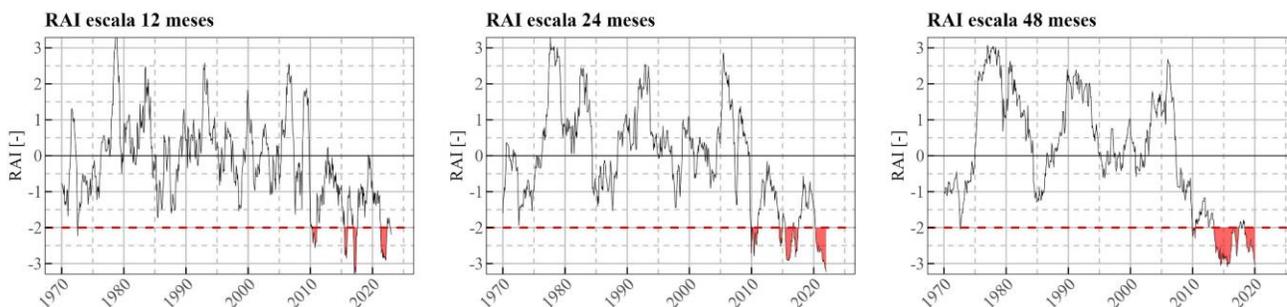


Figura 5-13: RAI, periodo observado.

La Tabla 5-13, presenta los resultados de dos GCMs en el periodo observado desde 1970 a 2023. Se observa que los modelos sobreestiman la cantidad de eventos en ambas clasificaciones, sin embargo, la intensidad media de los eventos es similar a la que se produce con los datos observados.

Tabla 5-13: Resultados RAI, GCMs periodo 1970-2023.

GCM	Índice		N° sequías		Intensidad Media [-]		Duración Total [meses]		Frecuencia [%]	
	Clasificación	RAI	1970-2005	1988-2023	1970-2005	1988-2023	1970-2005	1988-2023	1970-2005	1988-2023
CSIRO-Mk3-6-0 r1i1p1	Muy seco	12	19	25	-2,36	-2,36	42	78	9,8	18,2
		24	14	17	-2,31	-2,44	70	89	16,2	20,6
		48	8	14	-2,28	-2,21	65	107	15,3	24,9
	Extremadamente seco	12	3	4	-3,07	-3,13	6	11	1,4	2,6
		24	3	8	-3,20	-3,19	5	28	1,2	6,5
		48	3	2	-3,14	-3,20	11	19	2,6	4,4
NorESM1-M r1i1p1	Muy seco	12	7	17	-2,42	-2,42	29	67	6,8	15,6
		24	6	16	-2,70	-2,59	32	60	7,5	13,9
		48	3	14	-2,45	-2,44	22	97	5,1	22,5
	Extremadamente seco	12	2	6	-3,12	-3,13	5	27	1,2	6,3
		24	4	8	-3,02	-3,09	4	25	0,9	5,8
		48	1	5	-3,17	-3,17	4	27	0,9	6,3

En la Tabla 5-14, se muestran los resultados del RAI proyectados con los GCM para los periodos futuro cercano y lejano. Se observa que ambos modelos proyectan un número similar de condiciones muy secas en ambos periodos; sin embargo, el modelo NorESM1-1 r1i1p1 proyecta un mayor número de condiciones extremadamente secas para el futuro lejano, las que a su vez son más intensas y de mayor duración en comparación con las proyectadas por el modelo CSIRO-Mk3-6-0 r9i1p1. En cuanto a la frecuencia, el modelo NorESM1-1 r1i1p1 proyecta una mayor frecuencia en ambas categorías, presentando en el futuro lejano y a escala de 48 meses un 73% de condiciones extremadamente secas.

Tabla 5-14: Resultados RAI, GCMs periodos futuros.

GCM	Índice		N° sequías		Intensidad Media [-]		Duración Total [meses]		Frecuencia [%]	
	Clasificación	RAI	2029-2064	2065-2100	2029-2064	2065-2100	2029-2064	2065-2100	2029-2064	2065-2100
CSIRO-Mk3-6-0 r9i1p1	Muy seco	12	21	26	-2,43	-2,49	61	113	14,1	27,0
		24	17	27	-2,51	-2,36	54	108	12,5	26,5
		48	13	16	-2,59	-2,33	75	84	17,5	21,8
	Extremadamente seco	12	9	10	-3,31	-3,24	48	28	11,1	6,7
		24	8	8	-3,41	-3,30	66	46	15,3	11,3
		48	7	6	-3,28	-3,22	76	59	17,7	15,3
NorESM1-M r1i1p1	Muy seco	12	26	26	-2,42	-2,45	122	163	28,3	38,7
		24	17	19	-2,33	-2,50	88	196	20,5	47,9
		48	13	8	-2,37	-2,56	184	67	43,0	17,4
	Extremadamente seco	12	5	11	-3,18	-3,35	11	104	2,6	24,7
		24	3	11	-3,06	-3,30	9	124	2,1	30,3
		48	4	5	-3,02	-3,65	8	281	1,9	73,0

#### 5.4 Índice de Aridez de Martonne (AI)

En la Figura 5-14 se muestran los resultados del Índice de Aridez de Martonne a escala mensual para los cuatro periodos de estudio. En los gráficos el color azul corresponde a la categoría de clima subhúmedo, mientras que el color rojo está asociados a desiertos, se observa que a medida que avanza el tiempo, la frecuencia de climas secos va en aumento, ya que se incrementa la frecuencia asociada a clima semiárido de tipo mediterráneo, semidesierto y desierto. Los modelos IPSL-CM5B-LR r1i1p1 y CSIRO-Mk3-6-0 r4i1p1 son los que proyectan una menor variación de frecuencia de las condiciones más húmedas en el futuro, mientras que los modelos NorESM1-M r1i1p1 e IPSL-CM5A-LR r3i1p1 son los que proyectan una mayor frecuencia de climas más secos.

## Índice de Aridez de Martonne

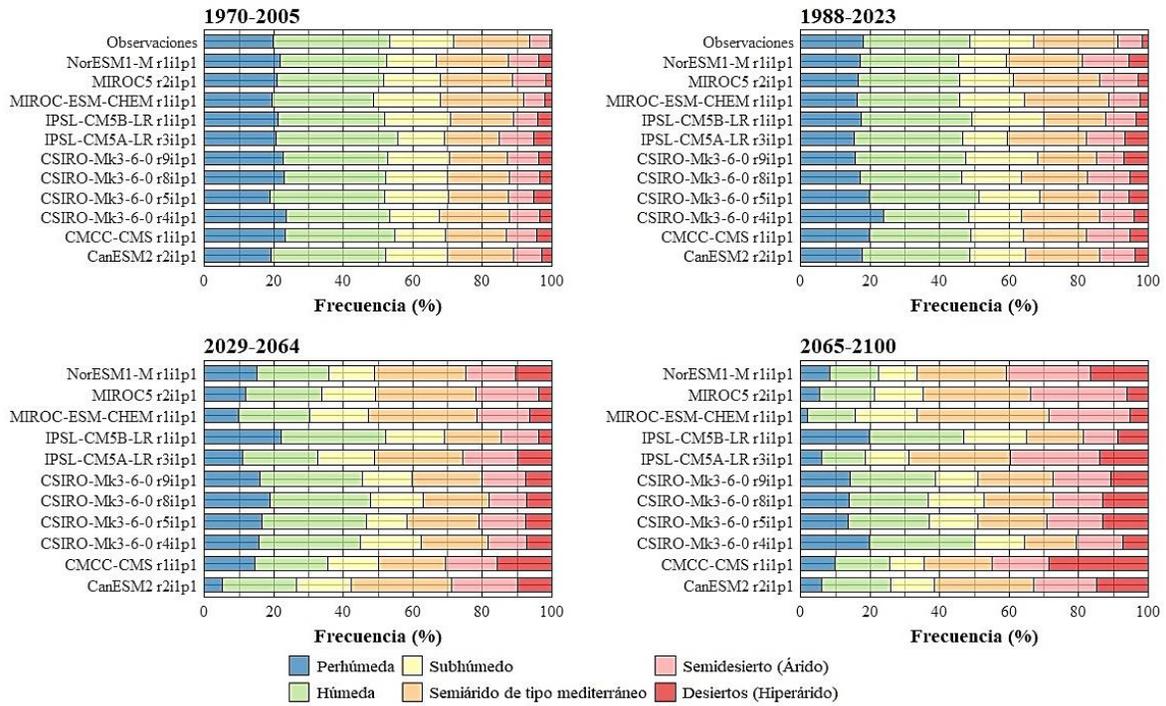


Figura 5-14: Frecuencia Índice de Aridez de Martonne.

## 6 CONCLUSIONES

El presente estudio tuvo por objetivo principal generar una propuesta metodológica para disminuir la incertidumbre en las proyecciones de índices de sequía obtenidos en la Isla Rapa Nui. Para esto se utilizó las variables de precipitación, temperatura media, máxima y mínima tanto de los datos registrados por la estación meteorológica Mataveri como de los datos sometidos a corrección de sesgo MBCn de ciertos modelos de circulación general del escenario RCP 8,5. Estos datos permitieron calcular la evapotranspiración potencial con tres métodos distintos de cálculo para, posteriormente, calcular índices de sequía meteorológica y el índice de Aridez de Martonne. Los principales resultados que permiten evaluar el impacto del cambio climático en la isla Rapa Nui se resumen a continuación:

1. Los resultados de corrección de sesgo varían de acuerdo con qué ventana de tiempo se utiliza para su cálculo. Esto se observó en la cantidad de días con precipitación, ya que al considerar como corrección la ventana futura completa (2006-2100), el método reordena los resultados de modo que se proyectan mayores días con precipitación al inicio y disminuye hacia el futuro. Al modificar el método de cálculo de la corrección para que considere el futuro como ventanas móviles de 35 años que es la misma cantidad que el periodo histórico (1970-2005), el problema del reorden se soluciona, lo que mejora el comportamiento de la proyección de los días con lluvia.
2. Tras aplicar el método MBCn, los GCMs ajustan mejor sus simulaciones de precipitación y temperatura al comportamiento histórico observado. Se proyecta una reducción del 24,3% en la precipitación anual para el futuro lejano (2065-2100), un incremento promedio de 1,9 [°C] para la temperatura media y máxima y un aumento de 2,2 [°C] en la temperatura mínima. La diferencia en las proyecciones de los GCMs seleccionados entre este estudio y el de Gatica y Toro, indica que el método de corrección de sesgo y la elección de ciertos modelos influye notablemente en las proyecciones de precipitación. El método QDM utilizado en el estudio de Gatica y Toro proyecta una menor reducción de las precipitaciones para el futuro lejano (2,9%).
3. Bajo el escenario RCP 8,5, el método de estimación de evapotranspiración que proyecta los menores valores de ETP anual es Thornthwaite, con una media de 956,3 [mm] en el periodo 1970-2023 obtenida a partir de los datos observados con este método los GCMs reproducen de buena forma la ETP en el periodo histórico, sin embargo, se recomienda a futuro comparar los resultados con algún producto satelital como el *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS). También se observó que Thornthwaite es el más sensible ante el incremento de las temperaturas y que Oudin simula los valores más altos de ETP en el periodo histórico, con una media de 1258,8 [mm] en el periodo observado y es a su vez el menos sensible ante el aumento de temperatura. El método de Hargreaves presenta mayor incertidumbre asociada a la proyección de los modelos GCM, lo que puede estar relacionado a que utiliza las tres temperaturas (media, máxima y mínima).

4. Los modelos GCM muestran una tendencia hacia el incremento en la frecuencia e intensidad de las sequías bajo el escenario RCP 8,5, en especial para el futuro lejano (2065-2100). Las proyecciones con los GCMs muestran mayor frecuencia y duración de sequías para el índice SPEI en comparación con el SPI, es decir, al no considerar la temperatura y evapotranspiración el índice tiende a subestimar el impacto del cambio climático en la isla. Al considerar los GCMs seleccionados, el índice SPI para una escala de 12 meses proyecta una frecuencia de 12,7% de sequías extremas en el futuro cercano (2029-2064), aumentando a un 25% en el futuro lejano. En contraste, el índice SPEI calculado con el método de Thornthwaite proyecta la mayor frecuencia de sequías extremas, alcanzando (para escala 12 meses) una frecuencia de 20,7% en el futuro cercano y de 45,6% en el periodo (2065-2100). De igual manera, el índice RAI muestra una tendencia hacia condiciones más secas, con una frecuencia promedio de 24,1% de condiciones extremadamente secas en el futuro lejano, mientras que el Índice de Aridez de Martonne proyecta una mayor frecuencia de climas desérticos en la isla, con un 12,6% en clasificación de desierto (hiperárido) para este mismo periodo.

Además, al evaluar el impacto del método de estimación de evapotranspiración potencial sobre el índice de sequía SPEI, se obtiene que con Thornthwaite, las condiciones de sequía severa y extrema son más frecuentes en comparación con los métodos Hargreaves y Oudin. Por ejemplo, en la escala de 12 meses, la frecuencia de sequías extremas durante el periodo (2065-2100) es de 45,6% con Thornthwaite, 26% con Hargreaves y 33,2% con Oudin. Esto confirma la hipótesis de que las proyecciones de los índices de sequía son sensibles al método de estimación de la ETP. Si el método es muy sensible al aumento de la temperatura, se un incremento en las condiciones secas relacionadas con el cambio climático, como ocurre en este caso con el método de Thornthwaite, que es el más sensible al incremento de temperatura y reporta una mayor frecuencia de condiciones de sequía severa y extrema.

A partir de estos resultados, se concluye que se cumplieron los objetivos propuestos para este estudio. En cuanto a la metodología propuesta, esta consiguió reducir la incertidumbre asociada a las proyecciones, aunque sigue existiendo debido a la variabilidad de las proyecciones climáticas de los GCM. No obstante, estas proyecciones indican un aumento en la frecuencia de eventos de sequías severas y extremas en el futuro. Los resultados obtenidos muestran la necesidad de incorporar el estudio del cambio climático en planes y estrategias orientadas a la adaptación y mitigación de sus efectos sobre la gestión de los recursos hídricos.

Como trabajo futuro, se propone calcular los índices e indicadores de sequía con todos los GCMs disponibles y luego realizar la selección de aquellos modelos que mejor representen los índices de sequía para el periodo histórico. De esta forma, se podrá evaluar si esto genera mejores resultados y una disminución de la incertidumbre. Fomentar este tipo de estudios es crucial para que las autoridades responsables de la toma de decisiones, especialmente en sistemas altamente vulnerables al cambio climático como la isla Rapa Nui, puedan adoptar medidas más informadas y efectivas.

## BIBLIOGRAFÍA

- Beguiría, S., Latorre, B., Reig, F., & Vicente-Serrano, S. M. (2023). *Tools*. SPEI: <https://spei.csic.es/index.html>
- Campos-Aranda, D. F. (2017). Cuantificación de sequías meteorológicas mensuales: cotejo de cuatro índices en tres localidades de San Luis Potosí, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, VII(3), págs. 159-172. <https://doi.org/> <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.24850/j-tyca-2017-03-11>
- Cannon, A. J. (2018). Multivariate quantile mapping bias correction: an N-dimensional probability density function transform for climate model simulations of multiple variables. *Clim Dyn*, 50, págs. 31-49. <https://doi.org/> <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3580-6>
- 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, págs. 6938-6959. <https://doi.org/> <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00754.1>
- CIREN. (27 de Octubre de 2021). *DEM Isla de Pascua y Juan Fernández*. IDE: <https://www.geoportal.cl/geoportal/catalog/35972/DEM%20Isla%20de%20Pascua%20y%20Juan%20Fern%C3%A1ndez>
- Comunidad indígena Ma'u Henua. (2024). *¿Quiénes somos?* Rapa Nui National Park: <https://rapanuinationalpark.com/quienes-somos/>
- CONAF. (1997). *Plan de manejo Parque Nacional Rapa Nui*. [https://www.conaf.cl/wp-content/files\\_mf/1382466339PNRapaNui.pdf](https://www.conaf.cl/wp-content/files_mf/1382466339PNRapaNui.pdf)
- CONAF. (2017). *Plan de Manejo del Parque Nacional Rapa Nui*. <https://www.conaf.cl/centro-documental/plan-de-manejo-del-pn-rapa-nui/>
- CONAF. (2019). *Catastro Recursos Vegetacionales y Usos de la Tierra, Isla de Pascua*. Sistema de Información Territorial SIT CONAF: <https://sit.conaf.cl/>
- CONAF. (2022). *CONAF Rapa Nui retira especies invasoras del humedal Rano Raraku*. CONAF: <https://www.conaf.cl/conaf-rapa-nui-retira-especies-invasoras-del-humedal-rano-raraku/#:~:text=Esta%20isla%20posee%20peque%C3%B1os%20humedales,%2C%20historia%2C%20tradiciones%20y%20arqueolog%C3%ADa.>
- Copernicus. (2021). *In situ total column ozone and ozone soundings from 1924 to present from the World Ozone and Ultraviolet Radiation Data Centre*. <https://doi.org/10.24381/cds.99842490>

