



UNIVERSIDAD TECNICA  
FEDERICO SANTA MARIA

Departamento de Obras Civiles

# **Proyección de la oferta natural de recursos hídricos en la isla Robinson Crusoe bajo escenarios de cambio climático.**

Memoria de Título presentada por

**Javiera Catalina Carreño Maldonado**

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

**Ingeniería Civil**

Profesor Guía  
Miguel Lagos Zúñiga

Profesor Co-Guía  
Lina Castro Heredia

Octubre, 2025



## CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

### 1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

**Tipo de monografía (marcar una opción):**  Memoria o trabajo de título;  Tesis de Postgrado;

**Título del trabajo:** Proyección natural de la oferta de recursos hídricos en la isla Robinson Crusoe bajo escenarios de cambio climático.

**Nombre del candidato(a):** Javiera Catalina Carreño Maldonado

**Carrera / Grado:** Ingeniería civil

**Campus:** Santiago San Joaquín ; **Departamento:** Obras civiles

### 2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Miguel Angel Lagos Zúñiga, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución

### 3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

El trabajo **NO contiene información que amerite confidencialidad** y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por:

6 meses;  12 meses;  2 años;  3 años;  5 años;  10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

### 4.- FIRMAS

**Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:**

Fecha: 08/10/2025

; Firma:

**Estudiante o Candidato(a):**

Fecha: 08/10/2025

; Firma:

*Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.*



UNIVERSIDAD TECNICA  
FEDERICO SANTA MARIA

TITULO DE LA TESIS:

**Proyección de la oferta natural de recursos hídricos en la isla Robinson Crusoe bajo escenarios de cambio climático.**

AUTOR:

**Javiera Catalina Carreño Maldonado**

TRABAJO DE MEMORIA, presentado como requisito parcial para optar al título de la carrera de INGENIERIA CIVIL de la Universidad Técnica Federico Santa María.

	<u>Nombre</u>	<u>Firma</u>
Prof. Guía	Miguel Lagos Zúñiga	.....
Profesor Co-Guía	Lina Castro Heredia	.....
Miembro 1 Comisión	Paula Brito	.....

Santiago, Chile, Octubre de 2025

## TÍTULO DE LA MEMORIA

Javiera Carreño Maldonado<sup>1</sup>, Miguel Lagos Zúñiga<sup>1</sup>, Lina Castro Heredia<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidad Técnica Federico Santa María

### Resumen

La Isla Robinson Crusoe recibe el suministro hídrico principalmente de la escorrentía que generan las precipitaciones, siendo captado principalmente en pequeñas quebradas pertenecientes a sectores montañosos. Esta característica convierte al régimen de precipitaciones en un factor crítico para el abastecimiento hídrico de la isla, especialmente considerando su aislamiento geográfico y la limitada infraestructura de almacenamiento y distribución. En este contexto, el presente estudio se enfoca en analizar cómo podría variar la oferta natural del recurso hídrico en la isla bajo dos escenarios de cambio climático hacia finales del siglo XXI: SSP2-4.5 y SSP5-8.5. Para ello, se utilizan datos provenientes de modelos climáticos globales (GCMs) del *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6* (CMIP6), previamente seleccionados y evaluados en función de su capacidad para representar adecuadamente las condiciones climáticas locales de temperatura y precipitación. Posteriormente, se aplica el método estadístico de corrección de sesgo multivariado (MBCn) a los modelos seleccionados y, a partir de los datos corregidos, se estima la escorrentía disponible anual mediante el enfoque hidroclimático de Budyko y posteriormente mediante un modelo hidrológico conceptual: Sacramento Soil Moisture Accounting (SAC-SMA), con parámetros previamente calibrados en una cuenca continental climáticamente similar. Los resultados obtenidos muestran una disminución de 12,2% y 26,8% en la precipitación bajo los distintos escenarios, junto con un incremento de 1,1 y 1,8 °C en la temperatura media hacia finales de siglo. En relación con la escorrentía media anual, se evidencia una reducción considerable que varía entre un 30% y un 57% en promedio, dependiendo del escenario considerado. Asimismo, los caudales diarios asociados a una probabilidad de excedencia del 85% presentan una disminución promedio del 80%. Estos hallazgos advierten sobre una amenaza significativa a la seguridad hídrica futura de la isla, con implicancias relevantes para la gestión del recurso.

Palabras claves: Cambio climático, Disponibilidad hídrica, Modelos climáticos (CMIP6), Robinson Crusoe.

## ***Agradecimientos***

*En primer lugar, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi familia, en especial a mis padres, quienes han sido un pilar fundamental en mi formación tanto personal como profesional. Gracias por darme todo en la vida, por su amor incondicional, por acompañarme en los momentos de mayor estrés y por celebrar conmigo cada alegría en este camino. Agradezco también a mis hermanos por las risas, los consejos y el apoyo que me han brindado siempre.*

*A mis amigos, con quienes compartí esta travesía universitaria, les agradezco por cada jornada de estudio, por las interminables noches de desvelo, por las ventanas en cerrito y por el compañerismo que construimos a lo largo de estos años.*

*También a mis profesores, en especial al profesor Miguel Lagos y a la profesora Lina Castro, quienes no solo me entregaron los conocimientos necesarios en el aula para mi desarrollo profesional, sino que también me acompañaron y guiaron a lo largo de la realización de este trabajo, además de hacerme partícipe del proyecto FONDECYT 11220482, que de igual forma agradezco.*

*Por último, quiero dedicar una mención muy especial a mi abuelita Rebeca. Que, aunque hoy no está físicamente con nosotros, sé que se encuentra junto al Santo Padre intercediendo como siempre por su familia. Gracias por tu amor eterno, por tu fe en mí y por ser una presencia que aún se siente cercana en cada paso que doy.*

## Tabla de Contenido

1	Introducción.....	1
1.1	Objetivos.....	2
2	Revisión de Antecedentes .....	3
2.1	Cambio Climático .....	3
2.1.1	Cambio climático en Chile Continental.....	5
2.1.2	Cambio climático en Chile Insular .....	6
2.1.3	Modelación Hidrológica.....	7
3	Zona de Estudio.....	10
4	Metodología.....	13
4.1	Evaluación de desempeño de modelos CMIP6.....	13
4.1.1	Diagrama de Taylor.....	14
4.1.2	Índice de desempeño pasado (PPI).....	16
4.2	Análisis de proyecciones bajo escenarios de cambio climático.....	18
4.3	Balance hídrico a partir de Budyko.....	18
4.4	Oferta hídrica a partir de modelo hidrológico.....	20
5	Resultados y Análisis .....	21
5.1	Periodo histórico forzantes meteorológicas .....	21
5.2	Evaluación de GCMs .....	24
5.3	Corrección de Sesgo método MBCn.....	27
5.4	Balance Hídrico por método de Budyko.....	28
5.5	Variación de la oferta hídrica a partir de modelación hidrológica.....	30
6	Discusiones.....	37
6.1	Selección de modelos.....	37
6.2	Método MBCn .....	37
6.3	Método de Budyko.....	38
6.4	Modelación hidrológica .....	38
6.5	Limitaciones de los modelos climáticos en islas pequeñas.....	39
7	Conclusiones .....	40
	Anexos.....	44
A.	Resultados para el índice de desempeño pasado (PPI).....	44

## Índice de Tablas

Tabla 2-1: Promedio histórico de precipitación, caudal y evapotranspiración del periodo 1985-2014 y su correspondiente variación promedio para 2030-2060.....	7
Tabla 2-2: Factores de ponderación aplicados a cada captación y sus áreas correspondientes.....	9
Tabla 3-1: Ubicación y altitud de las estaciones meteorológicas de la isla Robinson Crusoe. ....	11
Tabla 4-1: Modelos climáticos evaluados.....	14
Tabla 5-1: Métricas de desempeño (M) y valores de <i>PPIpr</i> para los modelos CMIP6 seleccionados por su mayor capacidad para representar las condiciones climáticas en la isla Robinson Crusoe. ....	26
Tabla 5-2: Métricas de desempeño (M) y valores de <i>PPItas</i> para los modelos CMIP6 seleccionados por su mayor capacidad para representar las condiciones climáticas en la isla Robinson Crusoe. ....	26
Tabla 5-3: Valores de la distancia euclidiana (ED) para los modelos seleccionados por su mayor capacidad para representar las condiciones climáticas en la isla Robinson Crusoe. ....	26
Tabla 5-4: Variación porcentual de la escorrentía media anual (% $\Delta Q$ ) y de la precipitación anual promedio (% $\Delta P$ ), y cambio absoluto de la temperatura media anual ( $\Delta T$ , en °C), junto con sus respectivas desviaciones estándar ( $\sigma$ ), proyectados por los GCMs seleccionados para distintos periodos bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5.....	30
Tabla 5-5: Variación porcentual proyectada de la escorrentía media anual y desviación estándar entre modelos por captación, bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5.....	30
Tabla 5-6: Rangos de variación porcentual de la escorrentía media anual y del caudal diario proyectados bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 para distintos periodos.....	31
Tabla 5-7: Promedios de variación porcentual de la escorrentía media anual y caudales proyectados bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5.....	31
Tabla 5-9: Caudal promedio mensual y cambio porcentual proyectado para finales del siglo respecto al período histórico (1985–2014) para los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5. ....	36

## Índice de Ilustraciones

Figura 2-1. Evidencia de actividad humana en cambio climático. Fuente: Gráfico adaptado de IPCC AR6 Working Group I FAQ 3.1 por Connors Sarah et al. (2021). ....	3
Figura 2-2. a) Promedio anual de la temperatura media en Chile continental utilizando 175 estaciones. La línea segmentada gris indica la tendencia lineal. b) Precipitación total anual para Chile continental en milímetros (promedio anual de 382 estaciones) y línea segmentada de tendencia lineal. Fuente: (DMC, 2025) .....	5
Figura 3-1. a) Mapa de ubicación de la zona de estudio, junto a sus dos estaciones meteorológicas. b) Climograma de la Isla Robinson Crusoe, elaborado con datos de precipitación y temperatura diarias de la estación Juan Fernández de la DMC para el periodo 1985-2014. ....	10
Figura 3-2. a) Vista satelital de la isla Robinson Crusoe, destacando en el recuadro rojo la ubicación de la localidad de San Juan Bautista. b) Ampliación de la zona correspondiente a San Juan Bautista. ....	11
Figura 3-3. Captación Cortafuegos situada directamente en el cauce del estero. a) Piscina de captación vista aguas arriba. b) Piscina de captación en evento de precipitaciones. Fuente: Municipalidad Juan Fernández (2025).....	12
Figura 4-1. Diagrama de flujo de la metodología.....	13
Figura 4-2. Ejemplo de diagrama de Taylor que muestra la comparación estadística de ocho estimaciones de modelos de la precipitación media anual. Fuente: Taylor (2005).....	15
Figura 4-3. Esquema de criterios de selección de GCMs.....	18
Figura 4-4. Diagrama de Budyko (índice de evaporación vs. índice de aridez). Las líneas continuas representan los límites de energía y agua para el índice de evaporación, y la línea discontinua representa la curva teórica original de Budyko (Budyko, 1974). ....	19