- Copernicus. (2023). CMIP5 monthly data on single levels: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/projections-cmip5-monthly-single-levels?tab=form>
- CR2. (2024). *Simulaciones climáticas globales*. Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia: <https://www.cr2.cl/simulaciones-climaticas-globales/>
- De Martonne, E. (1925). *Traité de Géographie Physique*. París: Colin.
- DGA. (2019). *Aplicación de la metodología de actualización del Balance Hídrico Nacional en las cuencas de la parte sur de la Macrozona Austral e Isla de Pascua*. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/items/39a3bede-6818-4e9e-92c9-38c19d7265fd>
- DGA. (2024). *Derechos de aprovechamiento de aguas registrados en DGA*. Dirección general de aguas: [https://dga.mop.gob.cl/productosyservicios/derechos\\_historicos/Paginas/default.aspx](https://dga.mop.gob.cl/productosyservicios/derechos_historicos/Paginas/default.aspx)
- DGA, Montgomery & Associates Consultores Ltda. (2011). *Condiciones hidrogeológicas Isla de Pascua, Chile*. <https://snia.mop.gob.cl/sad/SUB5237.pdf>
- DGAC. (2024). *Servicios climáticos*. Dirección Meteorológica de Chile: <https://climatologia.meteochile.gob.cl/>
- Dictuc, & DGA. (28 de Mayo de 2021). *Estudio de perfeccionamiento de las capacidades de la DGA en gestión de ciclos de sequía y escasez*. Dirección General de Aguas: <https://dga.mop.gob.cl/DGADocumentos/Presentacion%20Final%20DGA%2028%20mayo%202021.pdf>
- Foerster, R. (2021). La ganadería en Rapa Nui, una variable económica política a considerar. *Chungará (Arica)*, 53(2). <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4067/S0717-73562021005001001>
- Garcia, F., & L'Hermite, P. (2018). *RAI*. Github: <https://github.com/flogrc/piflow/blob/master/R/rai.R>
- Gateño, F. (2022). *¿Cómo seleccionar modelos de circulación general para estudios regionales? propuesta metodológica basada en el desempeño histórico*. Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil, Santiago. <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/187203/Como-seleccionar-modelos-de-circulacion-general-para-estudios-regionales.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Gateño, F., Mendoza, P. A., Vásquez, N. A., Jiménez, H., Jerez, C., Lagos-Zúñiga, M., . . . Montserrat, S. (31 de Julio de 2023). Evaluating CMIP6 Models for climate impact assessments in Chile. *Earth's Future*. <https://doi.org/10.22541/essoar.169081521.10708502/v1>
- Gatica, C., & Toro, I. (2020). *Proyección de la frecuencia de eventos de sequía para Rapa Nui escenarios de cambio climático RCP 4,5 y 8,5*. <https://www.sochid.cl/congreso-xxiv-trabajo-39/>
- Gracia Serrano, P., Salgado G., J. C., & Lillo Zenteno, A. (2016). *Evaluación de parámetros físico-químicos de fuentes superficiales y subterráneas de la Isla de Pascua*. DGA, División de Estudios y Planificación, Santiago. <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://bibliotecadigital.ciren.cl/server/api/core/bitstreams/c7c6080a-dd96-4525-b835-1bd3109270ab/content>
- hola. (s.f.).
- IPCC. (2001). *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability, Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on*. Cambridge, UK y New York, USA: Cambridge University Press. [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WGII\\_TAR\\_full\\_report-2.pdf](chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WGII_TAR_full_report-2.pdf)
- IPCC. (2021). *Cambio climático 2021, Bases físicas Resumen para responsables de políticas*. <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-i/>
- IPCC. (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva, Switzerland. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- Jerez Toledo, C. (2021). *Estudio de los efectos e impactos del cambio climático mediante índices hidrológicos evaluados en eventos extremos en la cuenca del Río Bueno, Chile*. Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/183991>
- Jerez, C., Lagos-Zúñiga, M., & Montserrat, S. (2024). *Evaluating CMIP6 models under different statistical downscaling methods for climate assessments in the north of Chile*. <https://doi.org/https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-12446>
- Keyantash, J. (2023). *The Climate Data Guide: Standardized Precipitation Index (SPI)*. (National Center for Atmospheric Research Staff) NCAR Climate Data Guide: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/standardized-precipitation-index-spi>

- McKee, T., Doesken, N., & Kleist, J. (1993). The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales. *Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society*, págs. 179-184.
- Mercado Mancera, G., Troyo Dieguez, E., Aguirre Gómez, A., García Hernández, J. L., Murillo Amador, B., & Beltrán Morales, L. F. (2010). Calibración y aplicación del índice de aridez de De Martonne para el análisis del déficit hídrico como estimador de la aridez y desertificación en zona áridas. (U. J. Tabasco, Ed.) *Universidad y Ciencia*, 26(1), págs. 51-64. <http://cibnor.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1001/853>
- Mercado Mancera, G., Troyo Diéguez, E., Cruz Falcón, A., Nieto Garibay, A., Valdez Cepeda, R. D., García Hernández, J., & Murillo Amador, B. (2014). Análisis de la sequía y desertificación mediante índices de aridez y estimación de la brecha hídrica en Baja California Sur, noroeste de México. *Investigaciones geográficas*, págs. 66-81. <https://doi.org/dx.doi.org/10.14350/rig.32404>
- Milad Garrido, C. (2010). *Diagnóstico de los recursos hídricos subterráneos de Isla de Pascua*. Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil.
- MINAGRI, INE, ODEPA. (2022). *Atlas Rural de Chile*. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstreams/0cbb2805-292b-4097-97c0-d2649cd86b6f/download>
- MITECO. (2024). *Tipos de sequía*. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Gobierno de España: [https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/observatorio-nacional-de-la-sequia/que-es-la-sequia/observatorio\\_nacional\\_sequia\\_1\\_1\\_tipos\\_sequia.html#:~:text=Sequ%C3%ADa%20socioecon%C3%B3mica%3A,como%20consecuencia%20de%20la%20sequ%C3%ADa](https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/observatorio-nacional-de-la-sequia/que-es-la-sequia/observatorio_nacional_sequia_1_1_tipos_sequia.html#:~:text=Sequ%C3%ADa%20socioecon%C3%B3mica%3A,como%20consecuencia%20de%20la%20sequ%C3%ADa).
- MMA. (2020). *Recursos hídricos, sequías hidrológicas*. ARCLIM: [https://arclim.mma.gob.cl/atlas/view/sequias\\_hidrologicas/](https://arclim.mma.gob.cl/atlas/view/sequias_hidrologicas/)
- Municipalidad de Rapa Nui. (2024). *Competencias*. Municipalidad de Rapa Nui: <https://www.rapanui.net/secciones/3144>
- OMM y GWP. (2016). *Manual de indicadores e índices de sequía*. (M. Svoboda, & B. Fuchs, Edits.) Ginebra. [https://www.droughtmanagement.info/literature/WMO-GWP\\_Manual-de-indicadores\\_2016](https://www.droughtmanagement.info/literature/WMO-GWP_Manual-de-indicadores_2016)
- ONU. (13 de Diciembre de 2018). *Ciencia y tradiciones milenarias se unen en la remota Rapa Nui para enfrentar los desafíos ambientales*. ONU Programa para el medio ambiente:

<https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/reportajes/ciencia-y-tradiciones-milenarias-se-unen-en-la-remota-rapa-nui>

- Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andreassian, V., Anctilb, F., & Loumagne, C. (2005). *Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall–runoff model? Part 2—Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall–runoff modelling.*
- Pica-Téllez, A., Garreaud, R., Meza, F., Bustos, S., Falvey, M., Ibarra, M., . . . Dittborn, R. &. (2020). . *Informe Proyecto ARCLim: Atlas de Riesgos Climáticos para Chile.* Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia, Centro de Cambio Global UC y Meteodata para el Ministerio del Medio Ambiente a través de la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ), Santiago. [https://www.cr2.cl/wp-content/uploads/2021/03/Informe\\_ARCLIM\\_Consolidado.pdf](https://www.cr2.cl/wp-content/uploads/2021/03/Informe_ARCLIM_Consolidado.pdf)
- Podestá, G., Skansi, M., Herrera, N., & Veiga, H. (2020). *Descripción de índices para el monitoreo de sequía meteorológica implementados por el Centro Regional del Clima para el Sur de América del Sur.* Centro Regional del Clima para el Sur de América del Sur. [https://www.crc-sas.org/es/content/monitoreo/reporte\\_sequias.pdf](https://www.crc-sas.org/es/content/monitoreo/reporte_sequias.pdf)
- Programa Cambio Climático en Rapa Nui. (2023). *Rapa Nui en la COP28: La adaptación al cambio climático es urgente para las islas de Polinesia.* Amua Te Oka: <https://www.amuateoka.org/rapa-nui-en-la-cop28-la-adaptacion-al-cambio-climatico-es-urgente-para-las-islas-de-polinesia/>
- Quilliam, L., Cox, R., Campbell, P., & Wright, M. (2014). Coastal climate change impacts for Easter Island in 2100. *Rapa Nui Journal*, 28(1). <https://evols.library.manoa.hawaii.edu/server/api/core/bitstreams/0afdfd50-9bc7-46b4-9cca-eed5759e9e75/content>
- Roman, M. (2023). *¿Qué hace especial al Humedal Ava Ranga Uka?* (Department of Environmental Sciences, Informatics and Statistics University of Venice, Italy) Rano Rapanui: <https://ranorapanui.org/que-hace-especial-al-humedal-ava-ranga-uka/>
- Rull del Castillo, V. (2016). *La isla de Pascua: una visión científica.* CSIC. <https://www.digitaliapublishing.com/a/45819>
- Sadiq, A., Suleman, M., & Mohammed, U. (2020). An estimation of Rainfall Anomaly Index and its impact on crop production in Yola and environs. *African Journal of Environment and Natural Science Research*, 3, págs. 35-53. [https://abjournals.org/ajensr/wp-content/uploads/sites/15/journal/published\\_paper/volume-3/issue-4/AJENSR\\_LTPC9C8A.pdf](https://abjournals.org/ajensr/wp-content/uploads/sites/15/journal/published_paper/volume-3/issue-4/AJENSR_LTPC9C8A.pdf)

- Sánchez Martínez, M. I. (2001). Métodos de estimación de evapotranspiración. *Revista de Geografía Norte Grande*, 28, págs. 3-10.
- SASIPA SpA. (2023). *Reporte Integrado Memoria corporativa 2023*. Isla de Pascua. <https://www.sasipa.cl/wp-content/uploads/memorias/memoria2023.pdf>
- SEA. (2023). *CRITERIO DE EVALUACIÓN EN EL SEIA: Cambio climático en la evaluación ambiental del recurso hídrico*. [https://www.sea.gob.cl/sites/default/files/adjuntos/noticias/Resoluci%C3%B3n\\_202399101883\\_DT\\_Cambio%20clim%C3%A1tico%20en%20recursos%20h%C3%ADricos\\_2023.pdf](https://www.sea.gob.cl/sites/default/files/adjuntos/noticias/Resoluci%C3%B3n_202399101883_DT_Cambio%20clim%C3%A1tico%20en%20recursos%20h%C3%ADricos_2023.pdf)
- Subsecretaría de Turismo. (2024). *Visitas al Sistema Nacional de Áreas silvestres protegidas por el Estado*. Subsecretaría de Turismo: <https://www.subturismo.gob.cl/estadisticas-y-estudios/otros-informes-y-estadisticas/snaspe/>
- Toro Mena, I., Morales Jamett, H., Loyola Vidal, C., González Valenzuela, R., & Buschiazzi, E. (2023). *Criterios de selección de modelos de cambio climático para balances de agua estocásticos diarios*. <https://www.sochid.cl/publicaciones-sochid/congresos-chilenos/congreso-xxvi/congreso-xxvi-trabajo-cli-04/>
- Toro, I., Morales, H., Loyola, C., & Chadwick, C. (2023). Proyección de precipitaciones máximas y precipitación máxima probable para Rapa Nui, escenarios SSP 2-4,5 y 5-8,5. *XXVI Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica*. <https://www.sochid.cl/publicaciones-sochid/congresos-chilenos/congreso-xxvi/congreso-xxvi-trabajo-cli-02/>
- Toro, I., Santander, A., & El Berd, S. (2022). *Proyecciones de evaporación en estudios de cambio climático*. Water Congres 2022: <https://gecamin.com/watercongress/>
- UNEP, UNESCO, Union of Concerned Scientists. (2016). *World Heritage and Tourism in a Changing Climate*. <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/7603;jsessionid=C0ECAA44A5D07CDA8115473B99883C1E>
- Valiente, Ó. M. (2001). Sequía: Definiciones, tipologías y métodos de cuantificación. *Investigaciones geográficas*(26), págs. 59-80. <https://dialnet.unirioja.es/download/articulo/111741.pdf>
- van Rooy, M.P. (1965). A Rainfall Anomaly Index Independent of Time and Space. *Notos*, 14, págs. 43–48.

Vicente-Serrano, S. M. (2024). *Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI)*. (National Center for Atmospheric Research Staff ) Climate Data Guide: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/standardized-precipitation-evapotranspiration-index-spei>

## ANEXOS

### ANEXO A: HUMEDALES ISLA RAPA NUI

La isla Rapa Nui cuenta con tres humedales, los cuales son parte importante del patrimonio histórico y cultural de la isla (CONAF, 2022). A continuación, se describirá cada uno:

- Humedal Rano Kau (Figura A.1): Es el humedal más grande la de isla, en su interior alberga una laguna de agua dulce, donde se pueden observar cuerpos de totora, en las laderas del cráter se plantaron diversos árboles frutales como paltos, higueras, plátanos.



*Figura A.1: Humedal Rano Kau.*

- Humedal Rano Raraku (Figura A.2): Este humedal posee un gran valor arqueológico ya que fue la cantera donde se tallaron la mayor cantidad de moai de la isla, en la actualidad aún quedan cerca de 400 estatuas en diferentes etapas de labrado en la ladera sur del volcán. Este lugar fue también el escenario para una de las competencias más tradicionales de la Tapati (fiesta tradicional), la Tau'a similar a un triatlón, en donde se alternan tres modalidades de carreras tradicionales: Vaka Ama, remo en bote de totora, Aka Venga, maratón cargando racimos de plátanos y Pora, natación sobre flotadores de totora (Municipalidad de Rapa Nui, 2024). Actualmente, esta competencia no se puede realizar en el humedal, ya que las autoridades de la isla desean resguardarlo debido a su estado de deterioro causado por la erosión, el cambio climático, y otros factores. En octubre de 2022, el humedal sufrió un incendio forestal que destruyó su cubierta vegetal y secó el espejo de agua dentro del humedal. Para febrero de 2024, el humedal presenta nuevamente cuerpos de totora en su interior, pero en los bordes del cráter ha crecido en abundancia vegetación invasora, por lo que CONAF ha realizado campañas para retirar estas especies invasoras.



*Figura A.2: Humedal Rano Raraku.*

- Humedal Ava Ranga Uka (Figura A.3): Este humedal se ubica muy cerca de Maunga Terevaka, el punto más alto de la isla. El humedal del Complejo Rano Aroi – Ava Ranga Uka se alimenta de un manantial conectado al acuífero principal de la isla, así como del aporte de las lluvias (Roman, 2023). Se ha visto afectado por extracciones de agua desde su interior, en el sector se presentan diversos sistemas de tuberías que evidencian la extracción de agua desde el humedal (Figura A.4).



*Figura A.3: Humedal Ava Ranga Uka.*



*Figura A.4: Tuberías que salen de dentro del humedal Rano Aroi.*

## ANEXO B: MODELOS DE CIRCULACIÓN GENERAL

A continuación, se presenta en la Tabla B-1 información más detallada sobre los GCMs corregidos con el método MBCn, detallando su resolución y centro de investigación.

*Tabla B-1: Información general de los GCMs corregidos con MBCn.*

<b>Modelo GCM</b>	<b>Esamble</b>	<b>Resolución horizontal (lon.x lat.)</b>	<b>Centro de investigación</b>
ACCESS1-0	r1i1p1	1,875°x1,25°	<i>Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Australia (CSIRO), y Bureau of Meteorology (BOM), Australia</i>
ACCESS1-3	r1i1p1	1,875°x1,25°	
bcc-csm1-1-m	r1i1p1	1,125°x1,112°	<i>Beijing Climate Center (BCC), Meteorological Administration, China</i>
BNU-ESM	r1i1p1	2,813°x2,767°	<i>GCESS (Geophysical and Climate System Science), BNU (Beijing Normal University), Beijing, China</i>
CanESM2	r1i1p1, r2i1p1, r3i1p1, r4i1p1, r5i1p1	2,813°x2,767°	<i>CCCma (Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, Victoria, BC, Canada)</i>
CMCC-CESM	r1i1p1	3,750°x3,680°	<i>CMCC (Centro Euro-Mediterraneo per i Cambiamenti Climatici), Italia</i>
CMCC-CM	r1i1p1	0,750°x0,742°	
CMCC-CMS	r1i1p1	1,875°x1,849°	
CNRM-CM5	r1i1p1	1,406°x1,389°	<i>Centre National de Recherches Météorologiques/Centre Européen de Recherche et Formation Avancée en Calcul Scientifique (CNRM-CERFACS), Francia</i>
CSIRO-Mk3-6-0	r1i1p1, r2i1p1, r3i1p1, r4i1p1, r5i1p1, r6i1p1, r7i1p1, r8i1p1, r9i1p1, r10i1p1	1,875°x1,849°	<i>Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO) en colaboración con Queensland Climate Change Centre of Excellence (QCCCE), Australia</i>
EC-EARTH	r2i2p1, r8i1p1, r12i1p1	1,125°x1,112°	<i>EC-Earth consortium</i>
FGOALS-s2	r1i1p1	2,813°x1,645°	<i>Institute of Atmospheric Physics (IAP), China</i>
GFDL-CM3	r1i1p1	2,5°x2,0°	<i>NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL), Estados Unidos</i>
inmcm4	r1i1p1	2,0°x1,5°	<i>Institute of Numerical Mathematics (INM), Rusia</i>

<b>Modelo GCM</b>	<b>Esamble</b>	<b>Resolución horizontal (lon.x lat.)</b>	<b>Centro de investigación</b>
IPSL-CM5A-LR	r1i1p1, r2i1p1, r3i1p1, r4i1p1	3,75°x1,895°	<i>Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL), Francia</i>
IPSL-CM5A-MR	r1i1p1	2,5°x1,268°	
IPSL-CM5B-LR	r1i1p1	3,75°x1,895°	
MIROC-ESM-CHEM	r1i1p1	2,813°x2,767°	<i>Model for Interdisciplinary Research on Climate (MIROC) Atmosphere and Ocean Research Institute (AORI) National Institute for Environmental Studies (NIES) JAMSTEC, Japón</i>
MIROC-ESM	r1i1p1	2,813°x2,767°	
MIROC5	r1i1p1, r2i1p1, r3i1p1	1,406°x1,389°	
MPI-ESM-LR	r1i1p1, r2i1p1, r3i1p1	1,875°x1,849°	<i>Max-Planck-Institut (MPI) for Meteorology, Alemania</i>
MPI-ESM-MR	r1i1p1	1,875°x1,849°	
MRI-CGCM3	r1i1p1	1,125°x1,112°	<i>Meteorological Research Institute (MRI), Japón</i>
NorESM1-M	r1i1p1	2,50°x1,895°	<i>Norwegian Climate Center (NCC), Noruega</i>

En la Tabla B-2, se presenta el error porcentual entre la precipitación registrada en la estación meteorológica Mataveri y la precipitación simulada por los modelos de circulación general corregidos con el método MBCn. A continuación, se explica el color de las celdas resaltadas:

- Rojo: Se destaca las celdas de los GCMs que poseen error mayor a  $\pm 10\%$ .
- Verde: GCMs que cumplen con el criterio de presentar error mayor a  $\pm 10\%$  en solo 2 meses al año.
- Naranja: GCMs que respetan el criterio anterior, pero se descartan por inspección visual de acuerdo con su comportamiento en la CVE de precipitación.
- Amarillo: GCMs seleccionados que poseen menor valor absoluto de error porcentual.