Figura 5-1. Comparación de la precipitación acumulada anual observada y simulada por los modelos climáticos globales (1985–2014). La línea negra gruesa representa los valores registrados en la estación Juan Fernández (observados), mientras que cada modelo es representado por un color. ....	21
Figura 5-2: Comparación de la temperatura media anual observada y simulada por los modelos climáticos globales (1985–2014).....	22
Figura 5-3: Comparación de la precipitación promedio mensual observada y simulada por los modelos climáticos globales. ....	22
Figura 5-4: Comparación de la precipitación normalizada entre datos observados y simulaciones de modelos climáticos globales.....	23
Figura 5-5: Comparación de la temperatura media mensual observada y simulada por los modelos climáticos globales .....	23
Figura 5-6: Comparación de la temperatura media normalizada entre datos observados y simulaciones de modelos climáticos globales. ....	24
Figura 5-7. (a) Diagrama de Taylor para precipitación mensual promedio simulada por los GCMs. (b) Diagramas de Taylor para temperatura promedio mensual simulada por los GCMs.....	24
Figura 5-8. (a) Diagrama de Taylor para precipitación promedio normalizada simulada por los GCMs. (b) Diagramas de Taylor para temperatura promedio normalizada simulada por los GCMs.....	25
Figura 5-9. Índice de desempeño pasado para precipitación (eje x) y temperatura (eje y) donde cada punto representa un GCM. ....	25
Figura 5-10. Series históricas y proyecciones corregidas de (a) precipitación media anual y (b) temperatura media anual, donde las áreas sombreadas representan el rango de valores proyectados por los modelos para los escenarios SSP2-4.5 (celeste) y SSP5-8.5 (rojo). La línea negra corresponde a los datos observados de la estación Juan Fernández, mientras que las líneas azul y roja indican el promedio de los modelos para cada escenario.....	27
Figura 5-11. Diagrama de Budyko para la isla Robinson Crusoe, mostrando el promedio histórico y las proyecciones futuras de los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5, junto con las cuencas de referencia continentales.....	28
Figura 5-12. Variación relativa (%) de Q, P y ET bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 para 2071–2100 respecto a 1985–2014, estimada mediante el método de Budyko en la estación Juan Fernández. ....	29
Figura 5-13. Boxplots de la variación proyectada de escorrentía y caudal en la isla bajo los escenarios SSP2-4.5 (azul) y SSP5-8.5 (rojo) para tres periodos futuros: a) 2015–2039, b) 2040–2069 y c) 2070–2100. Los resultados se presentan para los métodos Budyko, Promedio, Q50 y Q85, expresados como cambio porcentual respecto al periodo histórico (1985–2014). ....	33
Figura 5-14. Curva de duración de caudales para la estación Juan Fernández en el periodo histórico 1985–2014.....	34
Figura 5-15. Variación interanual del caudal para finales del siglo. Se muestra el periodo histórico (1985–2014) representado en barras grises, junto con los a) Resultados de los modelos para los escenarios futuros SSP2-4.5 (líneas azules) y SSP5-8.5 (líneas rojas) y los b) Promedios de los modelos para los escenarios SSP2-4.5 (línea azul) y SSP5-8.5 (línea roja). ....	35

## Índice de Anexos

Anexos A. 1: Tabla con métricas de desempeño (M) y valores de $PPI_{pr}$ para los modelos CMIP6 considerados en este estudio.....	44
Anexos A. 2: Tabla con métricas de desempeño (M) y valores de $PPI_{tas}$ para los modelos CMIP6 considerados en este estudio.....	45
Anexos A. 3: Tabla con valores de la distancia euclidiana (ED) para los modelos analizados. ....	46
Anexos A. 4: Índice de desempeño pasado para precipitación (eje x) y temperatura (eje y) donde cada punto representa un GCM, donde $Sk = 1$ para todas las métricas.....	47

# 1 Introducción

El cambio climático se ha consolidado como uno de los principales desafíos del siglo XXI, con efectos cada vez más evidentes sobre los sistemas naturales y humanos. El aumento sostenido de gases de efecto invernadero producto de actividades humanas (como la quema de combustibles fósiles, la deforestación y la intensificación agrícola, entre otros) ha provocado un incremento de la temperatura global promedio, así como alteraciones en los patrones de precipitación, mayor frecuencia de eventos extremos y cambios en la disponibilidad de recursos hídricos (Connors et al., 2021).

En el caso de Chile continental, existe una creciente cantidad de investigaciones que evidencian la ocurrencia de una mega sequía debido a la disminución progresiva de las precipitaciones en la zona centro-sur y el retroceso de glaciares (Centro de Cambio Global UC, 2022; Dirección Meteorológica de Chile, 2024; DGA, 2022). Proyecciones recientes indican que, hacia fines del siglo XXI, las precipitaciones podrían disminuir hasta en un 30% en algunas zonas del país (Vásquez et al., 2025), lo que plantea importantes desafíos para la gestión del agua, especialmente en territorios vulnerables. A diferencia del territorio continental, las zonas insulares de Chile han sido escasamente abordadas por la literatura científica reciente en torno al cambio climático (Bustos, 2019).

En años recientes se han realizado esfuerzos preliminares para analizar simulaciones climáticas futuras mediante modelos del conjunto CMIP5 (AQUATERRA, 2025; Bustos, 2019), pero la baja resolución espacial de los Modelos de Circulación General (GCMs; entre 100-250 km) representa una limitación importante en contextos insulares de pequeña escala. Para abordar esta dificultad, se hace necesario aplicar técnicas de reducción de escala, como la corrección de sesgo multivariada mediante mapeo de cuantiles (MBCn; Cannon, 2018), que permite ajustar las proyecciones climáticas a condiciones locales, mejorando su representatividad y manteniendo la coherencia estadística entre temperatura y precipitación.

El presente estudio se centra en la isla Robinson Crusoe, ubicada a 670 kilómetros del continente, con una superficie de 48 km<sup>2</sup> y una población cercana a los mil habitantes (INE, 2022). Debido a su origen volcánico, carece de napas subterráneas y depende exclusivamente de captaciones superficiales para su abastecimiento de agua, el cual no cuenta con registros fluviométricos completos (Municipalidad Juan Fernández, 2025). Esta situación genera incertidumbre sobre la capacidad real de abastecimiento, problemática que se agrava por la alta biodiversidad y presencia de especies endémicas amenazadas por el cambio climático, cuyos efectos incluyen un aumento de eventos extremos, como sequías, olas de calor o periodos prolongados de déficit hídrico, que impactan tanto en los ecosistemas como en la población residente (Ortíz A & Campillo R, 1982).

Ante este escenario, es fundamental avanzar en estudios que permitan proyectar la disponibilidad hídrica futura y orientar estrategias de gestión que aseguren un abastecimiento sostenible para la población. Para ello, se generan proyecciones de escorrentía a partir de dos aproximaciones complementarias. En primer lugar, se emplea un enfoque climatológico basado en el marco teórico de Budyko, que permite establecer la relación entre la precipitación y la evapotranspiración potencial. En segundo lugar, se utiliza el modelo hidrológico conceptual *Sacramento Soil Moisture Accounting* (SAC-SMA) (Burnash et al., 1973), previamente desarrollado para la isla en base a criterios de similitud con una cuenca continental. A partir de información meteorológica diaria —precipitación, temperatura y evapotranspiración potencial—, este modelo permite simular los caudales de salida. En conjunto, ambas metodologías ofrecen una visión integrada de la oferta hídrica de la isla y constituyen una herramienta de apoyo para la toma de decisiones frente a los desafíos asociados al cambio climático.

*Nota: En este informe se utiliza el punto (.) como separador decimal, a diferencia de la convención chilena que emplea la coma (,) como separador decimal.*

## 1.1 Objetivos

La presente memoria tiene como objetivo principal evaluar los impactos del cambio climático en la oferta natural de recursos hídricos de la isla Robinson Crusoe mediante el uso de modelos climáticos globales y modelación hidrológica, analizando proyecciones bajo distintos escenarios de emisiones y horizontes temporales. Este se logra a partir de 4 objetivos específicos que son:

- Analizar la capacidad de los modelos climáticos CMIP6 para reproducir las condiciones históricas de la isla Robinson Crusoe, comparando sus simulaciones con los datos observados (Gateño et al., 2024), con el fin de identificar los modelos más representativos para elaborar proyecciones de impactos futuros en la isla.
- Analizar proyecciones de condiciones climáticas futuras de precipitación y temperatura de los modelos climáticos CMIP6 más representativos, aplicando una corrección de sesgo mediante el método MBCn (Cannon, 2018) para los horizontes temporales 2030-2060 y 2070-2100, a través de simulaciones basadas en los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5.
- Estimar la oferta hídrica en la isla Robinson Crusoe mediante el enfoque de Budyko (Budyko, 1974) con el propósito de identificar posibles cambios en la disponibilidad de agua superficial promedio bajo condiciones climáticas futuras.
- Evaluar la variación proyectada de la oferta hídrica en la isla Robinson Crusoe frente a escenarios de cambio climático, utilizando el modelo hidrológico implementado por Hinostroza (2025), con el objetivo de prever variaciones críticas en la disponibilidad del recurso hídrico para distintas probabilidades de excedencia.

## 2 Revisión de Antecedentes

Comprender los impactos del cambio climático sobre la disponibilidad hídrica requiere apoyarse en un marco conceptual y metodológico que permita interpretar adecuadamente los procesos climáticos e hidrológicos involucrados. En esta sección se revisan, los fundamentos del cambio climático y su relación con la variabilidad en la temperatura y precipitación, con énfasis en los efectos proyectados sobre la oferta hídrica. A continuación, se presenta una síntesis de los principales estudios internacionales y nacionales relacionados con estos fenómenos para el país, incluyendo los desafíos particulares que enfrentan en los territorios insulares de pequeña escala. Finalmente, se aborda el uso de modelos hidrológicos y enfoques simplificados como herramientas clave para evaluar escenarios futuros, evaluando así cambios en la disponibilidad hídrica con diferentes métodos y su aplicación en contextos de baja disponibilidad de datos, como ocurre en la isla Robinson Crusoe.

### 2.1 Cambio Climático

El cambio climático se refiere a las variaciones a largo plazo de las temperaturas y los patrones climáticos, que, si bien pueden tener causas naturales, desde el siglo XIX se deben principalmente a las actividades humanas, especialmente a la quema de combustibles fósiles (Connors et al., 2021). La comunidad científica ha demostrado que somos responsables del calentamiento global registrado en los últimos 200 años, ya que estas actividades liberan gases de efecto invernadero en la atmósfera, como el dióxido de carbono, el metano y el óxido nitroso, lo que ha provocado un aumento sostenido de la temperatura global (IPCC, 2021). Este fenómeno se debe a que dichos gases interfieren en el balance energético de la Tierra, ya que incrementan la capacidad de la atmósfera para absorber y retener la energía emitida por la superficie terrestre, dificultando su escape hacia el espacio.

La Figura 2-1 presenta simulaciones de modelos climáticos (áreas sombreadas) que comparan distintos escenarios: gases de efecto invernadero (rojo), aerosoles y otros forzamientos humanos (azul), causas naturales (verde) y todos los factores combinados (gris), junto con el cambio real de la temperatura global (línea negra). En esta, se observa que los modelos solo logran reproducir el aumento registrado cuando incorporan las emisiones humanas, lo que respalda la evidencia de su influencia. Además, se aprecia un aumento sostenido de la temperatura desde la era preindustrial, alcanzando entre 2011 y 2020 una media global 1,1 °C superior a la del siglo XIX (Connors et al., 2021).

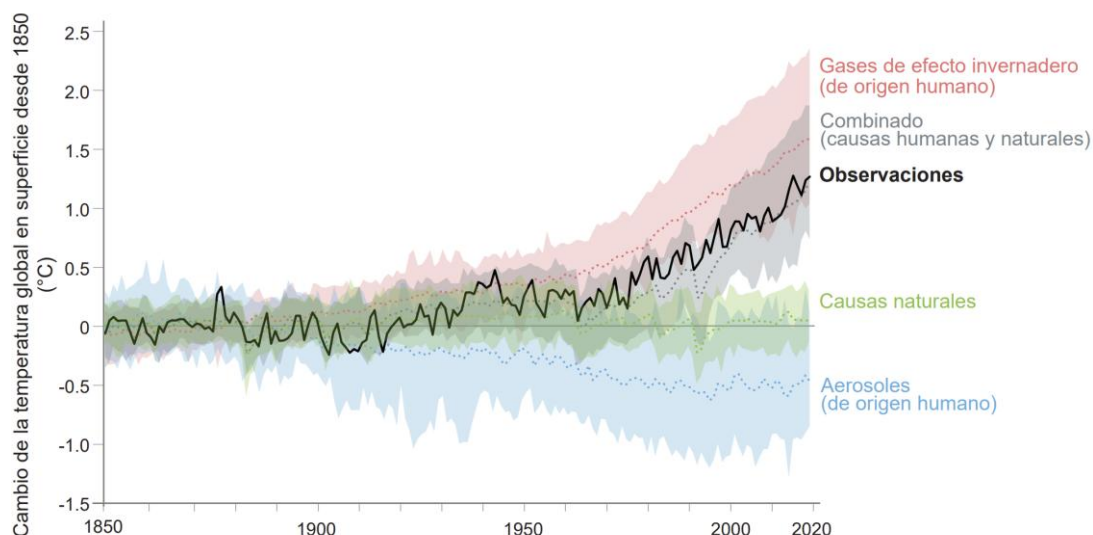


Figura 2-1. Evidencia de actividad humana en cambio climático. Fuente: Gráfico adaptado de IPCC AR6 Working Group I FAQ 3.1 por Connors Sarah et al. (2021).

Frente a esta problemática se crea el Panel Intergubernamental de Expertos sobre el cambio climático (IPCC) en 1988 que realiza evaluaciones integrales del estado de los conocimientos científicos, técnicos y socioeconómicos sobre el cambio climático, sus causas, posibles repercusiones y estrategias de respuesta. Desde sus primeros informes, el IPCC advirtió sobre la influencia potencial de las actividades humanas en el sistema climático y hoy, más de tres décadas después, está claro que las acciones humanas han alterado significativamente el clima global (IPCC, 2025).

Una de las principales herramientas utilizadas por el IPCC en sus evaluaciones han sido los Modelos de Circulación General (GCMs), los cuales son herramientas computacionales que simulan el comportamiento del sistema climático a partir de principios físicos, químicos y biológicos. Estos modelos permiten comprender los cambios climáticos pasados y proyectar escenarios futuros. Al comparar sus resultados con observaciones históricas y evidencia paleoclimática, los científicos pueden evaluar su precisión y confiabilidad. Además, los GCMs permiten explorar distintos futuros posibles en función de las decisiones humanas, como la reducción o continuidad de las emisiones de gases de efecto invernadero, y estimar sus impactos sobre variables clave como el nivel del mar, la ocurrencia de eventos extremos o la calidad del aire.

Los GCMs entregan resultados en grillas generalmente gruesas (>100 km), lo que dificulta la representación de procesos a escala regional, especialmente en un territorio con una geografía compleja como la de Chile (Sharma et al., 2007). Ante esta limitación, se han desarrollado diferentes métodos de reducción de escala, los cuales pueden clasificarse en métodos estadísticos y dinámicos.

Los métodos estadísticos utilizan observaciones locales para establecer relaciones entre variables regionales y globales, presentando la ventaja de requerir menores recursos computacionales. Entre ellos destaca el mapeo de cuantiles, técnica que corrige los sesgos sistemáticos de los GCMs mediante la igualación de las curvas de distribución acumulada de las observaciones y de las simulaciones históricas de los modelos (Cannon et al., 2015).

Por su parte, los métodos dinámicos corresponden a los Modelos Climáticos Regionales (RCMs), que simulan áreas limitadas con resoluciones que pueden alcanzar entre 50 y 25 km, incorporando además información detallada como la topografía y la heterogeneidad de la cobertura del suelo. Estos modelos son forzados con condiciones de contorno e inicialización provenientes de GCMs y permiten mejorar la representación de circulaciones atmosféricas y variables climáticas a escalas finas. No obstante, son computacionalmente demandantes, lo que limita tanto la duración de sus simulaciones como la disponibilidad de datos en ciertas regiones (Christensen et al., 2001).

Para proyectar los posibles efectos del cambio climático bajo distintos contextos, se han desarrollado escenarios de cambio global que permiten estimar las consecuencias del aumento de los gases de efecto invernadero sobre el sistema climático. Entre estos, destacan los Patrones de Concentración Representativos, RCP, las cuales representan distintos niveles de forzamiento radiactivo. Estos escenarios permiten incorporar la incertidumbre asociada a las proyecciones climáticas, facilitando el análisis de cómo podrían variar variables clave como la temperatura, la precipitación y otros aspectos del clima futuro (Ruiz-Gracia et al., 2022).

Recientemente en el sexto informe de evaluación del IPCC (IPCC, 2023) se introdujo el uso de las Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP) como una herramienta para representar posibles caminos de desarrollo social y económico que influyen en los niveles futuros de emisiones, así como en las capacidades de mitigación y adaptación al cambio climático. Estos escenarios se complementan con los RCP integrando así tanto los aspectos ambientales como sociales que podrían afectar el sistema climático en las próximas décadas.

Los SSP se caracterizan por describir tendencias socioeconómicas y ambientales a nivel global, incluir información cuantitativa y cualitativa sobre desafíos de mitigación y adaptación, e incorporar datos integrados sobre energía, economía y uso de suelo basados en modelos climáticos globales. La comunidad científica internacional ha desarrollado cinco vías: desarrollo sostenible (SSP1), desarrollo intermedio (SSP2), rivalidad regional (SSP3), desigualdad (SSP4) y desarrollo basado en combustibles

fósiles (SSP5), que permiten a los profesionales explorar los cambios climáticos en una gama de futuros muy diferentes (Riahi et al., 2017).

### 2.1.1 Cambio climático en Chile Continental

Dada su variabilidad climática, Chile continental ha sido objeto de numerosos estudios científicos que evidencian con claridad los efectos actuales del cambio climático sobre el sistema climático y los recursos naturales del país (Arroyo et al., 2019; Rojas et al., 2019; Sarricolea Espinoza & Romero Aravena, 2015; Vicuña et al., 2021). En línea con estos antecedentes, la Dirección Meteorológica de Chile (DMC, 2024) reporta que la temperatura media nacional presenta una tendencia de  $+0,15\text{ }^{\circ}\text{C}$  por década, mientras que la precipitación muestra una reducción cercana al 4 % por década, con descensos particularmente marcados en la zona centro y centro-sur. Estas tendencias, documentadas a partir de observaciones de más de seis décadas, confirman un patrón sostenido de calentamiento y aridificación en el territorio nacional.

DMC (2025) señala que este fue el cuarto año más cálido en los últimos 64 años, con una temperatura media nacional de  $13,3\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Figura 2-2 a), lo que representa un aumento de  $0,9\text{ }^{\circ}\text{C}$  por sobre el promedio del período 1961-1990, además, el 88 % del territorio presentó condiciones más cálidas que el promedio histórico. En cuanto a las precipitaciones, el promedio nacional fue de  $622,7\text{ mm}$  (Figura 2-2 b), ubicándose como el vigésimo sexto año más seco desde 1961. La tendencia observada es de  $-24\text{ mm}$  por década, equivalente a una reducción del 3 % cada diez años, acelerándose a casi el doble en las últimas cuatro décadas. Asimismo, la década 2011-2020 se registró como la más cálida en los últimos 64 años, con un aumento de  $0,72\text{ }^{\circ}\text{C}$  en la temperatura media, y como la más seca, con una disminución del 18,7 % en las precipitaciones (DMC, 2025).