Tabla B-2: Error porcentual entre precipitación observada y precipitación de los GCMs, periodo 1970-2023.

Modelo GCM	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Promedio
ACCESS1-0 r1i1p1	13,0%	11,6%	16,5%	11,7%	20,9%	23,2%	24,4%	-4,0%	3,1%	-1,9%	4,2%	12,0%	11,2%
ACCESS1-3 r1i1p1	1,0%	0,8%	-2,3%	32,0%	13,5%	17,8%	6,9%	0,4%	7,9%	0,4%	27,1%	9,7%	9,6%
bcc-csm1-1-m r1i1p1	7,9%	7,2%	6,4%	17,8%	11,6%	13,8%	7,1%	2,2%	17,0%	6,3%	2,7%	12,2%	9,4%
BNU-ESM r1i1p1	15,8%	-5,1%	-3,4%	19,8%	3,5%	8,3%	-8,4%	4,9%	3,0%	-13,7%	3,2%	6,3%	2,9%
CanESM2 r1i1p1	-4,9%	2,4%	-12,2%	11,1%	6,4%	19,3%	-0,7%	0,7%	16,0%	-11,1%	-12,8%	-6,1%	0,7%
CanESM2 r2i1p1	4,4%	-2,3%	-3,7%	15,2%	-5,0%	7,3%	13,6%	-3,6%	7,3%	-9,4%	-4,4%	7,4%	2,2%
CanESM2 r3i1p1	-3,7%	9,9%	-5,0%	12,2%	2,2%	0,3%	12,6%	13,6%	19,1%	8,3%	0,6%	5,4%	6,3%
CanESM2 r4i1p1	-2,1%	8,3%	7,5%	11,7%	5,0%	9,0%	-5,4%	0,9%	20,3%	5,8%	8,2%	-1,9%	5,6%
CanESM2 r5i1p1	19,9%	12,6%	-6,9%	15,1%	16,0%	4,9%	-3,5%	-1,1%	9,3%	-11,7%	-6,8%	6,8%	4,6%
CMCC-CESM r1i1p1	1,4%	-5,9%	6,1%	29,6%	-0,5%	24,2%	-8,0%	-9,9%	-5,0%	1,1%	1,3%	-2,7%	2,6%
CMCC-CM r1i1p1	-0,5%	16,9%	-4,6%	12,5%	-0,8%	11,8%	6,1%	12,1%	9,0%	-13,4%	8,8%	2,4%	5,0%
CMCC-CMS r1i1p1	18,5%	1,0%	-3,6%	19,8%	2,1%	3,4%	4,3%	4,5%	1,5%	-7,6%	1,1%	0,5%	3,8%
CSIRO-Mk3-6-0 r10i1p1	10,8%	14,9%	7,9%	6,4%	2,7%	11,3%	-7,6%	-3,9%	2,7%	3,7%	4,6%	5,2%	4,9%
CSIRO-Mk3-6-0 r1i1p1	12,2%	9,6%	-3,8%	14,0%	15,5%	16,1%	5,0%	8,5%	2,9%	-12,2%	5,1%	9,5%	6,9%
CSIRO-Mk3-6-0 r2i1p1	10,9%	1,8%	12,1%	10,6%	16,5%	9,6%	9,1%	3,3%	-3,6%	3,3%	10,1%	11,9%	8,0%
CSIRO-Mk3-6-0 r3i1p1	0,6%	0,9%	-10,4%	3,7%	12,8%	6,7%	16,1%	24,0%	0,0%	-9,0%	9,7%	13,7%	5,7%
CSIRO-Mk3-6-0 r4i1p1	11,5%	0,7%	8,2%	14,5%	-2,3%	8,3%	0,2%	-1,7%	1,3%	-2,2%	-0,2%	2,4%	3,4%
CSIRO-Mk3-6-0 r5i1p1	10,4%	7,7%	2,2%	4,9%	8,9%	0,3%	-0,3%	2,3%	8,0%	-9,9%	18,4%	8,8%	5,1%
CSIRO-Mk3-6-0 r6i1p1	14,7%	1,9%	1,4%	12,0%	19,4%	-3,1%	5,9%	4,3%	1,0%	-10,0%	-6,3%	6,4%	4,0%
CSIRO-Mk3-6-0 r7i1p1	3,0%	5,1%	17,3%	8,0%	5,4%	7,7%	-2,6%	-11,5%	17,5%	-10,1%	-5,6%	3,7%	3,2%
CSIRO-Mk3-6-0 r8i1p1	4,7%	-0,2%	-1,2%	2,8%	2,8%	-1,8%	-5,7%	-12,5%	-3,2%	-16,2%	-2,2%	1,6%	-2,6%
CSIRO-Mk3-6-0 r9i1p1	4,5%	-4,7%	-2,5%	3,6%	-0,1%	2,7%	-3,6%	-1,4%	6,0%	-19,4%	8,1%	10,6%	0,3%
EC-EARTH r12i1p1	23,5%	20,4%	6,9%	29,1%	13,4%	17,2%	5,0%	10,2%	26,1%	5,6%	11,1%	22,0%	15,9%
EC-EARTH r2i1p1	14,9%	-2,1%	1,0%	16,1%	5,4%	1,0%	18,7%	11,0%	12,4%	5,5%	12,3%	11,9%	9,0%

Modelo GCM	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Promedio
EC-EARTH r9i1p1	12,2%	2,7%	11,1%	22,1%	12,6%	19,2%	4,7%	-2,7%	4,5%	2,6%	4,7%	5,7%	8,3%
FGOALS-s2 r1i1p1	-3,8%	-5,2%	-4,1%	19,5%	0,8%	6,0%	-4,4%	3,3%	-5,0%	-11,2%	-10,3%	7,8%	-0,5%
GFDL-CM3 r1i1p1	11,7%	1,1%	-3,1%	15,2%	7,0%	1,6%	-7,8%	-6,4%	19,5%	-21,3%	-9,4%	-9,2%	-0,1%
inmcm4 r1i1p1	6,1%	21,0%	-3,4%	20,4%	22,4%	13,2%	10,9%	28,8%	17,9%	17,8%	5,5%	14,1%	14,6%
IPSL-CM5A-LR r1i1p1	4,4%	8,2%	0,7%	-2,0%	-2,7%	0,0%	-11,0%	-1,2%	26,1%	-12,0%	4,7%	7,2%	1,9%
IPSL-CM5A-LR r2i1p1	9,8%	-0,4%	-4,6%	20,2%	20,7%	-3,0%	-3,5%	-15,3%	15,4%	-10,3%	-2,1%	-4,1%	1,9%
IPSL-CM5A-LR r3i1p1	6,7%	-7,8%	-11,0%	2,3%	5,7%	4,2%	1,3%	-9,5%	1,9%	-19,9%	-3,5%	4,0%	-2,1%
IPSL-CM5A-LR r4i1p1	-1,1%	-0,4%	1,2%	14,6%	3,5%	5,3%	7,6%	0,1%	6,4%	-11,5%	12,5%	13,0%	4,3%
IPSL-CM5A-MR r1i1p1	7,6%	20,4%	-1,7%	12,4%	2,3%	12,3%	3,6%	-3,1%	4,5%	-10,6%	1,4%	4,3%	4,4%
IPSL-CM5B-LR r1i1p1	6,3%	-8,7%	-0,8%	15,8%	4,3%	6,1%	7,8%	14,5%	-0,3%	9,8%	6,2%	9,2%	5,9%
MIROC-ESM-CHEM r1i1p1	15,8%	5,0%	-5,9%	4,7%	-2,7%	10,6%	-1,5%	6,7%	4,5%	-4,0%	-9,0%	6,5%	2,6%
MIROC-ESM r1i1p1	8,1%	5,5%	5,5%	6,3%	14,3%	11,3%	-4,0%	5,5%	21,9%	-5,3%	-5,4%	15,2%	6,6%
MIROC5 r1i1p1	-9,8%	4,9%	10,0%	5,9%	15,3%	7,9%	0,4%	-2,3%	7,9%	19,1%	0,3%	-5,1%	4,5%
MIROC5 r2i1p1	0,8%	-1,9%	-0,7%	13,0%	1,8%	2,9%	-2,7%	4,3%	3,3%	-5,7%	2,0%	10,0%	2,3%
MIROC5 r3i1p1	12,9%	21,3%	4,0%	11,8%	3,7%	10,8%	-1,2%	-4,2%	-5,5%	3,0%	10,2%	-1,3%	5,5%
MPI-ESM-LR r1i1p1	7,6%	3,2%	11,5%	21,8%	23,2%	8,5%	0,2%	21,8%	35,9%	22,2%	-6,5%	-1,7%	12,3%
MPI-ESM-LR r2i1p1	1,3%	3,4%	-8,5%	17,8%	3,2%	-3,7%	27,2%	11,2%	0,4%	-0,1%	5,5%	14,5%	6,0%
MPI-ESM-LR r3i1p1	-1,9%	8,3%	-9,3%	17,4%	13,2%	5,5%	28,6%	-0,4%	-1,2%	-3,7%	10,7%	5,1%	6,0%
MPI-ESM-MR r1i1p1	2,1%	-2,3%	22,3%	22,3%	19,3%	19,5%	20,6%	1,6%	14,6%	8,8%	10,3%	20,5%	13,3%
MRI-CGCM3 r1i1p1	3,8%	-4,6%	-5,7%	27,8%	10,4%	9,1%	6,5%	17,3%	8,8%	-11,1%	11,3%	8,5%	6,8%
NorESM1-M r1i1p1	-5,3%	1,4%	-2,1%	19,7%	3,1%	5,0%	-6,4%	0,8%	-1,8%	-17,3%	4,0%	-9,9%	-0,7%

## ANEXO C: PROYECCIONES CLIMÁTICAS

A continuación, se presentan las curvas de variación estacional de las temperaturas para todos los periodos de estudio: 1970-2005, 1988-2023, 2029-2064 y 2065-2100. Se observa que tanto para la temperatura media como para la máxima y mínima, se registran los valores más altos entre los meses de enero y abril, mientras que las temperaturas más bajas ocurren entre los meses de junio y octubre. A partir de los gráficos, se observa que los GCMs proyectan un aumento de temperatura en la isla, y es aún más notorio en el futuro lejano (2065-2100).

Curva de Variación Estacional Temperatura Máxima

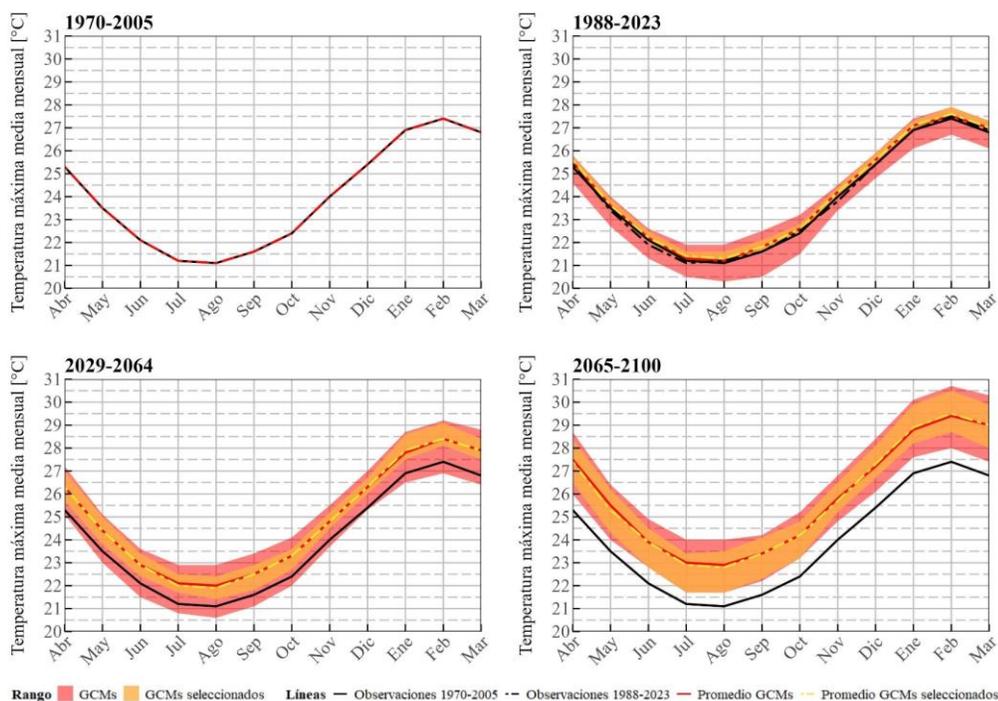


Figura C.1: Curva de variación estacional de temperatura máxima.

### Curva de Variación Estacional Temperatura media

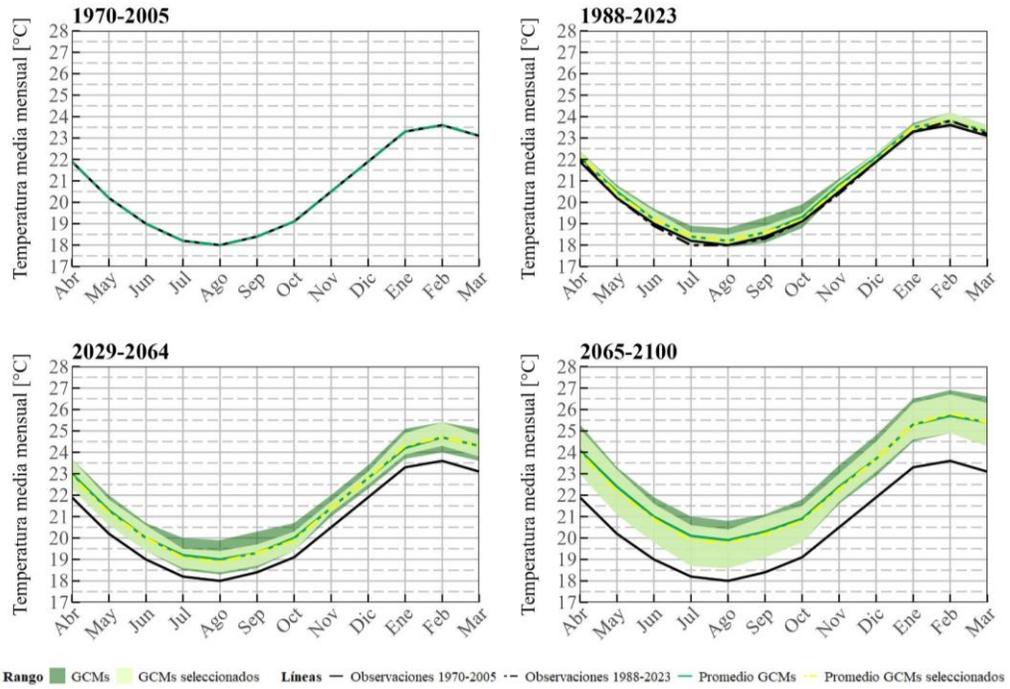


Figura C.2: Curva de variación estacional de temperatura media.