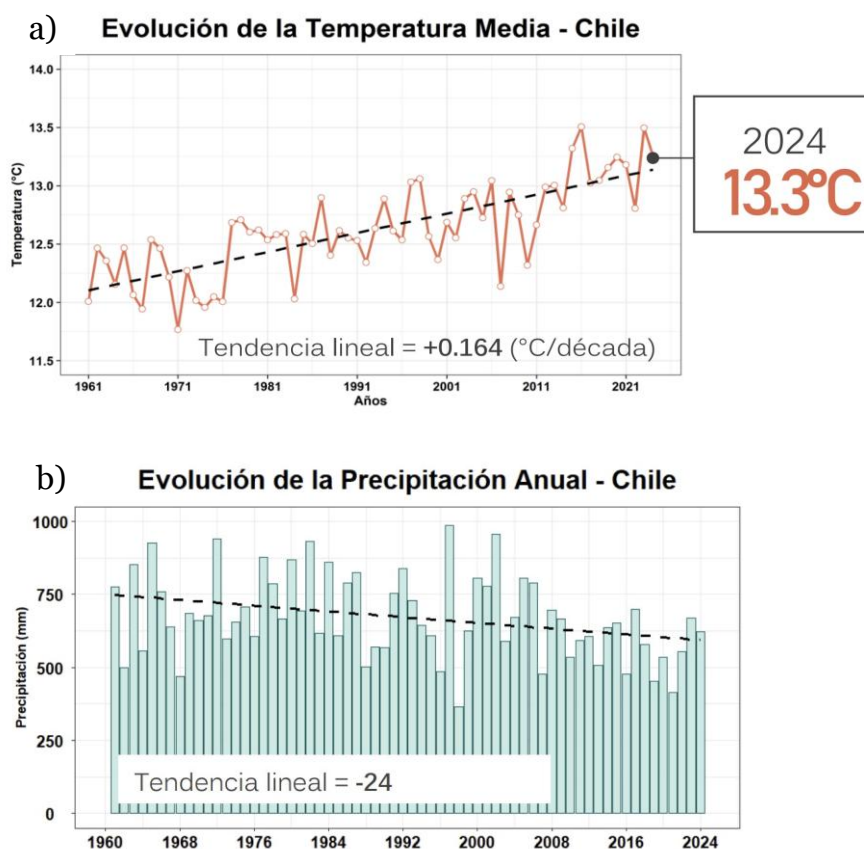


Figura 2-2. a) Promedio anual de la temperatura media en Chile continental utilizando 175 estaciones. La línea segmentada gris indica la tendencia lineal. b) Precipitación total anual para Chile continental en milímetros (promedio anual de 382 estaciones) y línea segmentada de tendencia lineal. Fuente: (DMC, 2025)

En cuanto a proyecciones futuras, Salazar et al. (2024) evaluaron la temperatura y la precipitación en Chile a partir de 36 modelos CMIP6, considerando cuatro escenarios SSP y distintas subregiones del país. Entre sus resultados, para la zona de Chile Central se proyecta una disminución de entre un 20 % y un 40 % en las precipitaciones, junto con un aumento de hasta 5 °C para el escenario SSP5-8.5 hacia finales del siglo. El estudio concluye que el incremento de la temperatura aceleraría el ciclo hidrológico, lo que implica que los flujos de agua (evaporación, evapotranspiración, precipitación y escorrentía) tenderían a intensificarse y a ocurrir con mayor rapidez debido al calentamiento. Esta aceleración, combinada con la variación en las precipitaciones, podría aumentar tanto la frecuencia como la severidad de eventos extremos, tales como sequías, olas de calor y la pérdida acelerada de masa glaciar.

En el estudio “Homologación del Cálculo Hidrológico para la Estimación de la Oferta Natural de Agua Histórica y Futura en Chile”, también conocido como Balance Hídrico Nacional (DGA, 2022) se analizan proyecciones futuras de precipitación y temperatura utilizando cuatro modelos CMIP5 bajo el escenario RCP8.5, que es el más desfavorable de esta familia de escenarios y supone un incremento de la forzante radiativa de 8,5 W/m<sup>2</sup> hacia fines del año 2100. Los modelos seleccionados: CCSM4, CSIRO-MK3-6-0, IPSL-CM5A-LR y MIROC-ESM corresponden a GCMs que presentan una correlación adecuada con el fenómeno de El Niño (ENSO) y con el Modo Anular del Sur (SAM), además de mostrar diferentes sensibilidades climáticas. Debido a la resolución espacial gruesa de estos modelos se aplica el método de corrección de sesgo MBCn.

Los resultados indican que todos los GCMs considerados proyectan aumentos de temperatura en todo el territorio continental de Chile, con valores que varían entre 0,5 y 3 °C para el periodo 2030-2060. En cuanto a la precipitación, los cambios estimados para el mismo periodo se encuentran entre -550 a 350 mm/año. Para la escorrentía media anual, sin considerar el aporte glaciar, se observa una tendencia general a la disminución, en promedio de un 30% y de hasta un 50% para algunos modelos, entre las latitudes 25° S y 45° S.

Gateño et al. (2024), evaluaron las simulaciones de 27 modelos CMIP6 y generar proyecciones robustas en cinco regiones con climas muy diferentes en todo Chile continental. Los resultados muestran un acuerdo consistente entre los modelos respecto al calentamiento futuro en las macrozonas, así como una señal de sequía en el centro y sur del país. Los GCMs corregidos, seleccionados a partir de su desempeño, proyectan la sequía más pronunciada en el centro de Chile, con una reducción del 37% en la precipitación anual y un aumento de temperatura más severo en el extremo norte, de hasta 3,7°C para finales del siglo.

### **2.1.2 Cambio climático en Chile Insular**

A pesar de la creciente preocupación por los efectos del cambio climático en el territorio nacional, los estudios de esta área en zonas insulares como el archipiélago Juan Fernández han sido escasos. Esta falta de investigación se explica, en gran medida, por el aislamiento geográfico de las islas, que dificulta tanto el acceso como la instalación de infraestructura de monitoreo permanente. Además, la escasez de recursos y la baja priorización histórica de los territorios insulares en las agendas políticas y científicas han limitado la continuidad de estudios sistemáticos. Como resultado, existe un vacío importante de información sobre cómo el cambio climático podría afectar los sistemas ecológicos y sociales de estas zonas altamente vulnerables.

No obstante, en el estudio DGA (2022) se incluyen también las cuencas insulares de Juan Fernández y Rapa Nui. Para ambas, se emplea información grillada del producto CR2MET con el fin de estimar los promedios históricos del período 1985–2014, así como las proyecciones futuras de precipitación, caudal y evapotranspiración obtenidas a partir de los cuatro modelos climáticos considerados en el estudio. Estas variables se utilizan como insumos para la modelación hidrológica mediante el modelo de capacidad de infiltración variable (VIC), el cual permite simular el balance hídrico a partir de forzantes meteorológicas distribuidas espacialmente. En la Tabla 2-1 se presentan los valores históricos y los promedios proyectados para el período 2030–2060 correspondientes a la isla Robinson Crusoe.

Tabla 2-1: Promedio histórico de precipitación, caudal y evapotranspiración del periodo 1985-2014 y su correspondiente variación promedio para 2030-2060.

P [mm/año]	$\Delta P$	Q [mm/año]	$\Delta Q$	ET [mm/año]	$\Delta ET$
997.655	-11%	599.238	-17%	351.439	-1%

También existe un estudio desarrollado por el Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (Bustos, 2019) cuyo objetivo fue generar proyecciones climáticas para Juan Fernández y Rapa Nui a partir de simulaciones CMIP5 realizadas con seis modelos climáticos. En este trabajo se consideraron dos escenarios futuros: RCP8.5 y RCP2.6, aplicando un método de escalamiento estadístico para obtener proyecciones coherentes con el régimen medio y con los extremos climáticos observados en ambas zonas. Los resultados indican que, para Juan Fernández, bajo el escenario RCP8.5 se proyecta un aumento medio de temperatura de 2°C hacia el año 2100, mientras que en el escenario de bajas emisiones de gases de efecto invernadero (RCP2.6) el incremento sería de 0,5 °C. En cuanto a la precipitación anual, se estima una disminución cercana al 30 % hacia fines de siglo, con algunos modelos proyectando reducciones de hasta un 50 % para el escenario RCP8.5.

### 2.1.3 Modelación Hidrológica

Un modelo hidrológico es una representación matemática de una cuenca que, a través de parámetros y ecuaciones específicas, permite simular sus procesos y analizar aspectos particulares según el objetivo del estudio (Musy et al., 2014). Esta herramienta es clave para entender cómo las variaciones en la lluvia, nieve o los glaciares afectan la escorrentía, lo que resulta esencial en la gestión de recursos hídricos y en la planificación frente a eventos climáticos extremos. La Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE), fue uno de los pioneros en introducir términos básicos para clasificar los tipos de modelos, luego una serie de investigadores han propuesto otras clasificaciones (Singh & Frevert, 2006; Solomatine & Wagener, 2011; Devia et al., 2015; Abdulkareem et al., 2018) en función de sus parámetros de entrada en el espacio-tiempo y grado de aplicación de los principios físicos (Orianna Sofia & Méndez Rivas, 2022).

De acuerdo con la clasificación propuesta por Jajarmizad et al. (2012), dentro de los modelos hidrológicos determinísticos, que son aquellos que está gobernado por las leyes de la física y su dinámica observable, podemos encontrar los modelos conceptuales (e.g., SAC-SMA, HBV, GR4J) y los de base física (e.g., VIC, SWAT, MIKE SHE). Los primeros, suelen tener una naturaleza global y dependen en gran medida de la calidad de los datos de entrada. Estos modelos de precipitación-escorrentía se construyen a partir de relaciones empíricas observadas o asumidas entre las variables del sistema hidrológico. En contraste, los modelos distribuidos de base física resuelven ecuaciones diferenciales que describen las leyes de conservación de la masa, la energía y la cantidad de momento (Liu et al., 2017).

En el contexto nacional, la Dirección General de Aguas (DGA) ha incorporado la modelación hidrológica como una herramienta fundamental para la evaluación y gestión de los recursos hídricos. En particular, ha implementado el modelo *Variable Infiltration Capacity* (VIC; Liang et al., 1996; Wood et al., 1992), un modelo hidrológico de base física y distribuido espacialmente, para simular el balance hídrico y estimar la disponibilidad de agua en diversas cuencas del país, incluyendo las islas de Juan Fernández y Rapa Nui (DGA, 2022).

En el caso particular de las islas oceánicas, donde la disponibilidad de información meteorológica es limitada, la DGA complementa los registros locales de precipitación, temperaturas extremas, humedad relativa y velocidad del viento diaria, provenientes de las estaciones Mataveri (Rapa Nui) y Juan Fernández (Robinson Crusoe), con productos grillados de origen satelital y de reanálisis atmosférico, entre ellos el producto satelital IMERG (Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM; Huffman et al., 2013). Con ello, se garantiza una mayor coherencia espacio-temporal en los forzantes climáticos utilizados para configurar y alimentar el modelo hidrológico VIC, asegurando así una simulación más realista del balance hídrico en estos territorios insulares.

El trabajo de Hinostroza (2025) buscó representar el funcionamiento del sistema hídrico en la isla Robinson Crusoe mediante la aplicación del modelo Sacramento Soil Moisture Accounting (SAC-SMA; Burnash et al., 1973). Este corresponde a un modelo conceptual que simula caudales a partir de la precipitación, temperatura y, opcionalmente, evapotranspiración potencial. Este opera bajo una configuración tipo concentrada (lumped), por lo que trabaja con valores promedios a nivel de cuenca sin considerar heterogeneidad espacial ni de forzantes ni de parámetros. Su estructura se compone de cinco módulos que procesan el ciclo hidrológico de forma secuencial: un módulo maestro (Hidrosim), un módulo de nieve (SNOW-17), un módulo de cálculo de la ETP que se basa en la fórmula propuesta por Hamon (1960), expresado en la Ecuación (2.1), adaptable a las condiciones específicas del territorio, el módulo SAC-SMA que permite estimar los flujos de evapotranspiración, escorrentía y flujo subterráneo, y un módulo de enrutamiento para calcular el caudal de salida.

$$PET = 0.55 \cdot 0.013 \cdot L_d \cdot \frac{217.9 \cdot e_s(T)}{T + 273.3} \quad (2.1)$$

Donde,  $PET$  es la evapotranspiración potencial diaria (mm/día),  $L_d$  es el número de horas de luz solar por día,  $e_s(T)$  la presión de vapor de saturación (kPa) y  $T$  la temperatura media diaria del aire (°C).

Dado que en la isla no existen registros de caudales que permitan la calibración directa del modelo, Hinostroza implementó una estrategia de transferencia de parámetros a partir de cuencas donantes previamente calibradas. Para seleccionar la cuenca más adecuada, se utilizó el índice de disimilitud propuesto por Beck et al. (2016), expresado en la Ecuación (2.2), el cual permite identificar mediante una clasificación de píxeles basada en atributos climáticos y fisiográficos, la cuenca continental más similar al área de estudio.

Este procedimiento, conocido como regionalización de parámetros, consiste en identificar la cuenca que presenta la menor disimilitud respecto al píxel receptor (la isla Robinson Crusoe), considerando variables como el índice de aridez (IA), la precipitación media anual (P), la temperatura media anual (TA), el coeficiente de compacidad (CC) y la pendiente media (PM). La cuenca que alcanza el menor valor del índice de disimilitud se selecciona como cuenca donante, a partir de la cual se transfieren los parámetros necesarios para la simulación del comportamiento hidrológico en la isla. En este estudio, Hinostroza (2025) identificó como cuenca más similar al Río Cauquenes (36.02° S, 72.38° O), que presentó el menor valor de disimilitud, con un área de 622,1 km<sup>2</sup> y una elevación media de 308 m s.n.m.

$$S_{i,j} = \sum_{p=1}^{n_p} \frac{|Z_{p,i} - Z_{p,j}|}{IQR_p} \quad (2.2)$$

Donde  $S_{i,j}$  es el índice de disimilitud entre la cuenca  $i$  y la cuenca  $j$ ,  $n_p$  es el número total de atributos considerados,  $Z_{p,i}$  y  $Z_{p,j}$  son el valor del atributo número  $p$  para las cuencas y  $IQR_p$  es el rango intercuartil de la serie de atributo  $p$ .

Para la calibración del modelo, Hinostroza utiliza el algoritmo de optimización SCE-UA (Shuffle Complex Evolution; Duan, 1992), minimizando la diferencia entre los caudales simulados y los observados en la cuenca donante. Para esto, se definen tres periodos en base a la disponibilidad de datos de la cuenca donante, un periodo de warm-up, comprendido entre el 01/04/1979 y el 31/03/1983; un periodo de calibración, entre el 01/04/1983 y el 31/03/1999; y finalmente un periodo de validación, que se extiende desde el 01/04/1999 hasta el 31/12/2019.

Este procedimiento permite la calibración automática de los 26 parámetros que controlan los distintos procesos hidrológicos del modelo SAC-SMA, los cuales representan aspectos clave como la capacidad de almacenamiento del suelo, la percolación, el flujo base, el escurrimiento superficial y la evapotranspiración potencial. Aunque el modelo incorpora parámetros asociados al módulo de acumulación y derretimiento de nieve (SNOW17), estos no se consideran, dado que en la isla Robinson Crusoe las temperaturas se mantienen consistentemente por sobre los 0 °C, lo que excluye la ocurrencia de procesos nivales relevantes para la simulación.

Con el fin de analizar la variabilidad espacial de la precipitación en la isla Robinson Crusoe, Hinostroza (2025) aplicó una interpolación Inverse Distance Weighting (IDW) utilizando nueve puntos IMERG distribuidos sobre el territorio insular. La grilla de interpolación, compuesta por  $100 \times 100$  puntos, fue generada a partir de un Modelo Digital de Elevación (DEM), delimitando los valores dentro del contorno de la isla. La interpolación se realizó a escala mensual, con el objetivo de representar la distribución espacial de la precipitación en función de la influencia topográfica. Los resultados mostraron que el sector central de la isla concentra los mayores aportes pluviométricos, mientras que los extremos este y oeste presentan valores significativamente menores. Esta distribución corrobora lo señalado en estudios previos y valida la representatividad espacial de los datos utilizados en la modelación hidrológica.

Para la modelación hidrológica en la isla Robinson Crusoe, este estudio definió las principales características fisiográficas de las cinco captaciones de agua que abastecen a la población local, considerando como variables relevantes el área, la latitud, la longitud y la elevación media. Estas variables son fundamentales para la representación espacial de las condiciones hidrológicas y para la implementación del modelo SAC-SMA en un contexto insular. En función de lo anterior, se fijaron tres parámetros comunes para la modelación: una elevación media de 255.46 m s.n.m., una latitud de  $-33.63^\circ$  y una longitud de  $-78.85^\circ$ , además del área específica correspondiente a cada captación, que se determinó mediante la delimitación de cuencas en la Bahía de Cumberland, utilizando el software QGIS y cuyos valores se presentan en la Tabla 2-2.

Las forzantes meteorológicas utilizadas corresponden a la precipitación (P) y la temperatura (T), obtenidas a partir de la información disponible en la estación Juan Fernández de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC). No obstante, con el objetivo de incorporar el efecto de la variabilidad espacial de la precipitación, se determinó un factor de ponderación, expresado en la Ecuación (2.3) calculado a partir del cociente entre el promedio de la precipitación total mensual ( $Pm_{captación}$ ) obtenido en la Interpolación IDW para cada captación y el promedio registrado en la estación Juan Fernández ( $Pm_{Estación JF}$ ) en el mismo período. En la Tabla 2-2 se presentan el factor de ponderación aplicado a la serie de tiempo de la estación Juan Fernández.

$$FP = \frac{Pm_{captación}}{Pm_{Estación JF}} \quad (2.3)$$

Tabla 2-2: Factores de ponderación aplicados a cada captación y sus áreas correspondientes.

Captación	Índice	Área [km <sup>2</sup> ]
Cortafuegos	1.015	1.09
El Guindal	1.025	0.183
Juan Bueno	1.029	1.154
Carbonera	1.031	0.626
Dama Juana	1.032	0.451
Estación Juan Fernández	1	-

### 3 Zona de Estudio

La isla Robinson Crusoe, ubicada entre la latitud  $33^{\circ}36'$  y  $33^{\circ}43'$  S y longitud  $78^{\circ}48'$  y  $78^{\circ}46'$  O, forma parte del archipiélago de Juan Fernández, perteneciente a la Región y Provincia de Valparaíso, Chile. Presenta un clima templado cálido con lluvias invernales y una precipitación promedio anual de 1000 mm, concentrada principalmente en sectores sobre los 500 m s. n. m. (INE, 2022), y una temperatura media anual de  $15^{\circ}\text{C}$ . La isla cuenta con dos estaciones meteorológicas, La Punta y Juan Fernández, ambas administradas por la Dirección Meteorológica de Chile (DMC). La estación Juan Fernández dispone de registros desde 1963 hasta 2025, alcanzando una completitud cercana al 95%. Por su parte, la estación La Punta, en funcionamiento desde 2013 hasta 2024, presenta series de datos incompletas.

En la Figura 3-1 se presenta la ubicación de la zona de estudio, junto con la localización de las estaciones meteorológicas y el climograma correspondiente al período 1985–2014. Complementariamente, en la Tabla 3-1 se entregan las coordenadas y la altitud de dichas estaciones.