### Curva de Variación Estacional Temperatura Mínima

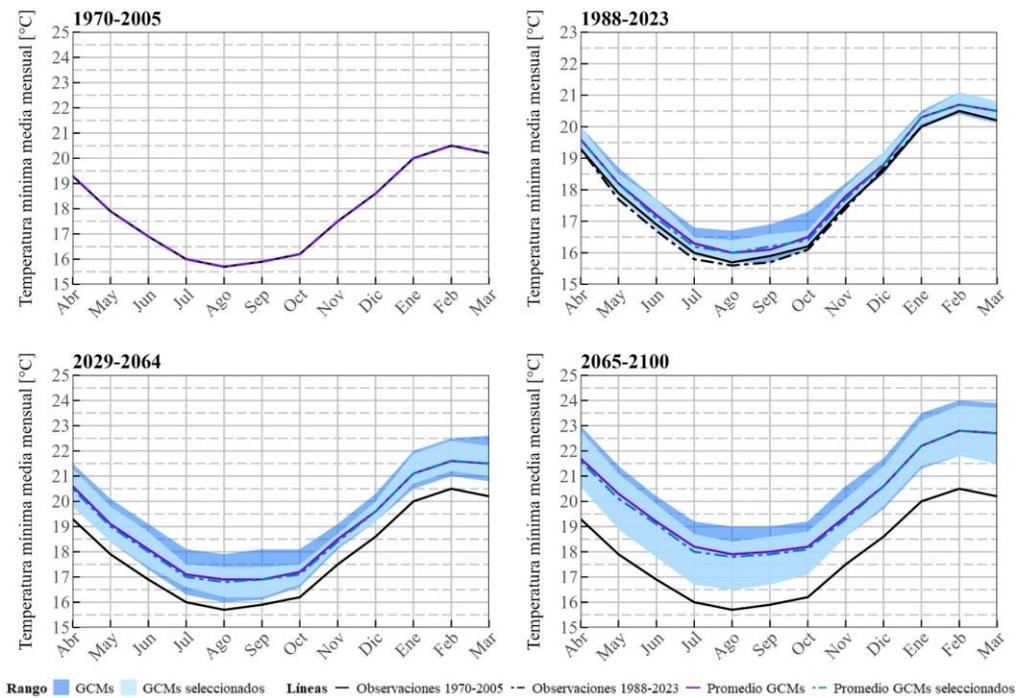


Figura C.3: Curva de variación estacional de temperatura mínima.

La Tabla C-1, presenta la media, desviación estándar y variación de todos los GCMs corregidos con el método MBCn dentro de los periodos de estudio. Al comparar esta tabla con la Tabla 5-2, se observa que, tanto para la precipitación como para la temperatura media, la desviación estándar de los resultados aumenta si no se seleccionan GCMs. Por ejemplo, en el futuro lejano, la desviación estándar de la precipitación disminuye de 281,0 a 252,5 [mm] al seleccionar GCMs, mientras que para la temperatura media disminuye de 1,6 a 0,6 [°C]. Esto sugiere que la selección de modelos reduce la incertidumbre en los resultados, ya que un menor valor de desviación estándar indica menor dispersión y mayor consistencia en las proyecciones entre los modelos que fueron seleccionados.

*Tabla C-1: Resultados corrección de sesgo MBCn, todos los GCMs.*

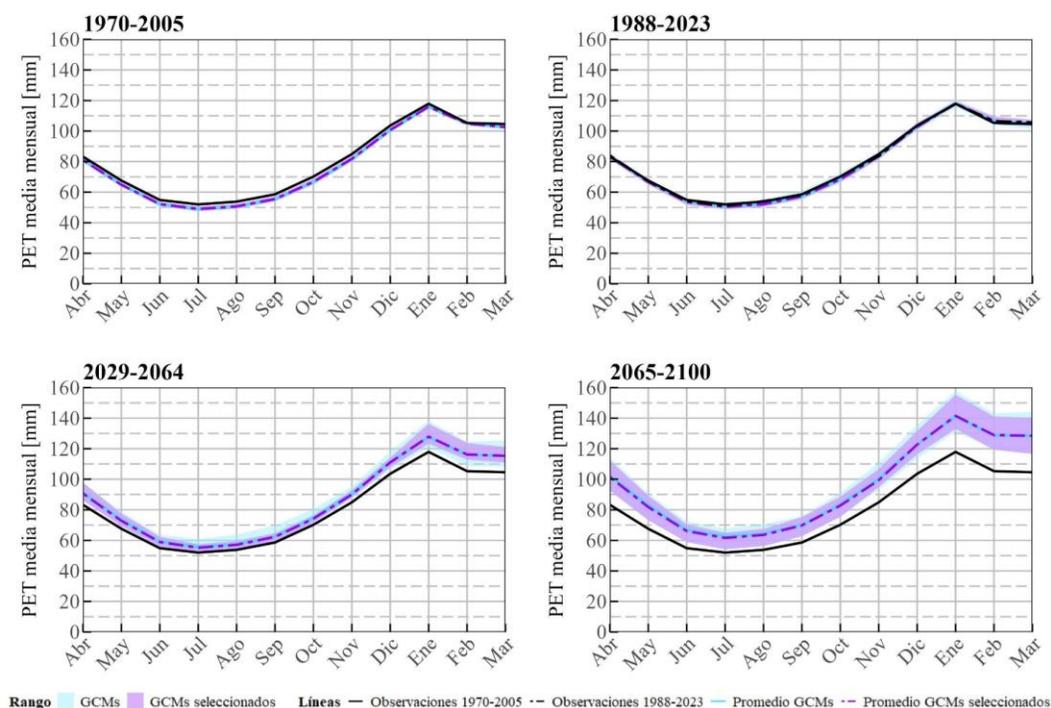
Rapa Nui	RCP 8,5											
	Precipitación			Temperatura media			Temperatura mínima			Temperatura máxima		
	Periodo	Media [mm]	Desv. Est [mm]	$\Delta$ [%]	Media [°C]	Desv. Est [°C]	$\Delta$ [°C]	Media [°C]	Desv. Est [°C]	$\Delta$ [°C]	Media [°C]	Desv. Est [°C]
Observaciones (1970-2023)	1.130	302,4	-	20,6	0,3	-	17,8	0,4	-	24,0	0,5	-
Histórico (1970-2005)	1.204	334,7	-	20,6	0,5	-	17,9	0,5	-	24,0	0,4	-
1988-2023	1.165	339,7	-	20,8	0,5	-	18,2	0,6	-	24,1	0,5	-
F. Cercano (2029-2064)	1.010	308,5	-10,7	20,9	1,6	+0,3	18,9	0,5	+1,0	24,8	0,4	+0,8
F. Lejano (2065-2100)	895	281,0	-20,8	22,5	1,6	+1,9	20,0	0,5	+2,2	25,8	0,4	+1,9

*Nota.* La celda de color celeste representa los valores medios anuales de las variables registradas en la estación meteorológica Mataveri.

## ANEXO D: EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL

En la Figura D.1, Figura D.2 y Figura D.3 se presentan las curvas de variación estacional de la evapotranspiración potencial obtenidas mediante los diferentes métodos de cálculo. Se observa que en el mes de enero es cuando se registra los mayores valores de evapotranspiración para los tres métodos, mientras el mes de julio muestra los valores más bajos. Se observa que para el futuro cercano (2029-2064) y lejano (2065-2100) se proyecta un aumento en el valor de la evapotranspiración potencial, lo que se relaciona con la proyección de incremento de las temperaturas.

**Curva de Variación Estacional Evapotranspiración Potencial con Thornthwaite**



*Figura D.1: CVE evapotranspiración potencial, Thornthwaite.*

### Curva de Variación Estacional Evapotranspiración Potencial con Hargreaves

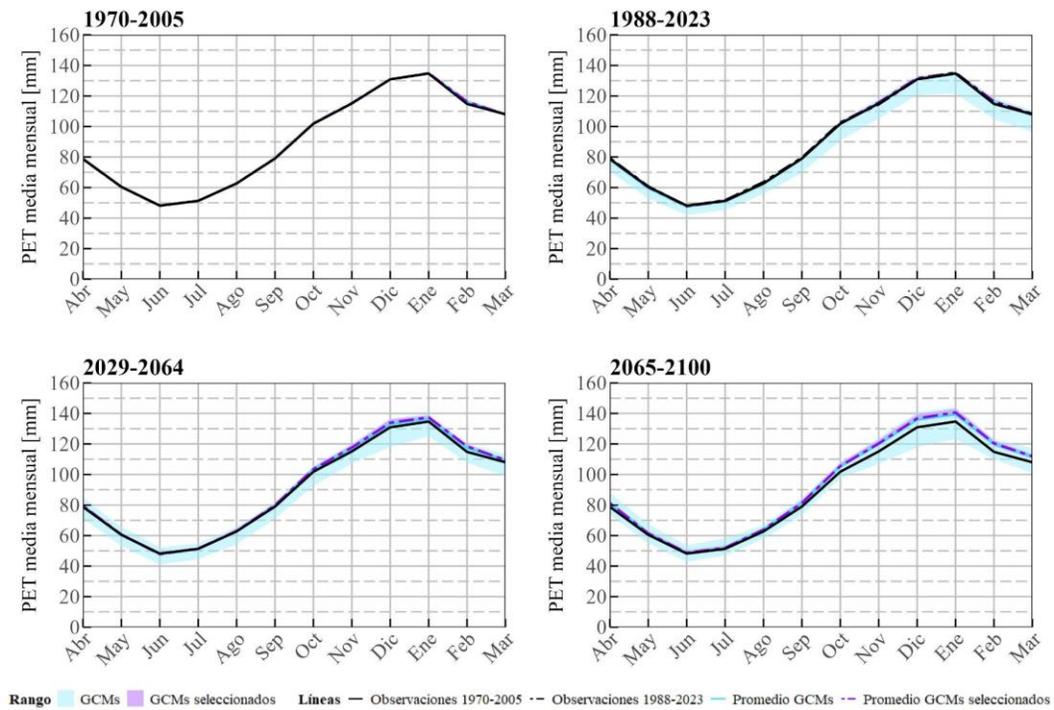


Figura D.2: CVE evapotranspiración potencial, Hargreaves.

### Curva de Variación Estacional Evapotranspiración Potencial con Oudin

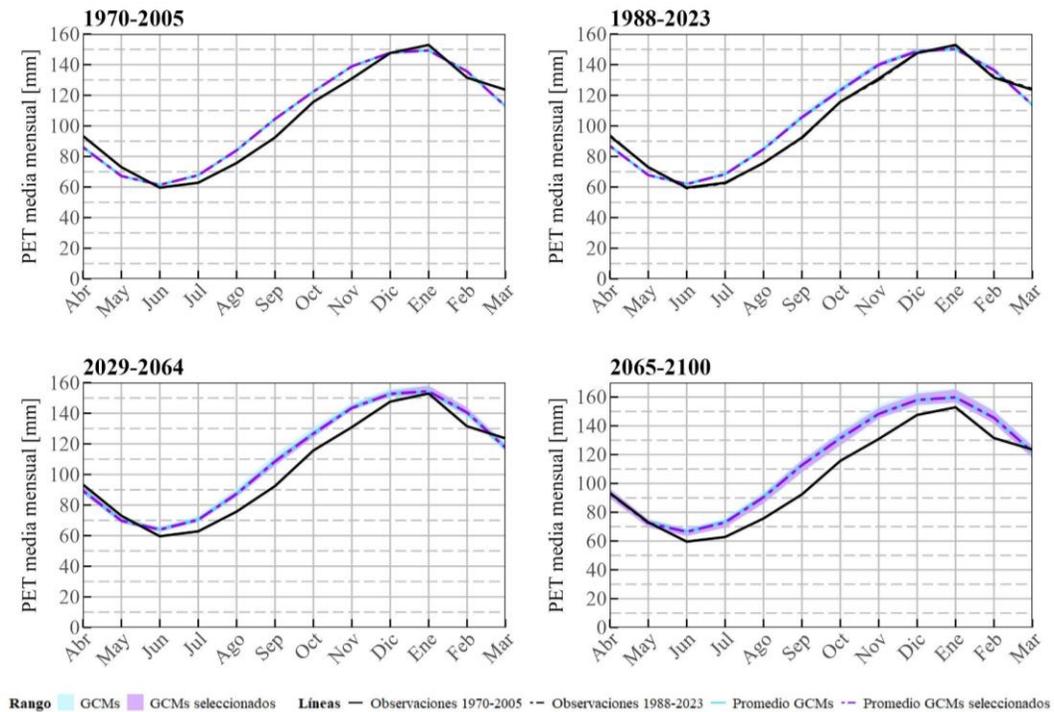


Figura D.3: CVE evapotranspiración potencial, Oudin.

En la Tabla D-1, se presenta el error anual de la ETP entre los datos observados y los simulados por cada GCM en el periodo 1970-2005.

*Tabla D-1: Error de la evapotranspiración anual.*

<b>Modelo GCM</b>	<b><math>\Delta</math> Thornthwaite [mm/año]</b>	<b><math>\Delta</math> Hargreaves [mm/año]</b>	<b><math>\Delta</math> Oudin [mm/año]</b>
CanESM2 r2i1p1	3,33	-0,16	-1,55
CMCC-CMS r1i1p1	2,93	-0,16	-1,55
CSIRO-Mk3-6-0 r4i1p1	2,41	-0,15	-1,56
CSIRO-Mk3-6-0 r5i1p1	2,22	-0,14	-1,56
CSIRO-Mk3-6-0 r8i1p1	1,97	-0,15	-1,57
CSIRO-Mk3-6-0 r9i1p1	2,53	-0,15	-1,56
IPSL-CM5A-LR r3i1p1	3,83	-0,14	-1,55
IPSL-CM5B-LR r1i1p1	2,47	-0,14	-1,55
MIROC-ESM-CHEM r1i1p1	3,51	-0,17	-1,55
MIROC5 r2i1p1	1,97	-0,16	-1,56
NorESM1-M r1i1p1	1,14	-0,15	-1,55
<b>Promedio</b>	<b>2,57</b>	<b>-0,15</b>	<b>-1,56</b>

## ANEXO E: ÍNDICES DE SEQUÍA

En el presente anexo, se muestran los resultados de los índices de sequía, en primer lugar, se presenta una tabla con la clasificación de los índices a partir de los datos registrados por la estación meteorológica y luego se grafica la evolución de los índices desde el año 1970 hasta el 2100 para cada modelo GCM.

### E.1 SPI

*Tabla E-1: Resultados SPI periodo observado.*

Índice		N° sequías		Intensidad Media [-]		Duración Total [meses]		Frecuencia [%]	
Clasificación	SPI	1970-2005	1988-2023	1970-2005	1988-2023	1970-2005	1988-2023	1970-2005	1988-2023
Extremadamente húmedo	12	4	4	2,23	2,10	18	9	4,3	2,1
	24	3	0	2,08	-	9	0	2,2	0,0
	48	0	0	-	-	0	0	0,0	0,0
Severamente húmedo	12	7	8	1,71	1,77	16	20	3,8	4,6
	24	10	7	1,71	1,63	35	20	8,6	4,6
	48	3	0	1,60	-	19	0	4,9	0,0
Moderadamente húmedo	12	21	13	1,20	1,21	31	19	7,4	4,4
	24	11	13	1,26	1,26	24	28	5,9	6,5
	48	11	7	1,25	1,16	80	47	20,8	10,9
Ligeramente húmedo	12	38	30	0,44	0,40	187	136	44,4	31,5
	24	17	14	0,39	0,48	199	161	48,7	37,3
	48	18	19	0,47	0,41	157	161	40,8	37,3
Sequía ligera	12	30	29	-0,32	-0,39	155	180	36,8	41,7
	24	13	14	-0,28	-0,50	141	141	34,5	32,6
	48	12	18	-0,20	-0,42	124	117	32,2	27,1
Sequía moderada	12	8	15	-1,06	-1,23	13	33	3,1	7,6
	24	1	12	-1,27	-1,26	1	29	0,2	6,7
	48	1	9	-1,12	-1,13	5	53	1,3	12,3
Sequía severa	12	1	12	-1,53	-1,70	1	21	0,2	4,9
	24	0	10	-	-1,75	0	39	0,0	9,0
	48	0	6	-	-1,78	0	50	0,0	11,6
Sequía extrema	12	0	5	-	-2,26	0	14	0,0	3,2
	24	0	3	-	-2,08	0	14	0,0	3,2
	48	0	3	-	-2,05	0	4	0,0	0,9

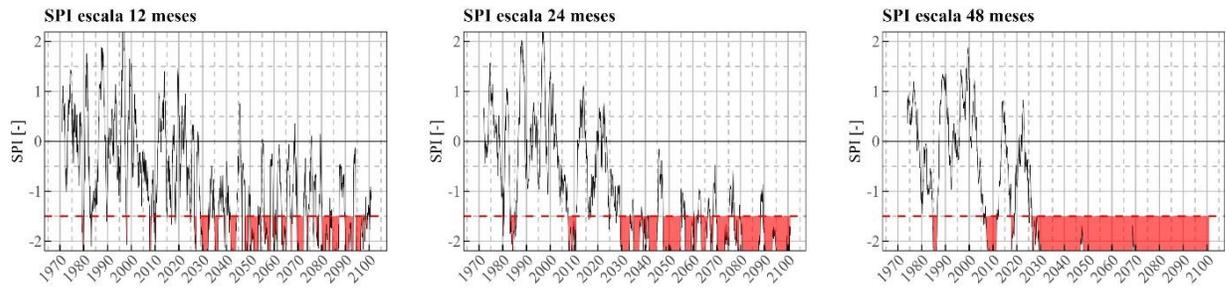


Figura E.1: Resultados proyección de sequías índice SPI, modelo CanESM2 r2i1p1.

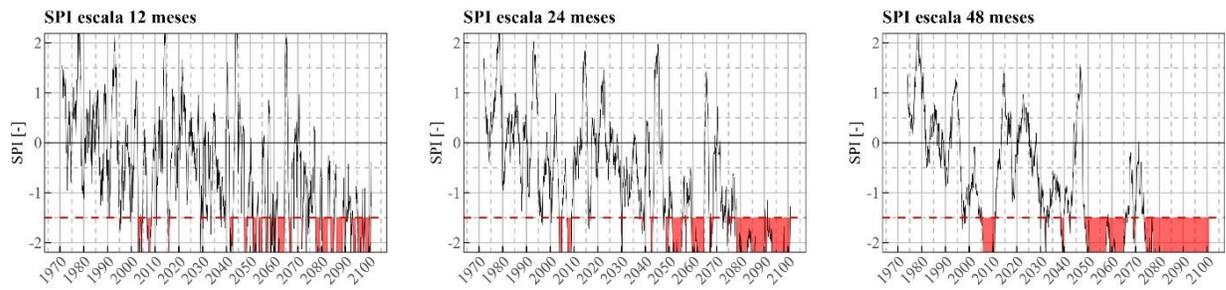


Figura E.2: Resultados proyección de sequías índice SPI, modelo CMCC-CMS r1i1p1.