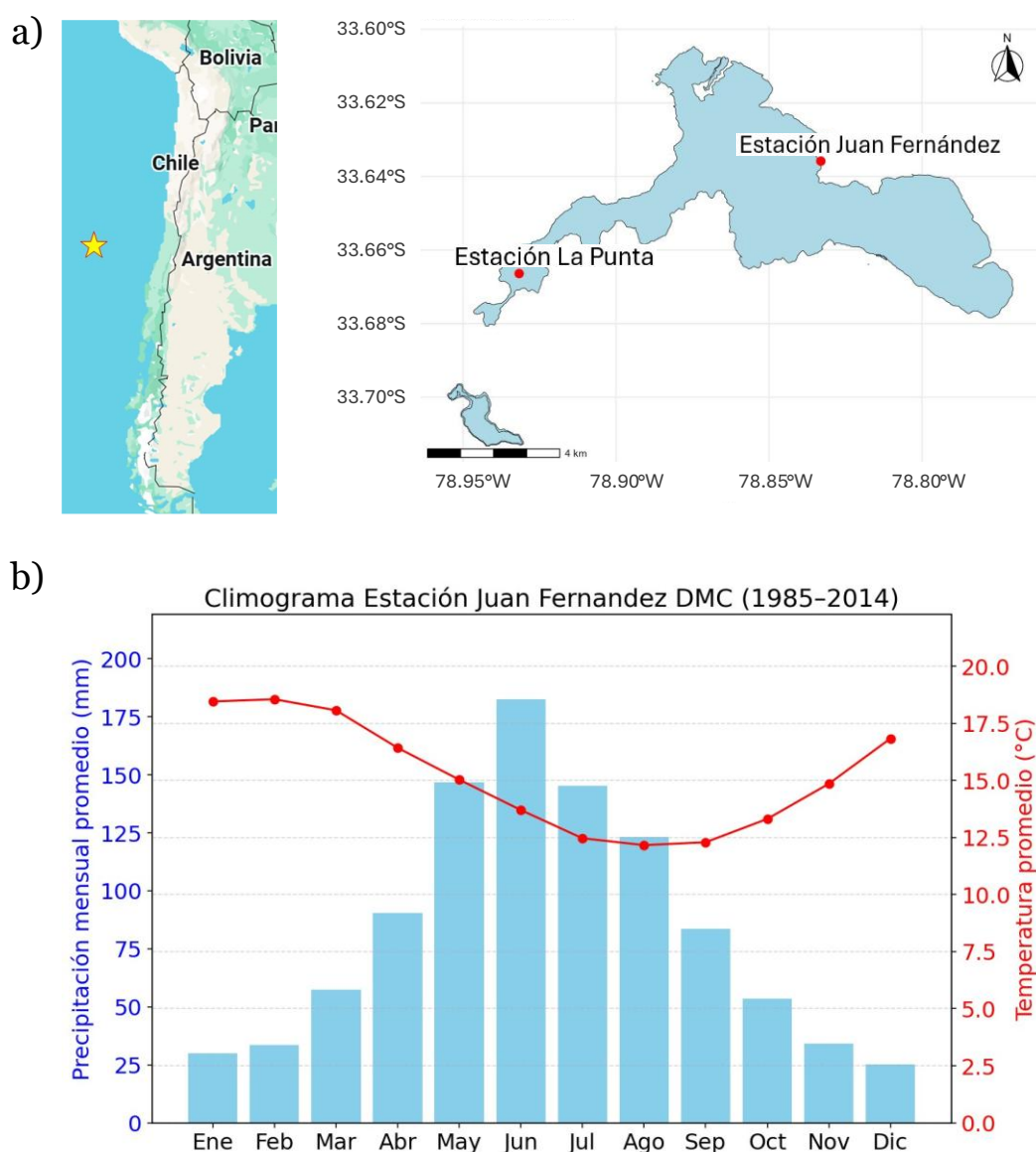


Figura 3-1. a) Mapa de ubicación de la zona de estudio, junto a sus dos estaciones meteorológicas. b) Climograma de la Isla Robinson Crusoe, elaborado con datos de precipitación y temperatura diarias de la estación Juan Fernández de la DMC para el período 1985-2014.

Tabla 3-1: Ubicación y altitud de las estaciones meteorológicas de la isla Robinson Crusoe.

Estación	Código	Latitud	Longitud	Altitud [m]
La Punta	330066	-33.666	-78.932	126
Juan Fernández	330031	-33.636	-78.833	40

El archipiélago de Juan Fernández se ubica sobre la dorsal del mismo nombre, una cadena de volcanes submarinos de aproximadamente 800 km de longitud, cuyas islas corresponden a la parte emergida de los volcanes de mayor tamaño. La superficie de la isla está compuesta principalmente por rocas volcánicas, predominando basaltos y depósitos piroclásticos como aglomerados y tobas (Ortiz A & Campillo R, 1982), por lo que no cuenta con napas subterráneas significativas. Actualmente, la isla no presenta actividad volcánica registrada y es considerada inactiva (AQUATERRA Ingenieros Ltda, 2025).

La población se concentra principalmente en la localidad de San Juan Bautista (Figura 3-2), ubicada en la costa norte de la isla y dotada de servicios básicos como electricidad, salud y educación. En lo que respecta al recurso hídrico, la morfología del terreno y la ausencia de napas subterráneas hacen que el abastecimiento dependa exclusivamente de captaciones superficiales, cuya disponibilidad está determinada por el régimen de precipitaciones.

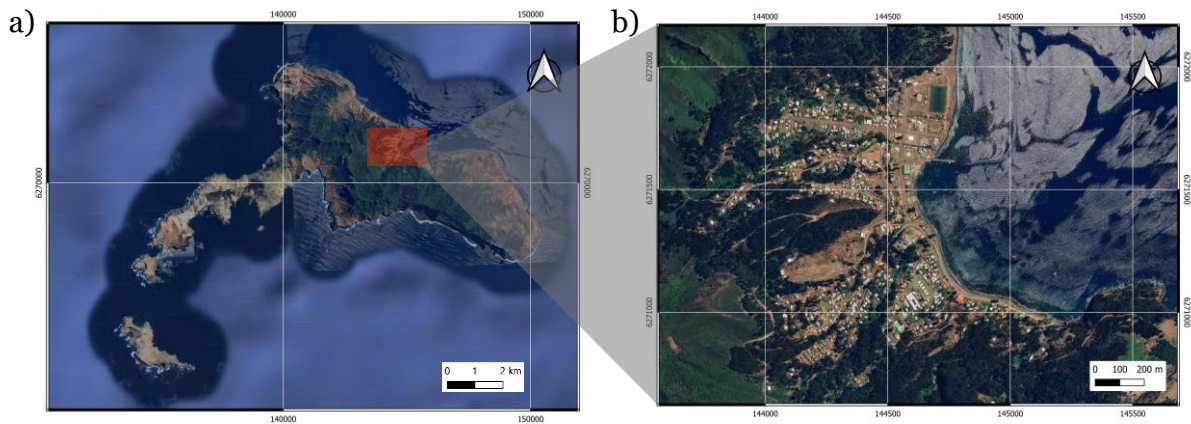


Figura 3-2. a) Vista satelital de la isla Robinson Crusoe, destacando en el recuadro rojo la ubicación de la localidad de San Juan Bautista. b) Ampliación de la zona correspondiente a San Juan Bautista.

El municipio de Juan Fernández administra los procesos de captación, aducción, tratamiento, regulación y distribución del agua de uso doméstico para la población mediante un sistema de infraestructura limitada. La Figura 3-3 muestra una piscina de captación correspondiente a la Captación Cortafuegos, desde la cual el agua se conduce mediante tuberías de PVC hacia estanques plásticos tipo fosa séptica que funcionan como almacenamiento intermedio antes de ingresar al recinto de tratamiento. Cabe destacar, que cuando la acumulación en la piscina de captación no es suficiente, los operadores instalan tuberías adicionales para captar agua en puntos más altos de la quebrada, pudiendo derivarla directamente hacia los estanques o bien hacia la piscina de captación (Municipalidad Juan Fernández, 2025).



Figura 3-3. Captación Cortafuegos situada directamente en el cauce del estero. a) Piscina de captación vista aguas arriba. b) Piscina de captación en evento de precipitaciones. Fuente: Municipalidad Juan Fernández (2025).

## 4 Metodología

Para llevar a cabo el estudio, se desarrolla una metodología estructurada en torno a los objetivos específicos definidos en el marco de la investigación. Cada uno de estos objetivos contempla una serie de procedimientos técnicos y analíticos que se presentan en el siguiente diagrama de flujo que resume la secuencia metodológica propuesta para el desarrollo de la investigación.

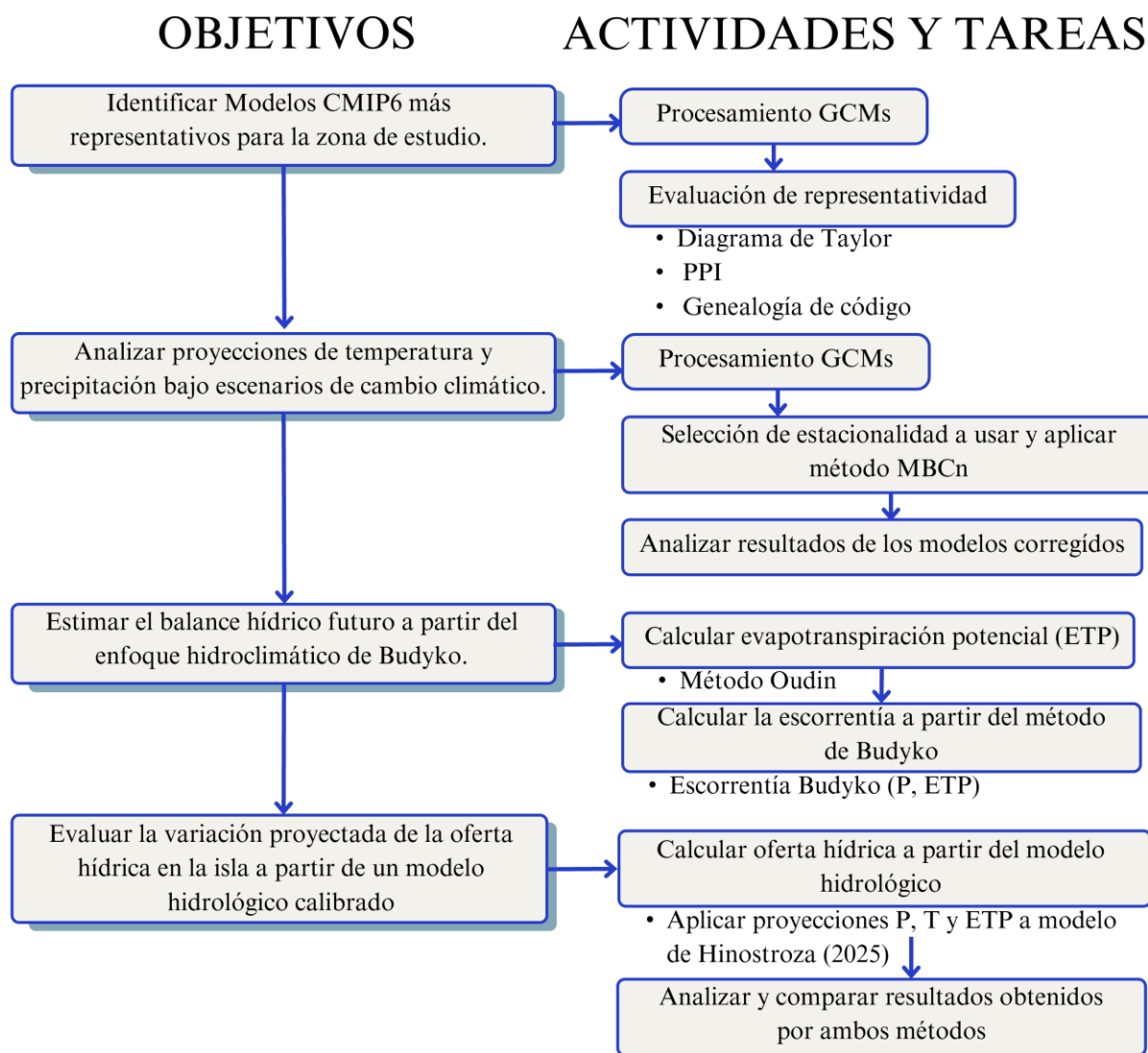


Figura 4-1. Diagrama de flujo de la metodología.