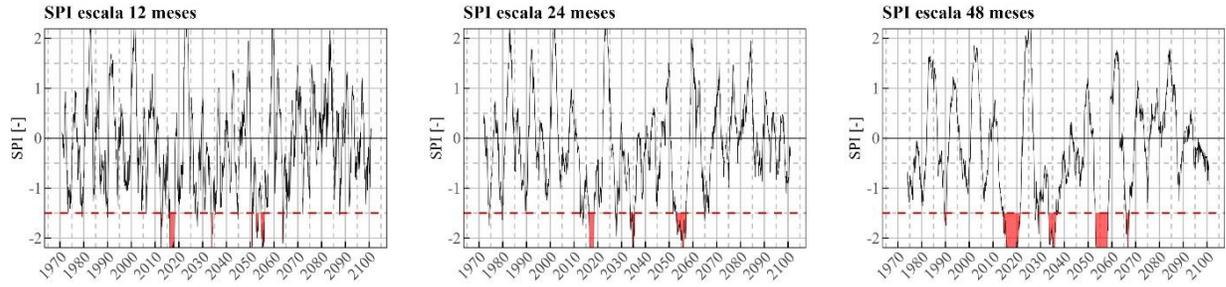


Figura E.3: Resultados proyección de sequías índice SPI, modelo CSIRO-Mk3-6-0 r4i1p1.

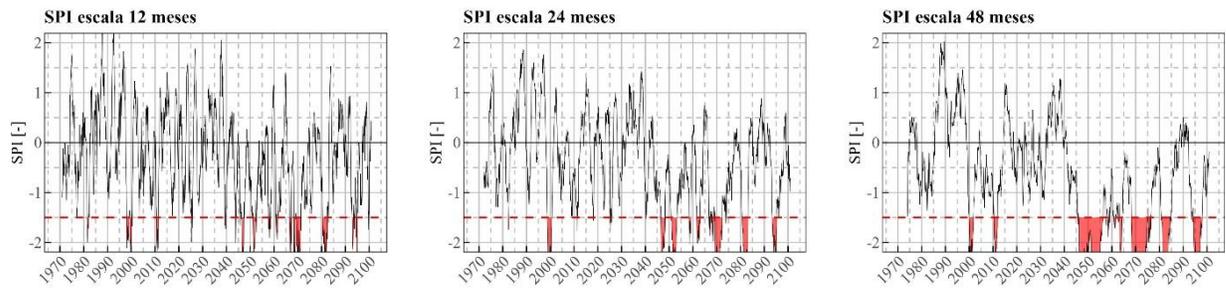


Figura E.4: Resultados proyección de sequías índice SPI, modelo CSIRO-Mk3-6-0 r5i1p1.

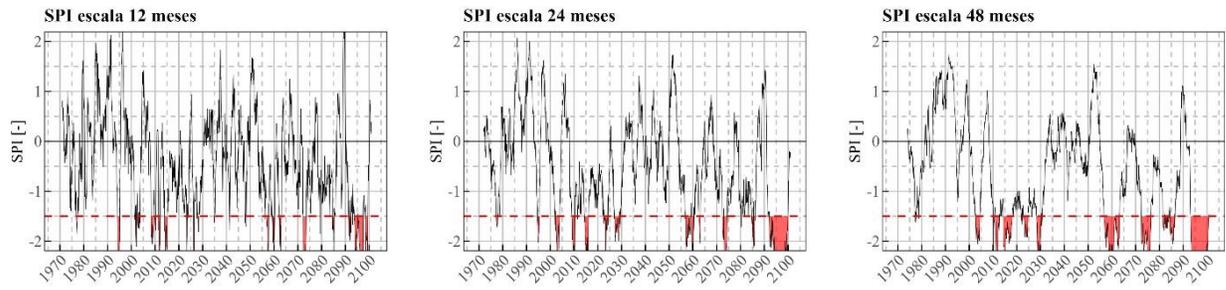


Figura E.5: Resultados proyección de sequías índice SPI, modelo CSIRO-Mk3-6-0 r8i1p1.

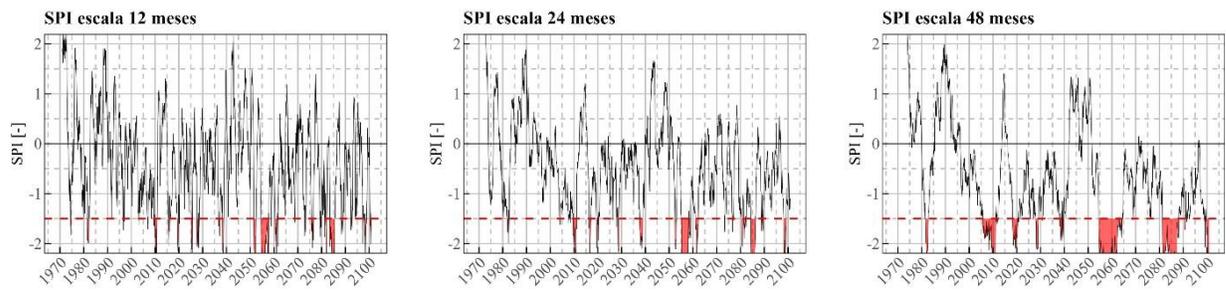


Figura E.6: Resultados proyección de sequías índice SPI, modelo CSIRO-Mk3-6-0 r9i1p1.

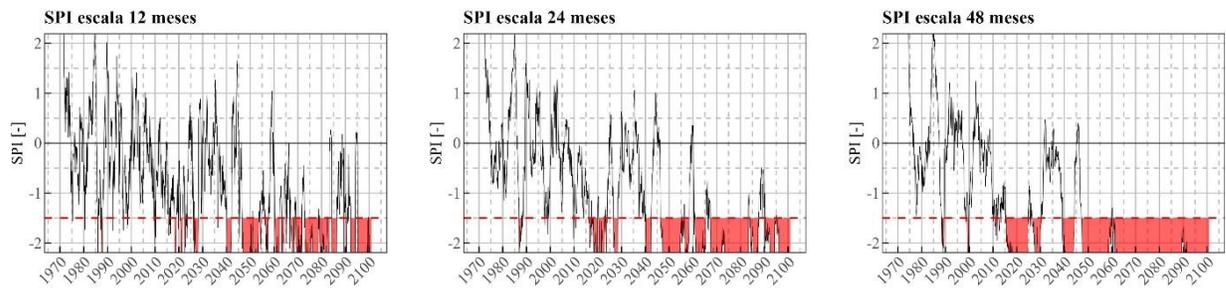


Figura E.7: Resultados proyección de sequías índice SPI, modelo IPSL-CM5A-LR r3i1p1.

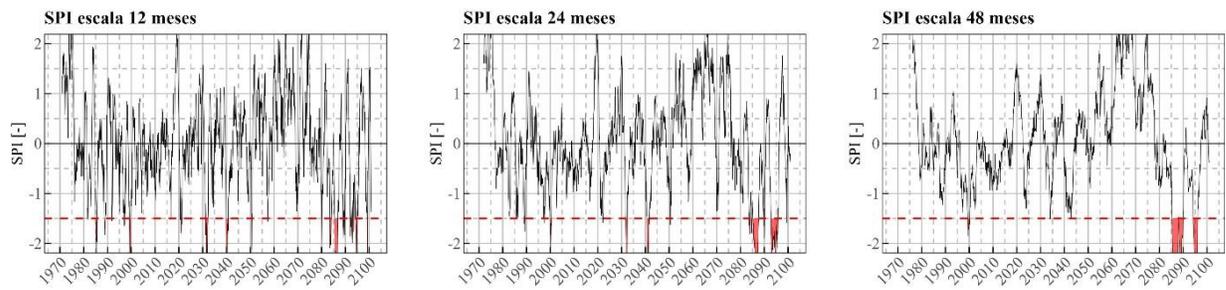


Figura E.8: Resultados proyección de sequías índice SPI, modelo IPSL-CM5B-LR r1i1p1.

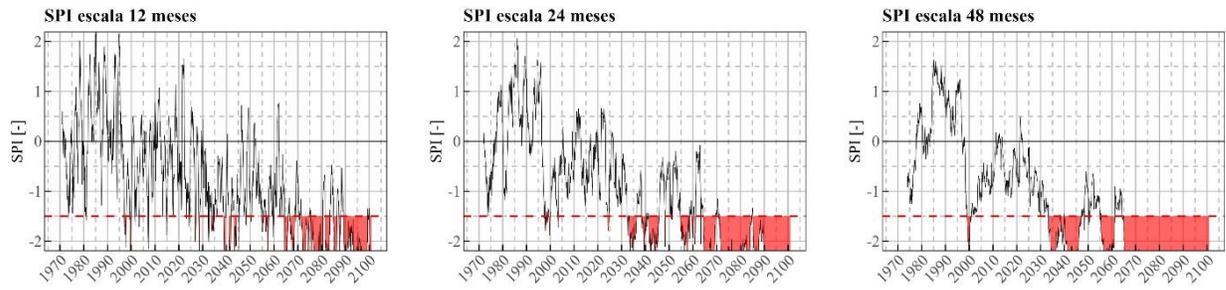


Figura E.9: Resultados proyección de sequías índice SPI, modelo MIROC-ESM-CHEM r1i1p1.

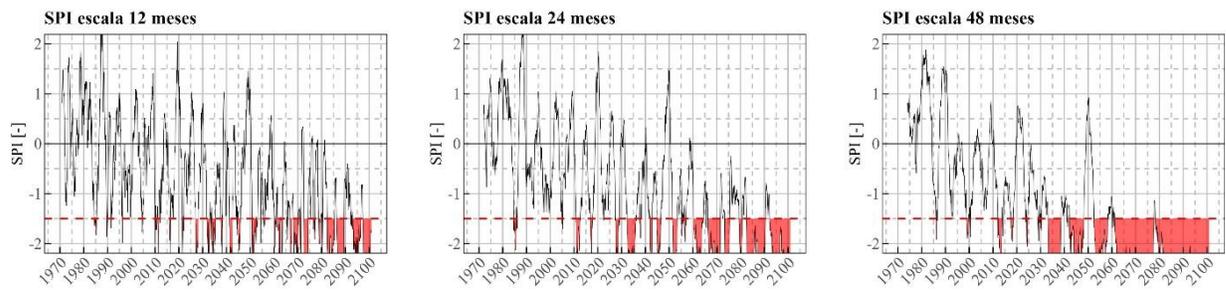


Figura E.10: Resultados proyección de sequías índice SPI, modelo MIROC5 r2i1p1.

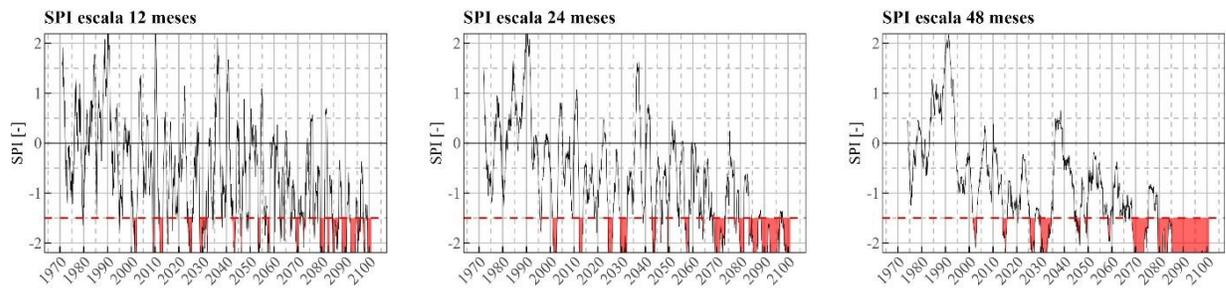


Figura E.11: Resultados proyección de sequías índice SPI, modelo NorESM1-M r1i1p1.

## E.2 SPEI

Tabla E-2: Resultados SPEI periodo observado.

Índice			N° sequías		Intensidad Media		Duración Total [meses]		Frecuencia [%]	
Clasificación	Método	SPEI	1970-2005	1988-2023	1970-2005	1988-2023	1970-2005	1988-2023	1970-2005	1988-2023
Extremadamente húmedo	Oudin	12	4	3	2,06	2,05	12	3	2,9	0,7
			4	2	2,08	2,06	13	3	3,1	0,5
			3	3	2,09	2,06	12	3	2,9	0,7
	Hargreaves	24	2	0	2,09	-	4	0	1,0	0,0
			3	0	2,04	-	8	0	2,0	0,0
			2	0	2,09	-	3	0	0,7	0,0
	Thornthwaite	48	0	0	-	-	0	0	0,0	0,0
			0	0	-	-	0	0	0,0	0,0
			0	0	-	-	0	0	0,0	0,0
Severamente húmedo	Oudin	12	10	8	1,76	1,74	20	26	4,8	6,0
			10	7	1,70	1,70	20	26	4,8	6,3
			9	8	1,73	1,75	21	26	5,0	6,0
	Hargreaves	24	9	4	1,71	1,66	46	26	11,2	6,0
			10	7	1,71	1,61	42	26	10,3	5,1
			7	3	1,73	1,66	49	27	12,0	6,3
	Thornthwaite	48	6	2	1,6	1,6	28	6	7,3	1,4
			10	2	1,57	1,54	33	6	8,6	0,5
			8	2	1,57	1,58	22	7	5,7	1,6
Moderadamente húmedo	Oudin	12	23	16	1,20	1,20	44	25	10,5	5,8
			24	14	1,19	1,21	43	25	10,2	5,1
			23	15	1,18	1,21	43	23	10,2	5,3
	Hargreaves	24	12	8	1,25	1,28	24	24	5,9	5,6
			14	16	1,24	1,23	30	24	7,3	6,5
			11	8	1,20	1,27	23	23	5,6	5,3
	Thornthwaite	48	11	9	1,3	1,1	87	54	22,6	12,5
			17	5	1,30	1,28	85	54	22,1	11,3
			13	8	1,32	1,17	95	56	24,7	13,0
Ligeramente húmedo	Oudin	12	38	31	0,43	0,42	187	139	44,4	32,2
			33	30	0,47	0,42	187	139	44,4	32,4
			36	33	0,43	0,40	181	142	43,0	32,9
	Hargreaves	24	18	12	0,37	0,40	183	155	44,7	35,9
			25	24	0,36	0,41	172	155	42,1	36,3
			24	18	0,31	0,31	180	154	44,0	35,6
	Thornthwaite	48	14	18	0,4	0,4	123	127	31,9	29,4
			15	13	0,46	0,33	117	127	30,4	30,8
			14	18	0,40	0,40	114	117	29,6	27,1

Índice			N° sequías		Intensidad Media		Duración Total [meses]		Frecuencia [%]	
Sequía ligera	Oudin	12	33	33	-0,36	-0,43	141	162	33,5	37,5
			23	37	-0,37	-0,49	138	162	32,8	38,7
			30	34	-0,34	-0,41	149	163	35,4	37,7
	Hargreaves	24	14	12	-0,30	-0,47	148	140	36,2	32,4
			20	22	-0,25	-0,40	150	140	36,7	31,9
			19	17	-0,27	-0,39	150	143	36,7	33,1
	Thornthwaite	48	11	16	-0,30	-0,40	142	137	36,9	31,7
			11	12	-0,33	-0,33	144	137	37,4	35,4
			11	14	-0,25	-0,30	149	150	38,7	34,7
Sequía moderada	Oudin	12	10	17	-1,09	-1,17	16	35	3,8	8,1
			5	24	-1,13	-1,21	19	35	4,5	9,0
			8	16	-1,10	-1,19	14	32	3,3	7,4
	Hargreaves	24	2	11	-1,06	-1,30	4	36	1,0	8,3
			3	13	-1,16	-1,23	7	36	1,7	10,0
			2	11	-1,07	-1,30	4	34	1,0	7,9
	Thornthwaite	48	1	11	-1,10	-1,20	5	64	1,3	14,8
			2	7	-1,08	-1,29	6	64	1,6	11,3
			1	8	-1,12	-1,33	5	62	1,3	14,4
Sequía severa	Oudin	12	1	12	-1,63	-1,77	1	29	0,2	6,7
			1	11	-1,57	-1,70	1	29	0,2	4,6
			1	9	-1,68	-1,79	1	31	0,2	7,2
	Hargreaves	24	0	9	-	-1,66	0	51	0,0	11,8
			0	9	-	-1,73	0	51	0,0	8,8
			0	9	-	-1,69	0	50	0,0	11,6
	Thornthwaite	48	0	6	-	-1,58	0	44	0,0	10,19
			0	5	-	-1,60	0	44	0,0	10,6
			0	6	-	-1,58	0	40	0,0	9,3
Sequía extrema	Oudin	12	0	6	-	-2,22	0	13	0,0	3,0
			0	4	-	-2,25	0	13	0,0	3,5
			0	4	-	-2,25	0	12	0,0	2,8
	Hargreaves	24	0	0	-	-	0	0	0,0	0,0
			0	2	-	-2,05	0	0	0,0	1,4
			0	1	-	-2,01	0	1	0,0	0,2
	Thornthwaite	48	0	0	-	-	0	0	0,0	0,0
			0	0	-	-	0	0	0,0	0,0
			0	0	-	-	0	0	0,0	0,0

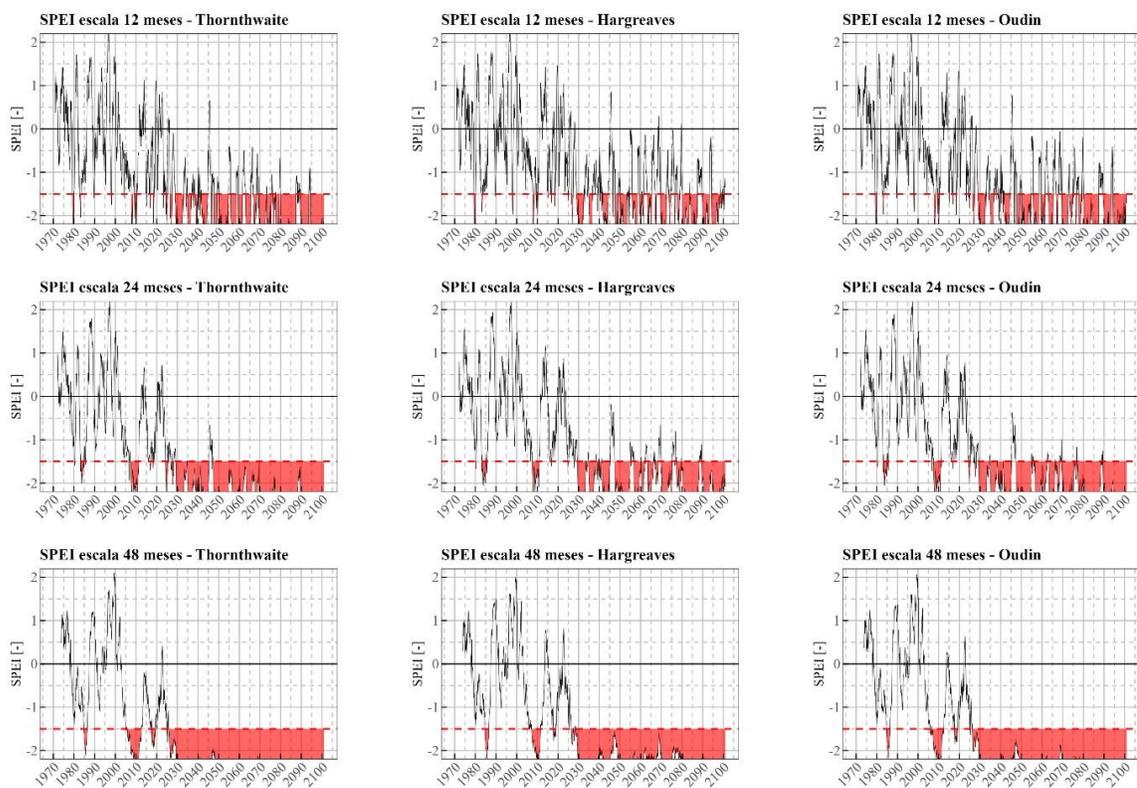


Figura E.12: Resultados proyección de sequías índice SPEI, modelo CanESM2 r2i1p1.

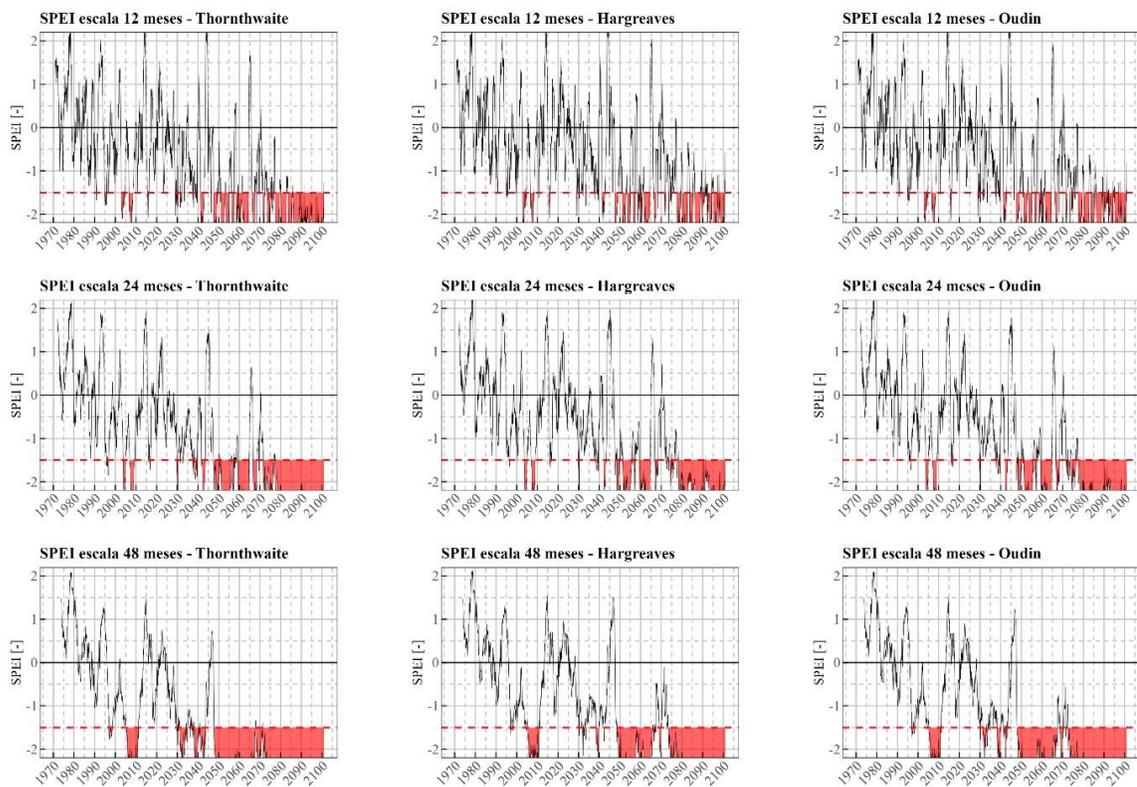


Figura E.13: Resultados proyección de sequías índice SPEI, modelo CMCC-CMS r1i1p1.

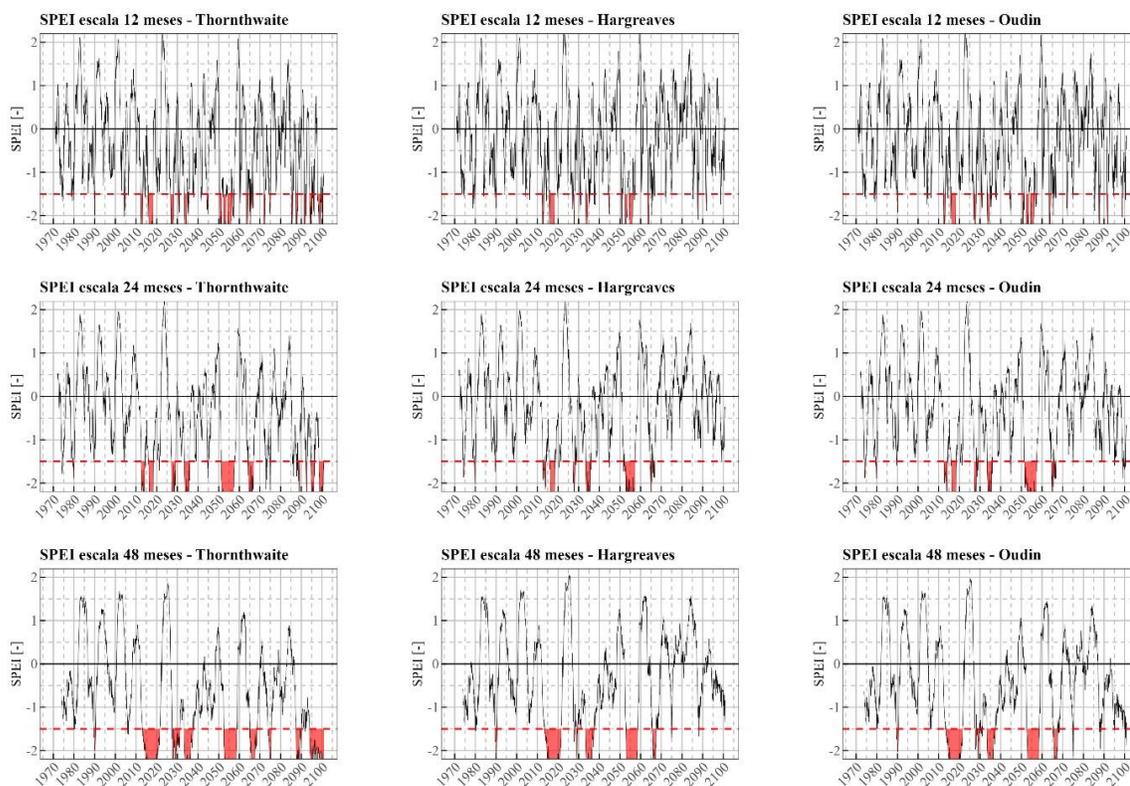


Figura E.14: Resultados proyección de sequías índice SPEI, modelo CSIRO-Mk3-6-0 r4i1p1.

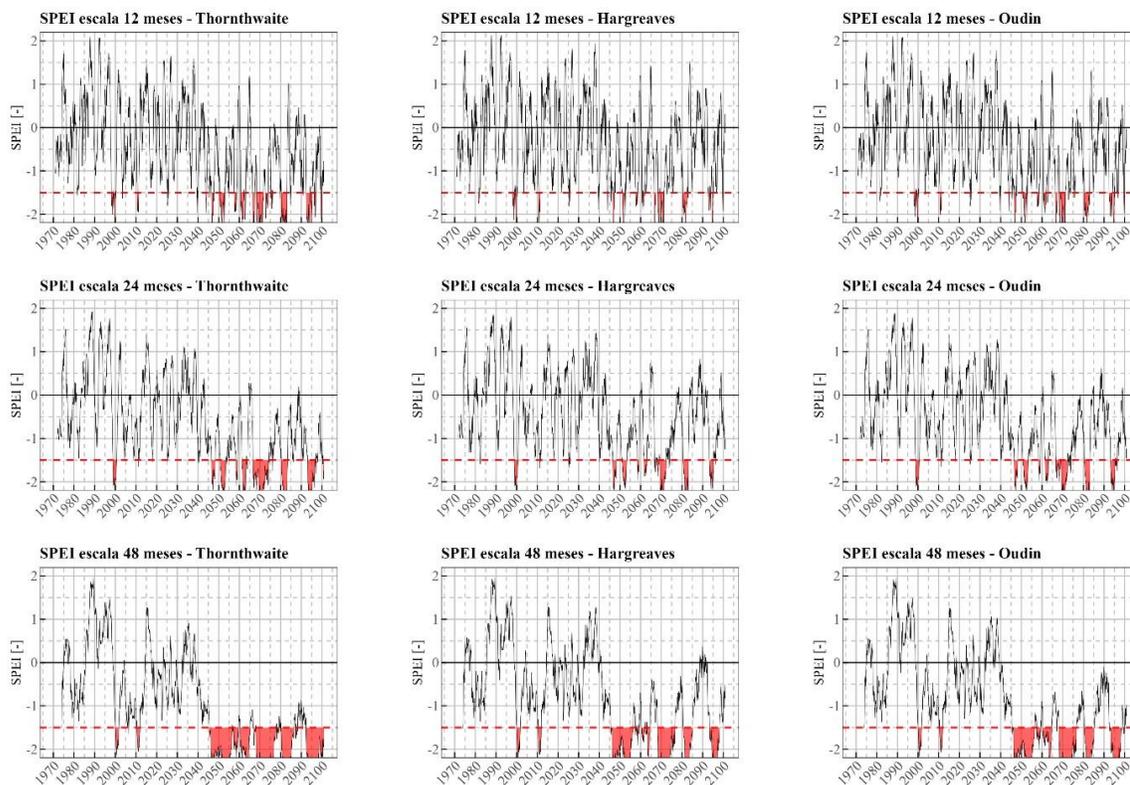


Figura E.15: Resultados proyección de sequías índice SPEI, modelo CSIRO-Mk3-6-0 r5i1p1.

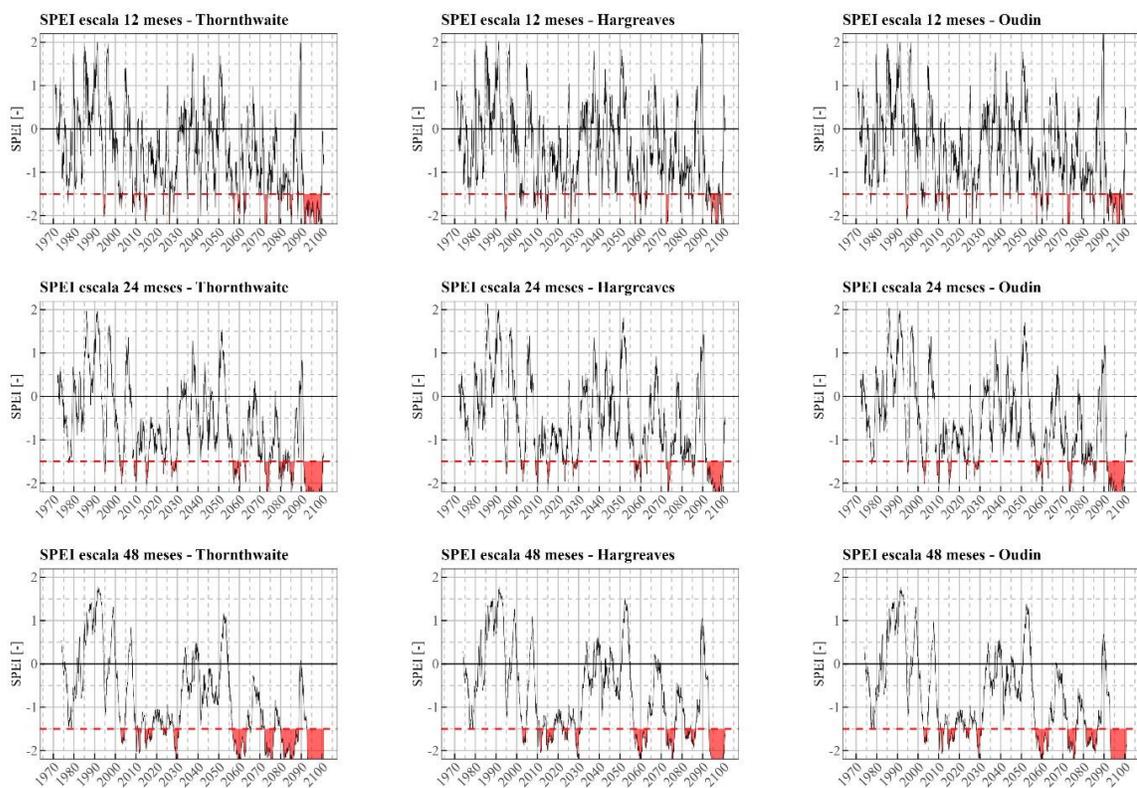


Figura E.16: Resultados proyección de sequías índice SPEI, modelo CSIRO-Mk3-6-0 r8i1p1.

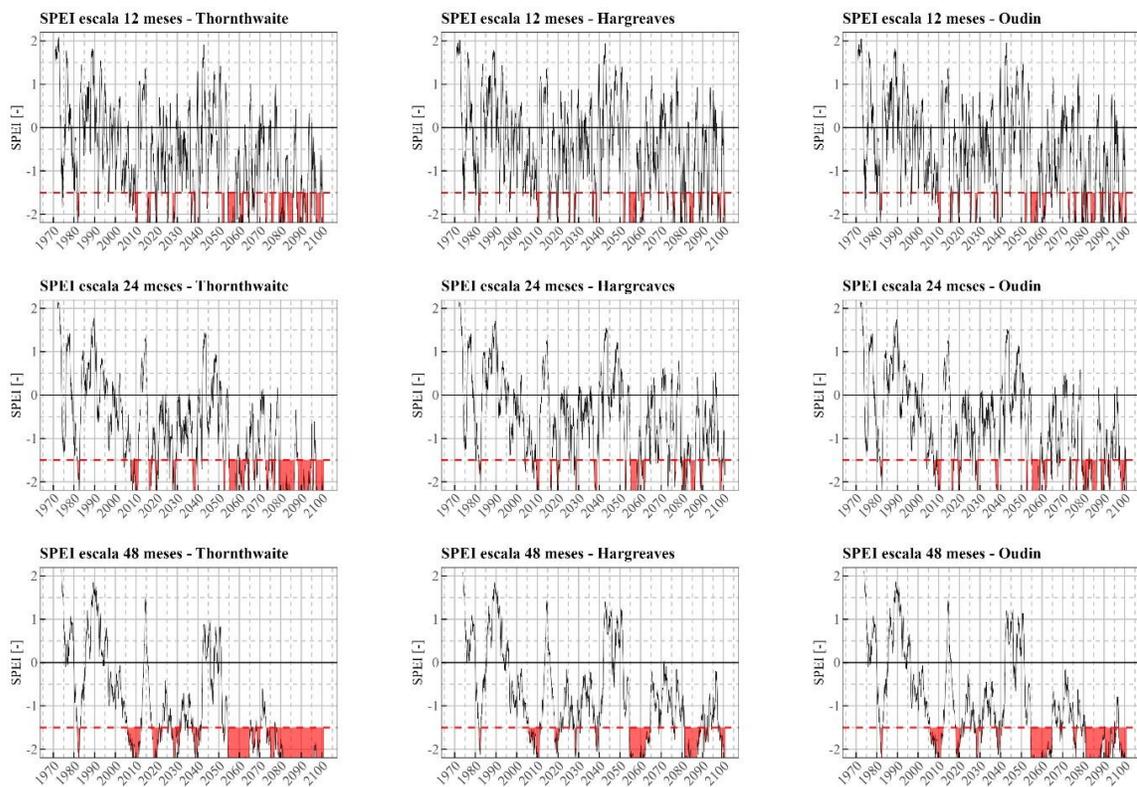


Figura E.17: Resultados proyección de sequías índice SPEI, modelo CSIRO-Mk3-6-0 r9i1p1.