### 4.1 Evaluación de desempeño de modelos CMIP6

Para este estudio se utilizan datos diarios de precipitación y temperatura provenientes de la estación meteorológica Juan Fernández de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) y de 31 modelos del proyecto CMIP6 (IPCC, 2023; listados en la Tabla 4-1). Se analiza un periodo histórico de 30 años (1985–2014), que permite evaluar el ajuste de los modelos a las condiciones históricas. El procesamiento de los GCMs consiste en la descarga de las forzantes climáticas correspondientes al periodo de análisis desde el repositorio ESGF, seguida de un recorte espacial que abarca un área de 3° de latitud y longitud alrededor de la ubicación de la estación. Posteriormente, se aplica una interpolación ponderada por el inverso de la distancia (*Inverse Distance Weighting*, IDW) para obtener las series históricas ajustadas.

Tabla 4-1: Modelos climáticos evaluados.

ID	Modelo	Instituto (Ciudad/Región)	Resolución (lat x lon)°
1	ACCESS-CM2	CSIRO-ARCCSS (Australia)	1.3 x 1.9
2	ACCESS-ESM1-5-gn		1.2 x 1.9
3	BCC-CSM2-MR-gn	BCC (China)	1.1 x 1.1
4	CanESM5-gn	CCCMA (Canada)	2.8 x 2.8
5	CESM2-WACCM-gn	NCAR (U.S.A.)	0.9 x 1.3
6	CMCC-CM2-SR5-gn	CMCC (Italy)	0.9 x 1.3
7	CMCC-ESM2-gn		0.9 x 1.3
8	EC-Earth3-CC	EC-Earth consortium (Europe)	0.7 x 0.7
9	EC-Earth3		0.7 x 0.7
10	EC-Earth3-AerChem		0.7 x 0.7
11	EC-Earth3-Veg		0.7 x 0.7
12	EC-Earth3-Veg-LR		1.1 x 1.1
13	FGOALS-f3-L	CAS (China)	1 x 1.3
14	FGOALS-g3-gn		2 x 2
15	GFDL-CM4-gr1	NOAA-GFDL (U.S.A.)	1 x 1.3
16	GFDL-CM4-gr2		2 x 2.5
17	GFDL-ESM4-gr1		1 x 1.3
18	IITM-ESM-gn	CCCR-IITM (India)	1.9 x 1.9
19	INM-CM4-8-gr1	INM (Russia)	1.5 x 2
20	INM-CM5-0-gr1		1.5 x 3
21	IPSL-CM5A2-INCA	IPSL (France)	2 x 2
22	IPSL-CM6A-LR-gn		1.3 x 2.5
23	KIOST-ESM-gr1	KIOST (Korea)	1.9 x 1.9
24	MIROC6-gn	JAMSTEC, AORI, NIES, RCCS (Japan)	1.4 x 1.4
25	MPI-ESM1-2-HR-gn	MPI-M (Germany)	0.9 x 0.9
26	MPI-ESM1-2-LR-gn		1.9 x 1.9
27	MRI-ESM2-0-gn		1.1 x 1.1
28	NESM3-gn	NUIST (China)	1.9 x 1.9
29	NorESM2-LM-gn	NCC (Norway)	1.9 x 2.5
30	NorESM2-MM-gn		0.9 x 1.3
31	TaiESM1-gn	AS-RCEC (Taiwan)	0.9 x 1.3

Para limitar la incertidumbre en las proyecciones hidroclimáticas, se seleccionan aquellos modelos climáticos que presentan un mejor ajuste a los datos observados para las variables de interés, Esta selección se basa en la capacidad de los modelos para reproducir adecuadamente el comportamiento histórico de dichas variables, lo que permite aumentar la confiabilidad de los escenarios futuros generados.

Con el objetivo de contar con proyecciones robustas y representativas a escala local, se evalúan los GCMs interpolados a la isla y se seleccionan aquellos con mejor desempeño en el periodo histórico. Para ello se emplean dos enfoques complementarios: el diagrama de Taylor (Taylor, 2001) y el índice de desempeño pasado (PPI). Ambos métodos han sido utilizados en estudios previos que analizan el rendimiento de modelos climáticos en Chile continental (Gateño et al., 2024; Salazar et al., 2024).

#### 4.1.1 Diagrama de Taylor

El diagrama de Taylor (Taylor, 2001) es una herramienta gráfica que permite evaluar el grado de concordancia entre un conjunto de simulaciones y datos de referencia. Para ello, representa de forma

simultánea tres estadísticos clave: el coeficiente de correlación de Pearson, la raíz del error cuadrático medio (RMSE), explicada en la Ecuación (4.1) y la desviación estándar. Esta representación permite, en una sola gráfica, comparar múltiples modelos y determinar cuáles reproducen con mayor precisión las características observadas.

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (4.1)$$

Donde  $\hat{y}_i$  corresponde a los valores proyectados por los modelos,  $y_i$  son los valores observados y  $n$  es el número total de observaciones.

La Figura 4-2 presenta un ejemplo de diagrama de Taylor que ilustra su utilidad para sintetizar la habilidad relativa de distintos modelos para representar el patrón espacial de la precipitación media anual. En este caso, se muestran ocho modelos identificados con letras, cuya ubicación en el gráfico indica el grado de concordancia entre el patrón simulado y las observaciones. Las líneas de contorno verdes representan los valores del error cuadrático medio centrado (RMSE), la desviación estándar se asocia con la distancia radial desde el origen y el coeficiente de correlación corresponde a las líneas celestes que parten de este. Los modelos que reproducen con mayor precisión las observaciones se ubican próximos al punto marcado como “observado” en el eje x, lo que indica una correlación alta y un error RMS reducido. Bajo este criterio se observa que A y C son, en general, los que mejor coinciden con las observaciones, ambos con un error RMS similar. Sin embargo, el modelo A presenta una correlación ligeramente mayor y reproduce exactamente la desviación estándar observada, mientras que el modelo C muestra una variabilidad espacial menor.

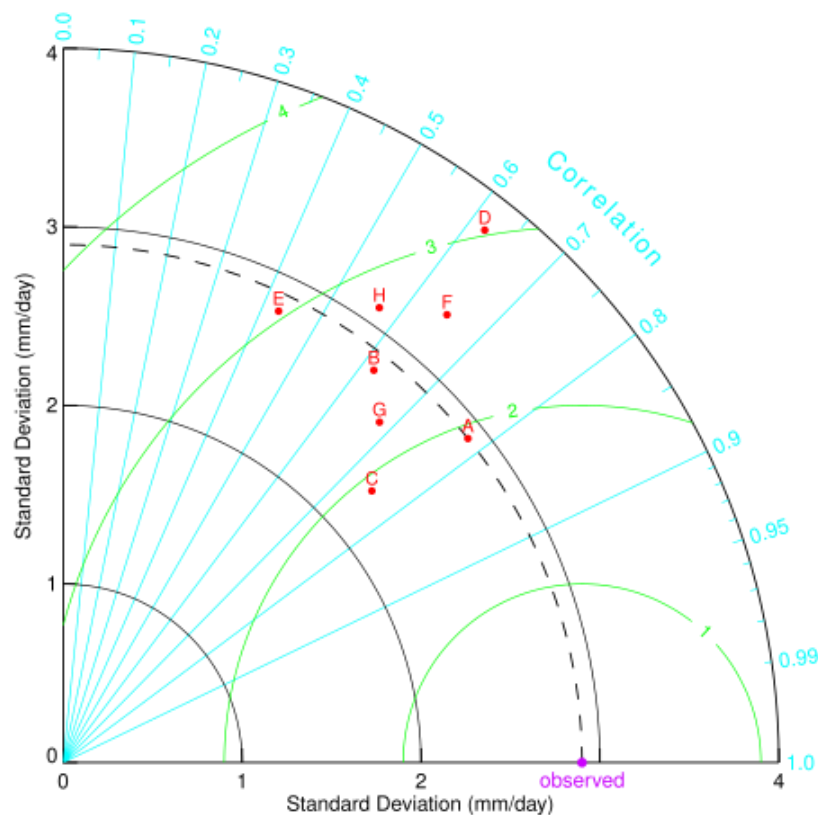


Figura 4-2. Ejemplo de diagrama de Taylor que muestra la comparación estadística de ocho estimaciones de modelos de la precipitación media anual. Fuente: Taylor (2005).

Para este método estadístico se analizan simulaciones mensuales y normalizadas de precipitación y temperatura, donde la normalización consiste en dividir cada valor de media mensual por la media anual de la variable (p. ej.,  $P_{mm}/P_{ma}$  y  $T_{mm}/T_{ma}$ ). De este modo, es posible comparar de manera consistente la distribución interanual de las simulaciones, permitiendo discriminar entre modelos con buen ajuste general y aquellos que presentan limitaciones. A partir de este enfoque, se selecciona el 65% de los modelos con mejor rendimiento.

#### 4.1.2 Índice de desempeño pasado (PPI)

El índice de desempeño pasado (PPI) propuesto por Gateño et al. (2024), resume en un único valor la capacidad de cada modelo para reproducir la climatología local. Este índice se basa en la eficiencia de Kling-Gupta y utiliza la distancia euclidiana entre las métricas de desempeño y sus valores óptimos. Para su cálculo se consideran cinco métricas ( $M_y^x$ ), definidas en las Ecuaciones (4.2) a (4.6), las cuales evalúan diferentes aspectos del desempeño climático de los modelos. Este marco es flexible y permite incorporar métricas adicionales según la aplicación (Gateño et al., 2024).

- Sesgo en los valores medios anuales simulados de precipitación.

$$M_{\mu_p}^{yr} = \frac{\mu_s^p}{\mu_o^p} \quad (4.2)$$

Donde  $\mu_s^p$  y  $\mu_o^p$  corresponden al promedio de precipitaciones anual simulado y observado, respectivamente. Y el superíndice ( $yr$ ) indica que se trata de una evaluación de la variable a escala anual.

- Sesgo en los valores medios anuales simulados de precipitación.

$$M_{\mu_T}^{yr} = 1 - \frac{\mu_o^T - \mu_s^T}{\max(T_o) - \min(T_o)} \quad (4.3)$$

Donde  $\mu_o^T$  y  $\mu_s^T$  son las temperaturas medias anuales simuladas y observadas, respectivamente, mientras que  $\max(T_o)$  y  $\min(T_o)$  corresponden a las temperaturas medias anuales observadas máxima y mínima, respectivamente.

- Capacidad para reproducir la variabilidad interanual.

$$M_{\sigma}^{yr} = \frac{\sigma_s}{\sigma_o} \quad (4.4)$$

Donde  $\sigma_s$  y  $\sigma_o$  (desviaciones estándar modelada y observada) se calculan a partir de las series temporales regionalmente promediadas de los valores anuales de precipitación y de los promedios anuales de temperatura.