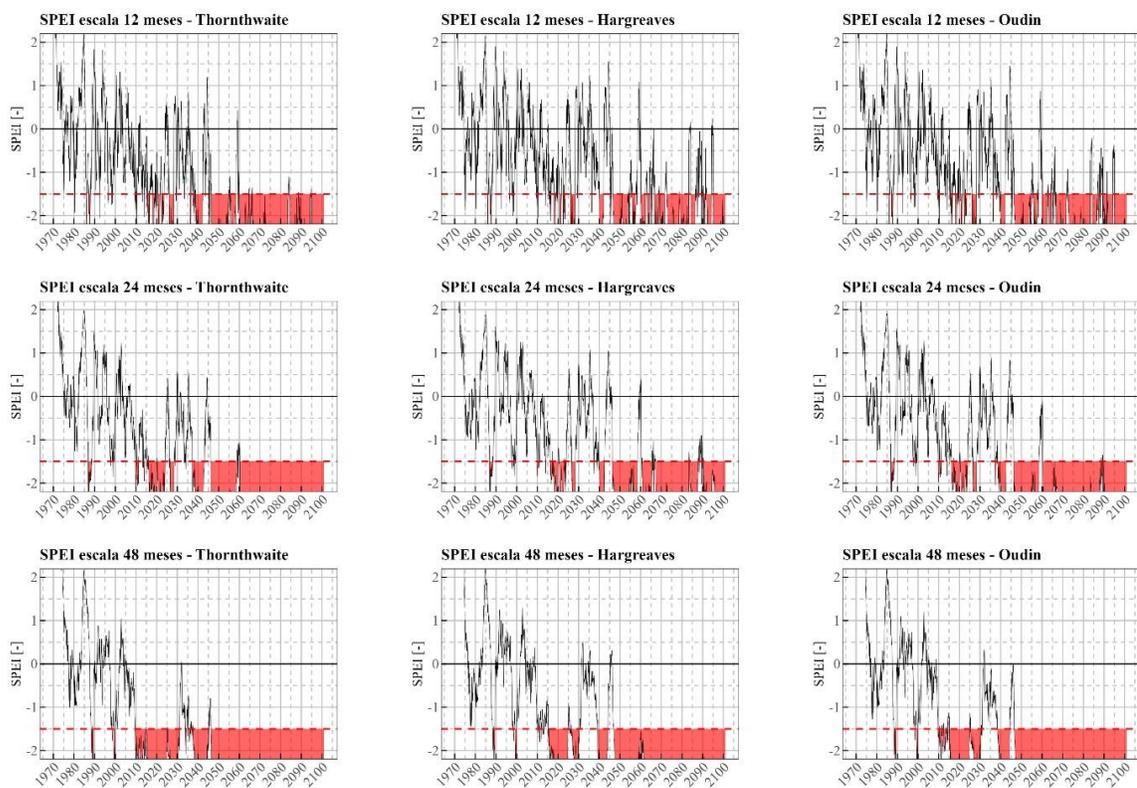


Figura E.18: Resultados proyección de sequías índice SPEI, modelo IPSL-CM5A-LR r3i1p1.

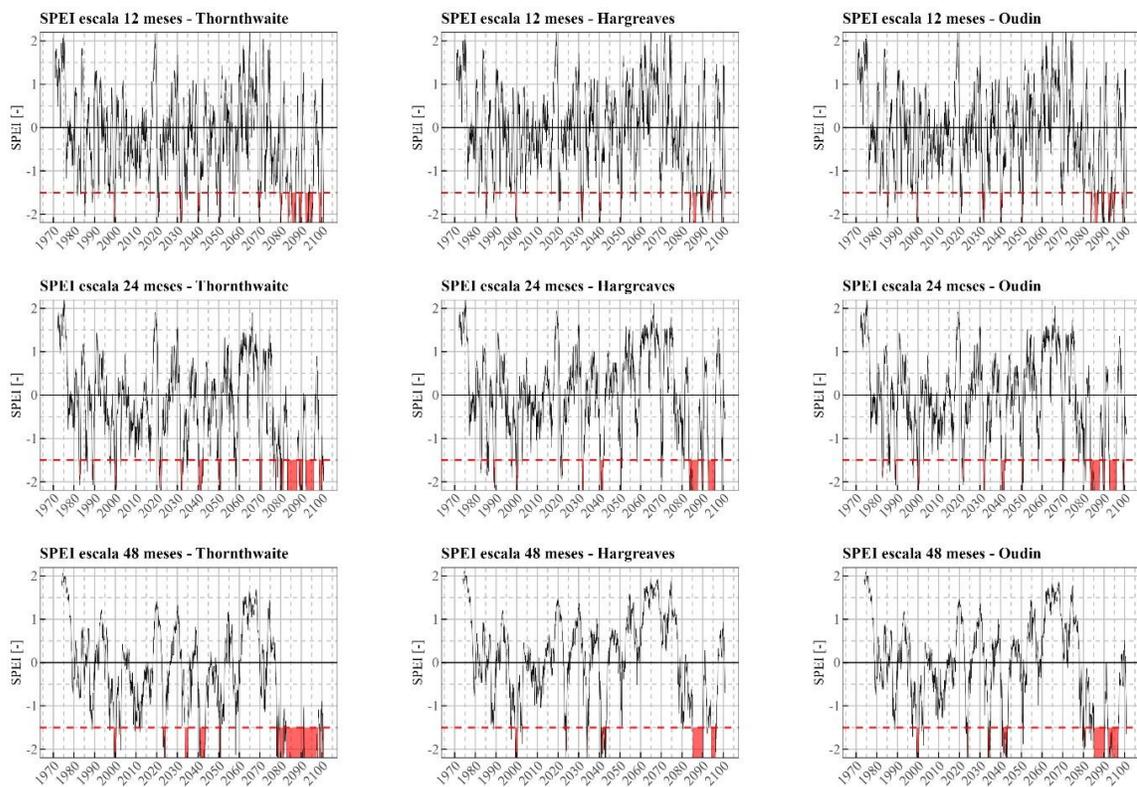


Figura E.19: Resultados proyección de sequías índice SPEI, modelo IPSL-CM5B-LR r1i1p1.

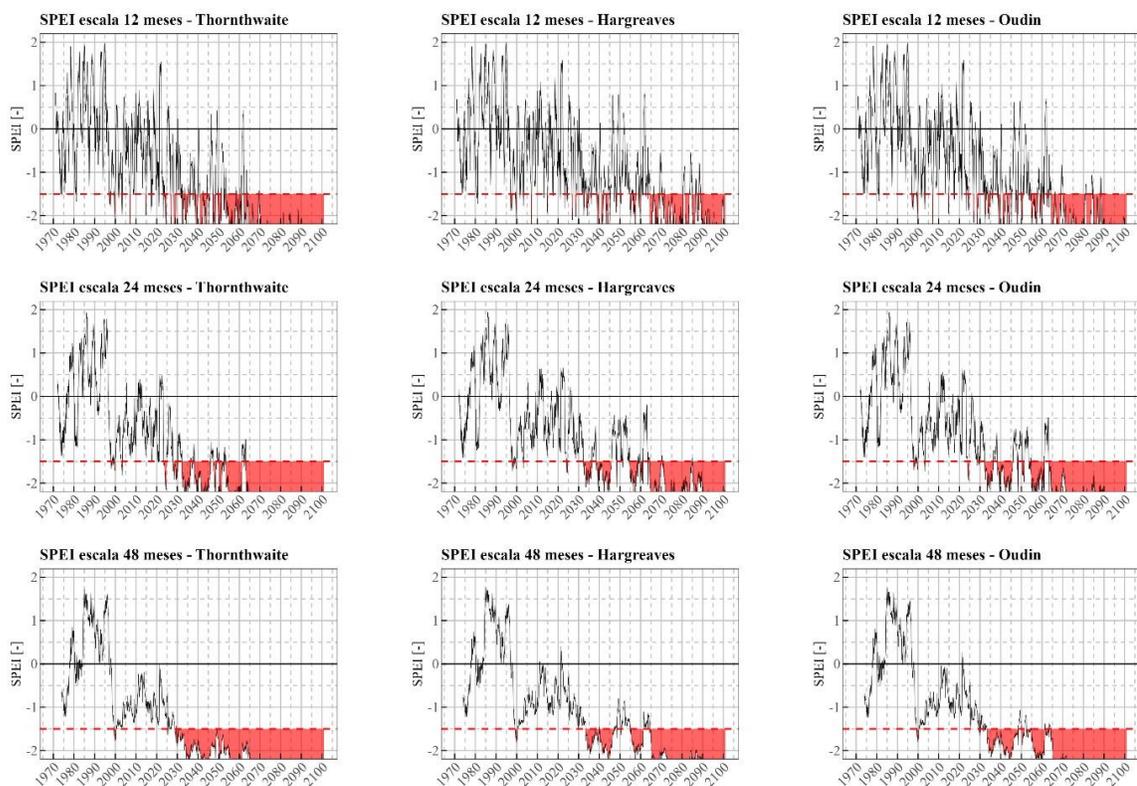


Figura E.20: Resultados proyección de sequías índice SPEI, modelo MIROC-ESM-CHEM r1i1p1.

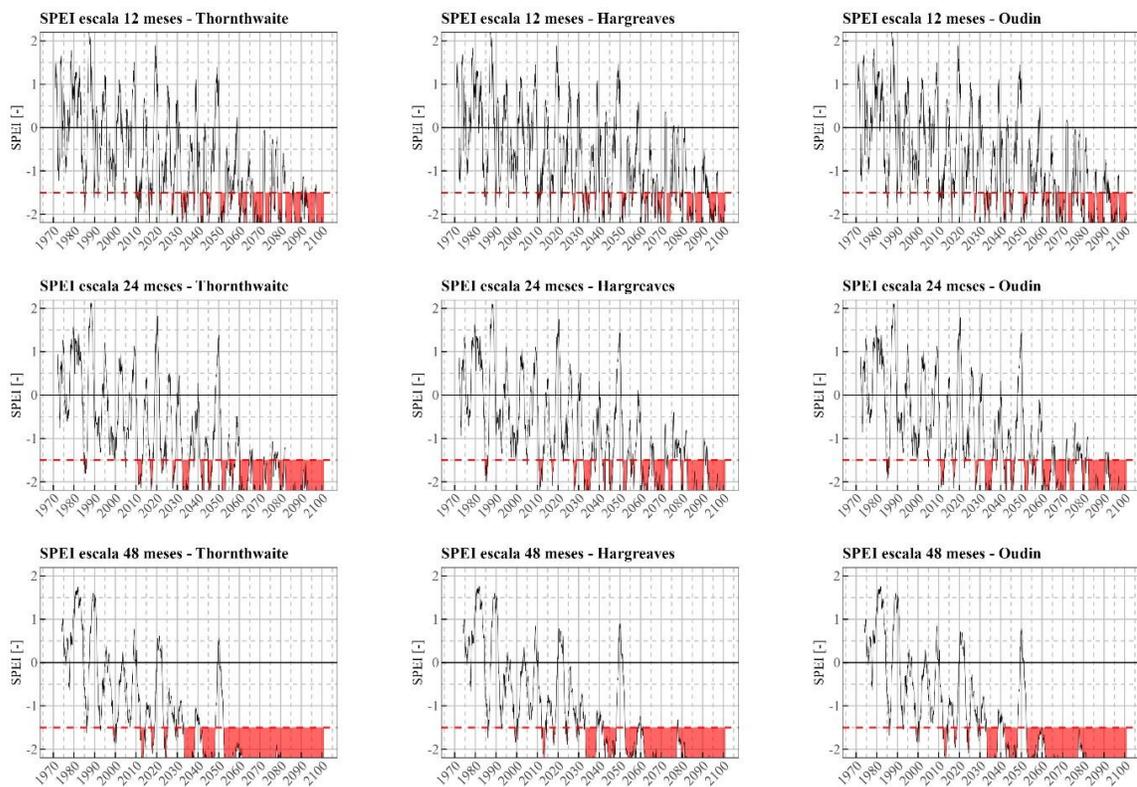


Figura E.21: Resultados proyección de sequías índice SPEI, modelo MIROC5 r2i1p1.

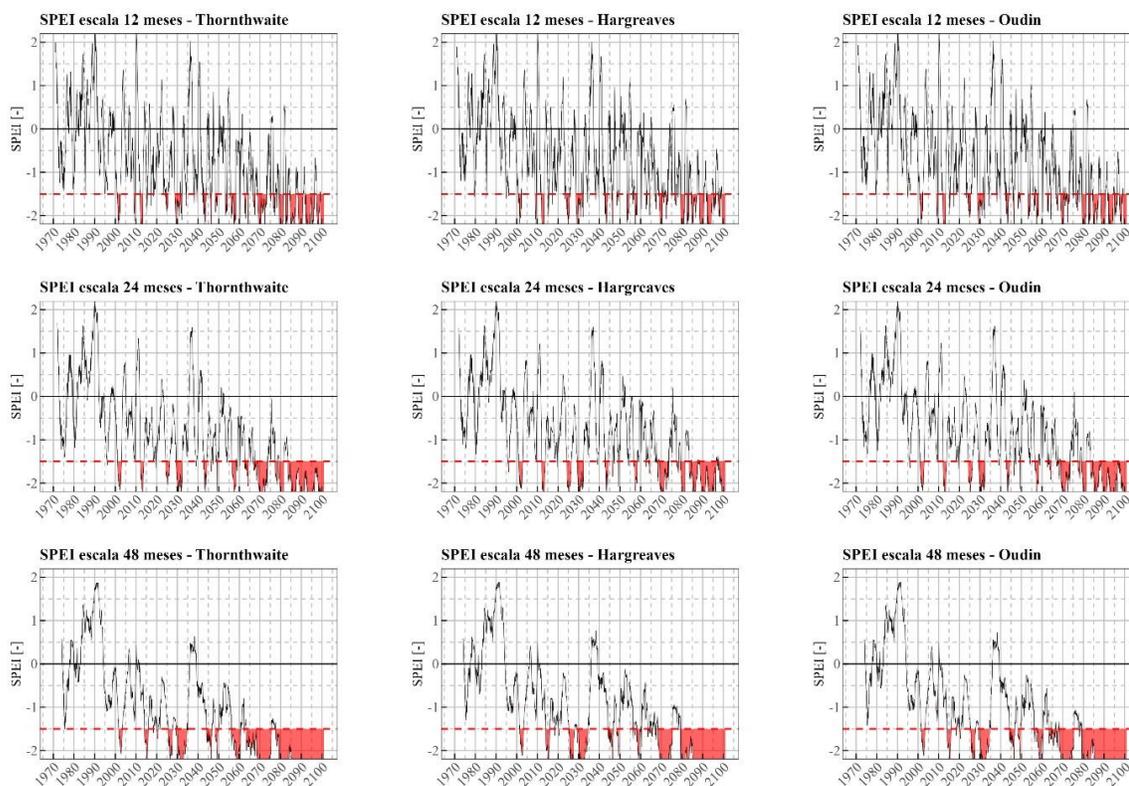


Figura E.22: Resultados proyección de sequías índice SPEI, modelo NorESM1-M r1i1p1.

La Tabla E-3, muestra el índice SPEI para dos GCMs en el periodo observado, utilizando el método Thornthwaite. En comparación con la Tabla 5-10, el método Thornthwaite aplicado al GCM CSIRO-Mk3-6-0 r9i1p1 proyecta mayor frecuencia de sequías severas y extremas en las escalas de 12 y 24 meses.

Tabla E-3: Resultados SPEI con Thornthwaite, GCMs periodo 1970-2023.

GCM	Índice		N° sequías		Intensidad Media [-]		Duración Total [meses]		Frecuencia [%]	
	Clasificación	SPEI	1970-2005	1988-2023	1970-2005	1988-2023	1970-2005	1988-2023	1970-2005	1988-2023
CSIRO-Mk3-6-0 r9i1p1	Sequía severa	12	7	16	-1,71	-1,69	14	45	3,3	10,4
		24	5	16	-1,68	-1,70	17	49	4,2	11,3
		48	3	3	-1,78	-1,78	10	10	7,0	2,8
	Sequía extrema	12	2	5	-2,09	-2,30	8	24	1,9	5,6
		24	1	8	-2,20	-2,24	3	38	0,7	8,8
		48	2	2	-2,07	-2,07	7	7	4,9	1,9
NorESM1-M r1i1p1	Sequía severa	12	6	14	-1,72	-1,69	12	31	2,9	7,2
		24	5	9	-1,81	-1,74	20	36	4,9	8,2
		48	1	3	-1,50	-1,69	1	17	0,7	4,7
	Sequía extrema	12	3	5	-2,09	-2,12	7	21	1,7	4,9
		24	3	4	-2,07	-2,10	7	14	1,7	3,2
		48	0	1	-	-2,06	0	4	0,0	1,1

De acuerdo con la Tabla E-4, en los periodos futuros, los modelos GCM proyectan un aumento en el número de sequías, las cuales presentarán mayor intensidad, duración y frecuencia en comparación con el periodo observado. A partir de esta tabla, y en comparación con la Tabla 5-11, el método Thornthwaite proyecta una mayor frecuencia de sequías extremas que el método de Hargreaves.

*Tabla E-4: Resultados SPEI con Thornthwaite, GCMs periodos futuros.*

GCM	Índice		N° sequías		Intensidad Media [-]		Duración Total [meses]		Frecuencia [%]	
	Clasificación	SPEI	2029-2064	2065-2100	2029-2064	2065-2100	2029-2064	2065-2100	2029-2064	2065-2100
CSIRO-Mk3-6-0 r9i1p1	Sequía severa	12	19	28	-1,76	-1,73	40	61	9,3	14,1
		24	20	18	-1,72	-1,79	55	69	12,7	16,0
		48	27	19	-1,71	-1,77	139	122	32,2	18,1
	Sequía extrema	12	12	17	-2,39	-2,62	81	156	18,8	36,1
		24	8	13	-2,60	-2,70	86	218	19,9	50,5
		48	10	11	-2,20	-2,35	70	402	16,2	59,6
NorESM1-M r1i1p1	Sequía severa	12	23	31	-1,73	-1,78	110	123	25,5	28,5
		24	20	20	-1,73	-1,83	80	136	18,5	31,5
		48	16	21	-1,71	-1,80	79	163	18,3	24,2
	Sequía extrema	12	12	18	-2,13	-2,26	27	153	6,3	35,4
		24	9	16	-2,11	-2,21	39	198	9,0	45,8
		48	6	15	-2,16	-2,27	49	366	11,3	54,3

### E.3 RAI

Tabla E-5: Resultados RAI periodo observado.

Índice		N° sequías		Intensidad Media [-]		Duración Total [meses]		Frecuencia [%]	
Clasificación	RAI	1970-2005	1988-2023	1970-2005	1988-2023	1970-2005	1988-2023	1970-2005	1988-2023
Extremadamente húmedo	12	1	5	3,35	3,35	5	5	1,2	0,8
	24	4	4	3,09	3,09	4	4	0,9	0,6
	48	4	4	3,03	3,03	5	5	1,2	0,8
Muy húmedo	12	6	22	2,34	2,33	14	22	3,3	3,5
	24	11	12	2,51	2,47	46	50	10,7	8,0
	48	16	16	2,33	2,35	72	78	16,8	13,1
Moderadamente húmedo	12	17	56	1,34	1,38	41	56	9,6	8,9
	24	16	21	1,38	1,38	48	63	11,2	10,1
	48	19	20	1,56	1,57	102	109	23,8	18,3
Ligeramente húmedo	12	33	74	0,73	0,73	69	74	16,2	11,7
	24	28	33	0,70	0,71	84	93	19,6	15,0
	48	14	16	0,70	0,71	45	47	10,5	7,9
Casi normal	12	41	207	0,28	0,28	178	207	41,7	32,8
	24	34	39	0,31	0,31	147	164	34,3	26,4
	48	14	17	0,29	0,31	123	129	28,7	21,6
Ligeramente seco	12	31	110	-0,75	-0,76	72	110	16,9	17,4
	24	24	32	-0,75	-0,77	64	94	14,9	15,1
	48	10	20	-0,75	-0,77	43	61	10,0	10,2
Moderadamente seco	12	15	118	-1,29	-1,36	47	118	11,0	18,7
	24	11	23	-1,21	-1,35	36	90	8,4	14,5
	48	15	18	-1,16	-1,32	37	94	8,6	15,7
Muy seco	12	1	36	-2,23	-2,30	1	36	0,2	5,7
	24	0	6	-2,04	-2,46	0	61	0,0	9,8
	48	1	10	-	-2,49	1	69	0,2	11,6
Extremadamente seco	12	0	4	-	-3,21	0	4	0,0	0,6
	24	0	1	-	-3,17	0	3	0,0	0,5
	48	0	5	-	-3,04	0	5	0,0	0,8

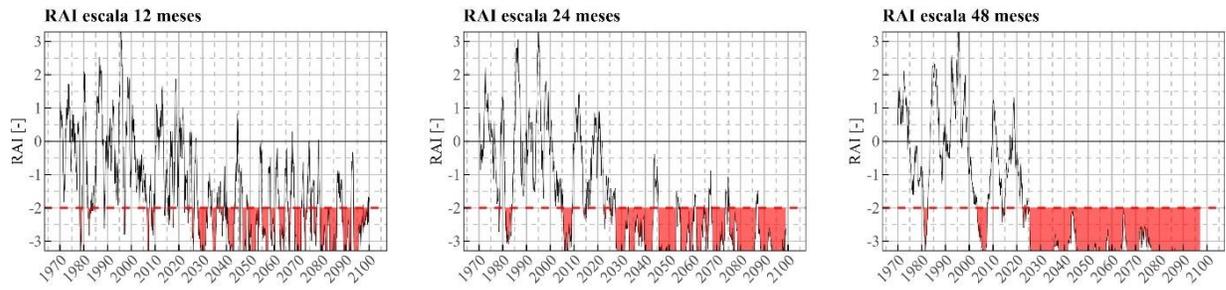


Figura E.23: Resultados proyección de sequías índice RAI, modelo CanESM2 r2i1p1.

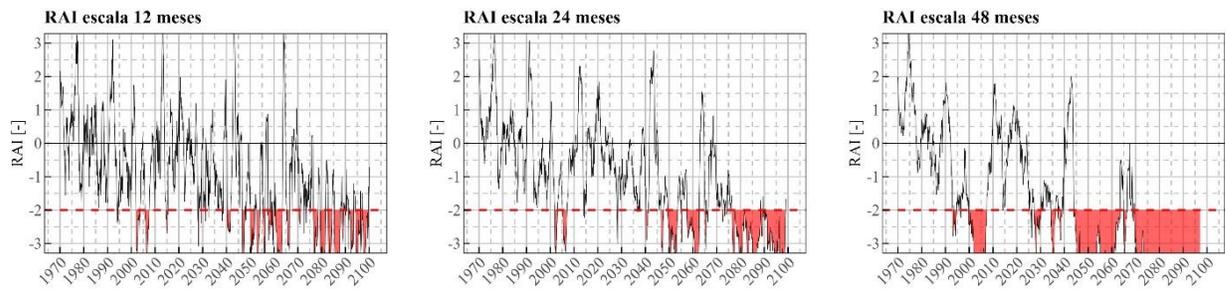


Figura E.24: Resultados proyección de sequías índice RAI, modelo CMCC-CMS r1i1p1.

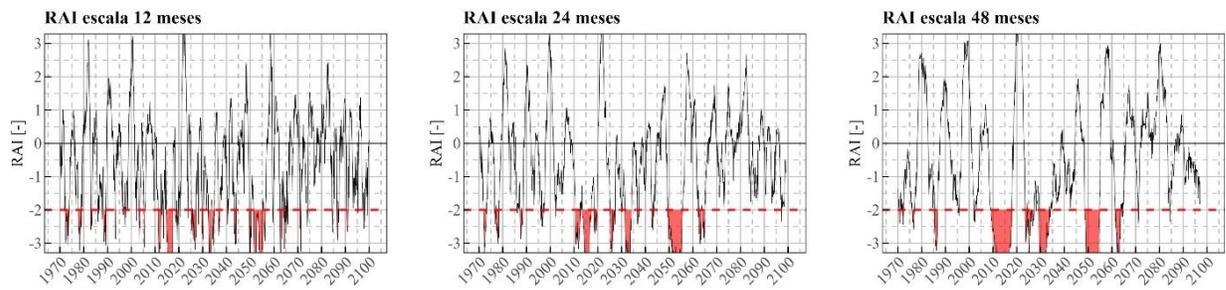


Figura E.25: Resultados proyección de sequías índice RAI, modelo CSIRO-Mk3-6-0 r4i1p1.

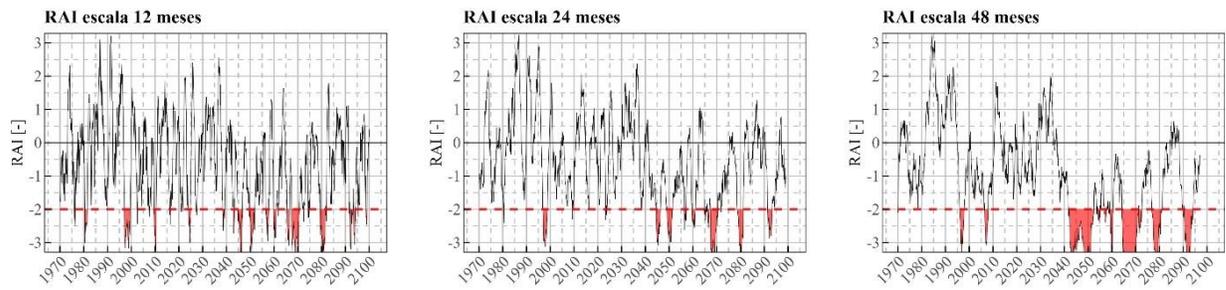


Figura E.26: Resultados proyección de sequías índice RAI, modelo CSIRO-Mk3-6-0 r5i1p1.

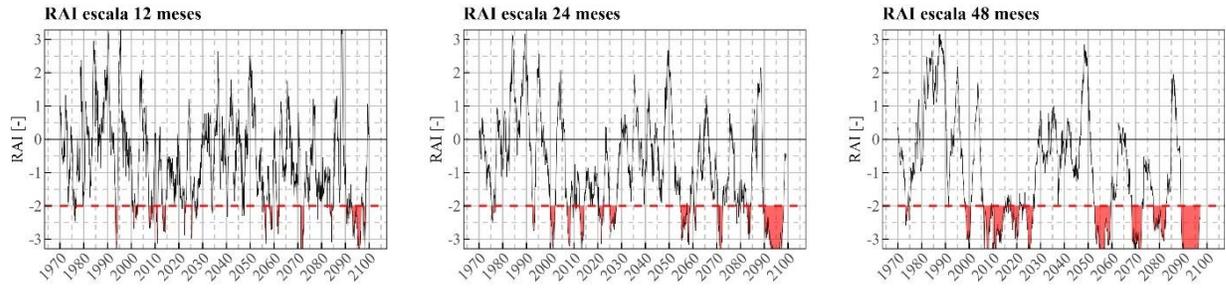


Figura E.27: Resultados proyección de sequías índice RAI, modelo CSIRO-Mk3-6-0 r8i1p1.

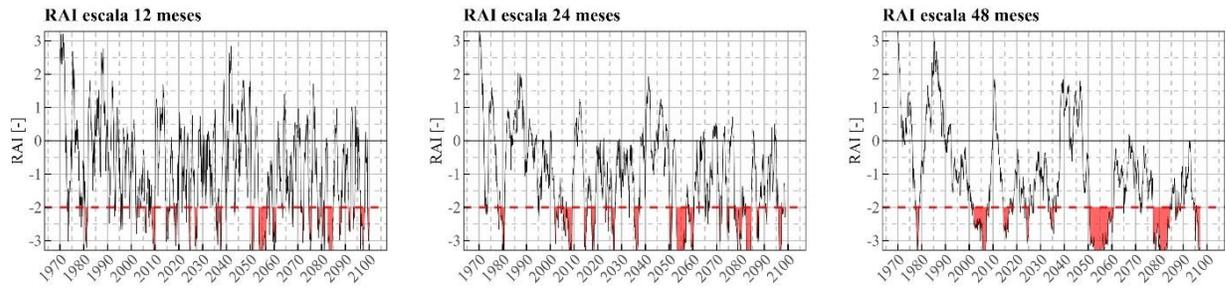


Figura E.28: Resultados proyección de sequías índice RAI, modelo CSIRO-Mk3-6-0 r9i1p1.

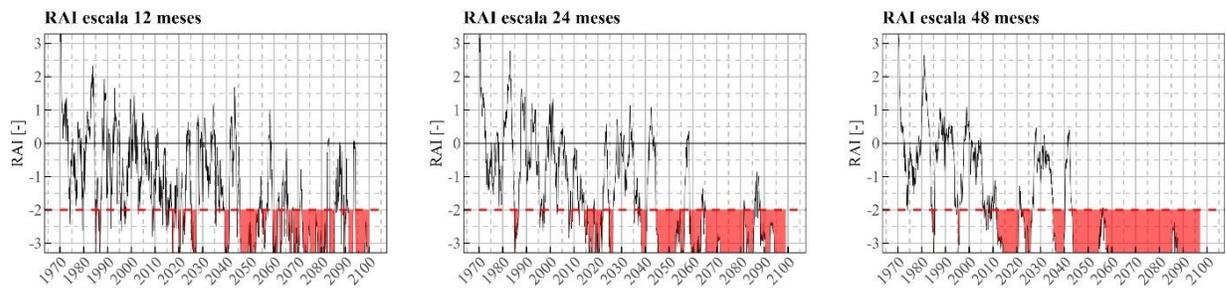


Figura E.29: Resultados proyección de sequías índice RAI, modelo IPSL-CM5A-LR r3i1p1.

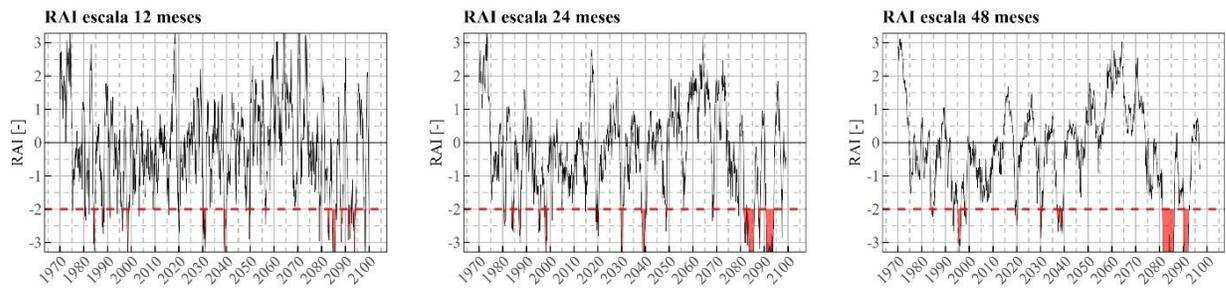


Figura E.30: Resultados proyección de sequías índice RAI, modelo IPSL-CM5B-LR r1i1p1.

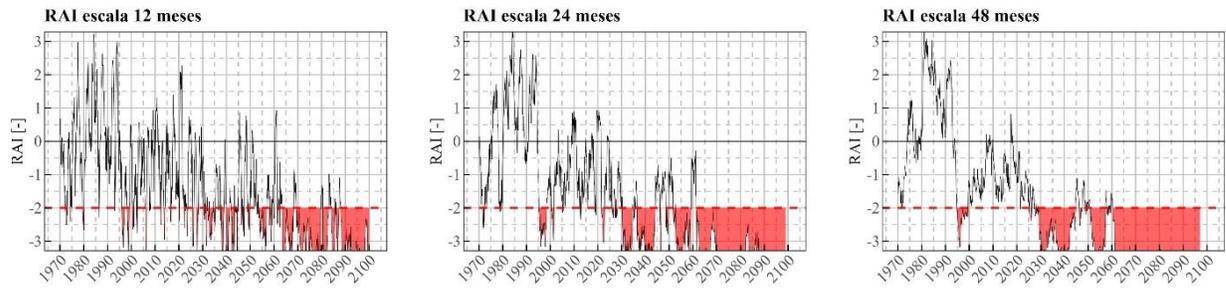


Figura E.31: Resultados proyección de sequías índice RAI, modelo MIROC-ESM-CHEM r1i1p1.

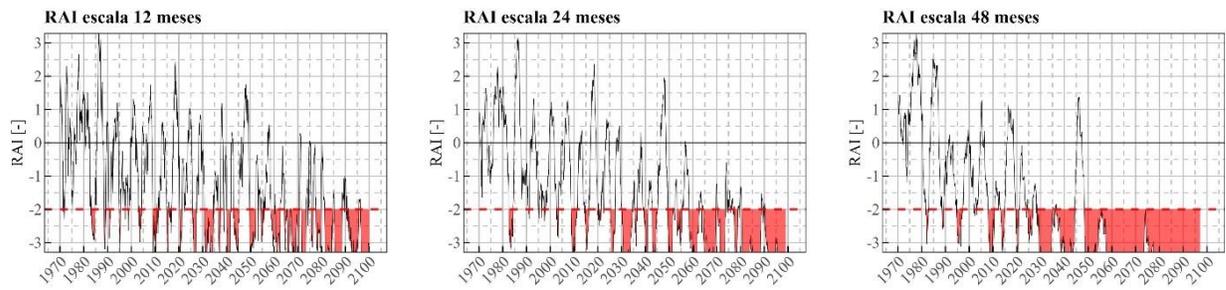


Figura E.32: Resultados proyección de sequías índice RAI, modelo MIROC5 r2i1p1.

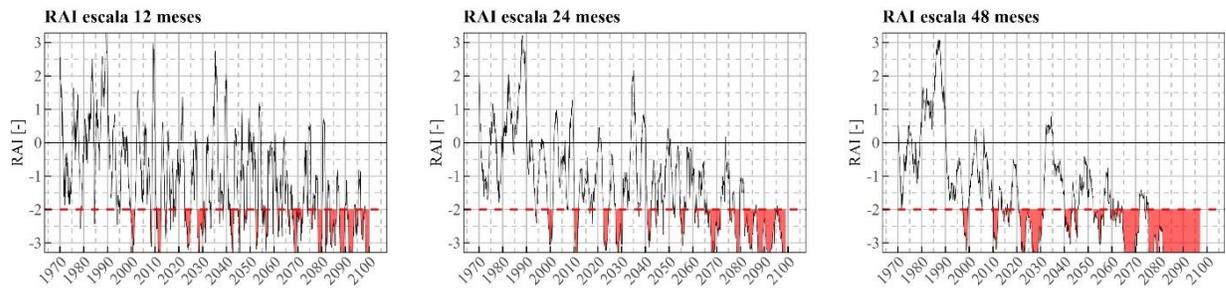


Figura E.33: Resultados proyección de sequías índice RAI, modelo NorESM1-M r1i1p1.