- Se utiliza el coeficiente de correlación de Pearson ( $M_r^{seas}$ ) entre los valores climatológicos mensuales promedio modelados y observados (es decir, usando 12 pares de salidas de modelo y observaciones) para evaluar la capacidad de los GCM de replicar los ciclos interanuales.

- Sesgo en la amplitud del ciclo anual.

$$M_{\sigma}^{seas} = \frac{\sigma_s^{seas}}{\sigma_o^{seas}} \quad (4.5)$$

Donde  $\sigma_s^{seas}$  y  $\sigma_o^{seas}$  corresponden a las desviaciones estándar de los 12 promedios mensuales climatológicos modelados y observados.

- Perkins Skill Score.

Se usa para evaluar la capacidad de reproducir la función de densidad de probabilidad (PDF) de las series temporales en pasos de tiempo mensuales. Para ello, se utilizan series temporales

mensuales normalizadas y se comparan los histogramas de probabilidad simulados con los observados.

$$M_{PSS}^{month} = \sum_{i=1}^n \min(Z_{m_i}, Z_{o_i}) \quad (4.6)$$

Donde  $n$  es el número de intervalos utilizados para calcular la PDF de una región dada (fijado en 6),  $Z_{m_i}$  y  $Z_{o_i}$  son la frecuencia de valores modelados y observados por intervalo  $i$  respectivamente.

En términos generales, el valor de cualquier métrica  $M = 1$  corresponde a la condición óptima de la métrica, es decir, el modelo no presenta sesgo respecto a la variable observada.

Tras estimar las cinco métricas para cada modelo, se procede al cálculo del índice PPI, conforme a la formulación presentada en la Ecuación (4.7).

$$PPI_{i,j} = 1 - \sqrt{\sum_{k=1}^{N=5} S_k \cdot (1 - M_{i,j,k})^2} \quad (4.7)$$

Donde  $M_{i,j,k}$  es el valor de la métrica  $k$  obtenida por el modelo  $j$  para la variable  $i$  y  $S_k$  es un factor de ponderación. En este estudio se asigna  $S_k = 0.2$  a cada una de las cinco métricas consideradas, de modo que todas tuvieran el mismo peso relativo en el cálculo del índice de desempeño. A diferencia de Gateño, quien utiliza  $S_k = 1$  para cada métrica, esta elección permite mantener la proporcionalidad en el orden de los modelos según la distancia euclidiana (ED), pero con valores más cercanos a la unidad y evitando que sean negativos. Esta modificación mejoró la interpretación de los resultados, facilitando la comparación y evaluación del desempeño relativo entre los modelos.

El PPI varía entre  $-\infty$  y 1, donde  $PPI = 1$  indica que el GCM representa perfectamente los cinco aspectos de la climatología histórica examinados. El desempeño en conjunto de ambas variables, precipitación y temperatura se caracteriza a partir de la distancia euclidiana (ED), detallada en la Ecuación (4.8), con respecto a los respectivos valores óptimos, es decir  $PPI_{pr} = 1$  y  $PPI_{tas} = 1$ .

$$ED = \sqrt{(1 - PPI_{pr})^2 + (1 - PPI_{tas})^2} \quad (4.8)$$

Como resultado, se consideran en primera instancia, el 65% de los modelos que presentan los menores valores de ED y como segunda condición, valores de  $PPI_{pr}$  y  $PPI_{tas}$  superiores a 0.5.

Una vez contrastados ambos enfoques estadísticos, se seleccionan los modelos que cumplen ambos criterios y, de ese grupo, se aplica una selección por genealogía de código, priorizando en cada familia el modelo con mejor desempeño para reducir redundancias y asegurar mayor diversidad (Gateño et al., 2024). Para mayor claridad, en la Figura 4-3 se presenta un esquema que ilustra el desarrollo de este procedimiento.

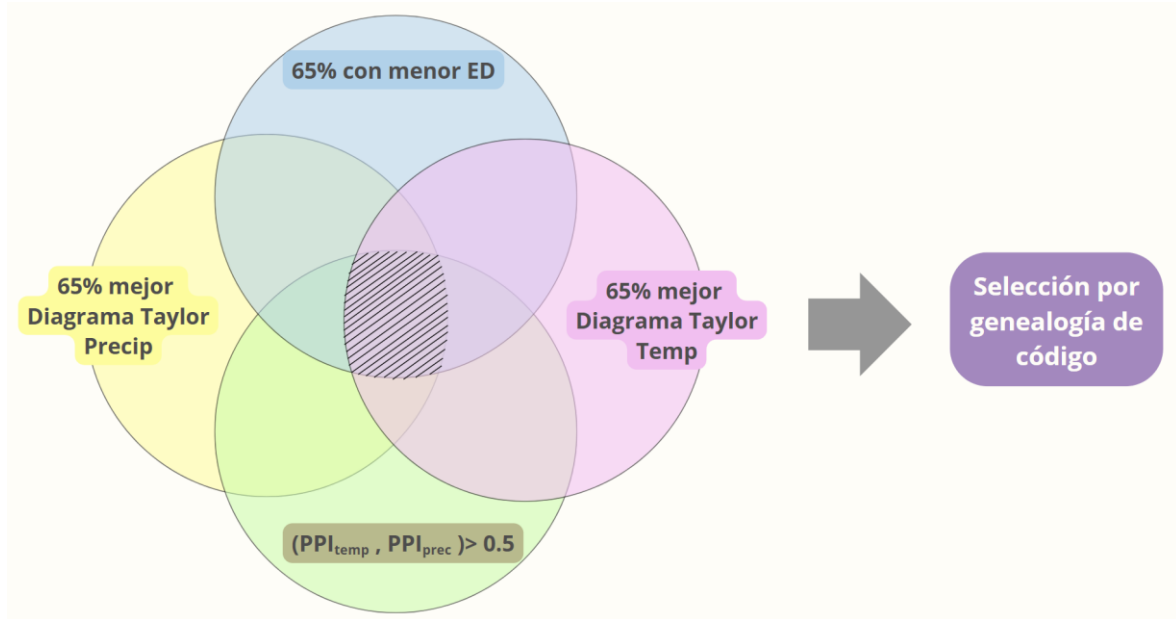


Figura 4-3. Esquema de criterios de selección de GCMs.

#### 4.2 Análisis de proyecciones bajo escenarios de cambio climático

Con los modelos seleccionados se utiliza el método estadístico MBCn (Cannon, 2018) para adaptar las simulaciones climáticas a las condiciones climáticas locales de la isla. Para este proceso se adopta una estratificación temporal estacional (otoño, invierno, primavera y verano), puesto que se ha mostrado que esta decisión influye directamente en las proyecciones climáticas, asegurando así la correcta representación estacional de las condiciones históricas (Vásquez et al., 2024).

#### 4.3 Balance hídrico a partir de Budyko

Con las proyecciones climáticas de precipitación y temperatura ya corregidas por sesgo se aplica el enfoque hidroclimático de Budyko (Budyko, 1974) para analizar la respuesta del sistema hídrico de la isla frente al cambio climático. Este enfoque permite representar de manera simple la distribución de la precipitación, la evapotranspiración y la escorrentía (Wang et al., 2016). La Ecuación (4.9), basada en el marco conceptual de Budyko propuesto por Ol'dekop (1911), permite estimar la relación entre la evapotranspiración real y el índice de aridez. Esta considera que la cantidad de agua evaporada depende directamente de la disponibilidad hídrica en la cuenca, representada por la precipitación, en relación con la energía disponible para evaporar, representada por la evapotranspiración potencial (Mianabadi et al., 2020).

$$\frac{E}{P} = \left\{ \frac{E_p}{P} \cdot \left[ 1 - \exp\left(-\frac{E_p}{P}\right) \right] \cdot \tanh\left[\left(\frac{E_p}{P}\right)^{-1}\right] \right\}^{0.5} \quad (4.9)$$

Donde  $E$  corresponde a la evapotranspiración real en [mm],  $P$  a la precipitación en [mm] y  $E_p$  a la evapotranspiración potencial en [mm], estimada mediante la fórmula propuesta por Oudin et al. (2005), presentada en la Ecuación (4.10).

$$ETP = \frac{R_e}{\lambda \rho} \cdot \frac{T + K_2}{K_1} \quad (4.10)$$

Donde  $ETP$  es la tasa de evapotranspiración potencial [mm/día],  $R_e$  es la radiación extraterrestre [MJ/m/día], que depende solo de la latitud y el día juliano,  $\lambda$  es el flujo de calor latente [MJ/kg],  $\rho$  es la densidad del agua [kg/m<sup>3</sup>] y  $T$  es la temperatura media diaria del aire [°C], por lo tanto, es una función que solo depende del día juliano y la ubicación de la cuenca.  $K_1$  y  $K_2$  son parámetros de ajuste, donde  $K_1 = 100$  y  $K_2 = 5$ .

Para estimar el balance hídrico anual, se utiliza la Ecuación (4.11), que representa una forma simplificada de la ecuación de escorrentía anual promedio ( $Q$ ), como la diferencia entre la precipitación anual promedio ( $P$ ) y la evapotranspiración real ( $ET_{real}$ ) obtenida mediante la Ecuación (4.10), todo en unidades de [mm]. Este cálculo se realiza para los periodos 1985-2014, 2015-2039, 2040-2069, 2070-2100:

$$Q \approx P - ET_{real} \quad (4.11)$$

Asimismo, con el fin de complementar la información y disponer de un panorama más claro respecto al estado hídrico actual de la isla y los desafíos que enfrentará bajo escenarios de cambio climático, se genera un diagrama de Budyko (Figura 4-4). Este diagrama describe la relación entre la evapotranspiración potencial ( $PET$ ) de una cuenca y su evapotranspiración real ( $AET$ ), ambas normalizadas por la precipitación ( $P$ ). En este marco, la curva representa el cociente  $AET/P$ , denominado índice de evaporación ( $EI$ ), en función de  $PET/P$ , conocido como índice de aridez ( $DI$ ). Budyko establece que las cuencas pueden presentar dos estados: uno donde la evapotranspiración está limitada por la energía disponible y otro donde está limitada por la disponibilidad de agua. El clima, a través de la radiación neta, el déficit de presión de vapor y la oferta de agua interceptada por la vegetación o almacenada en el suelo, determina el nivel de restricción. Así, un valor de  $DI < 1$  corresponde a una cuenca húmeda y limitada por energía, mientras que un valor de  $DI > 1$  caracteriza a una cuenca seca y limitada por agua (Creed et al., 2014).

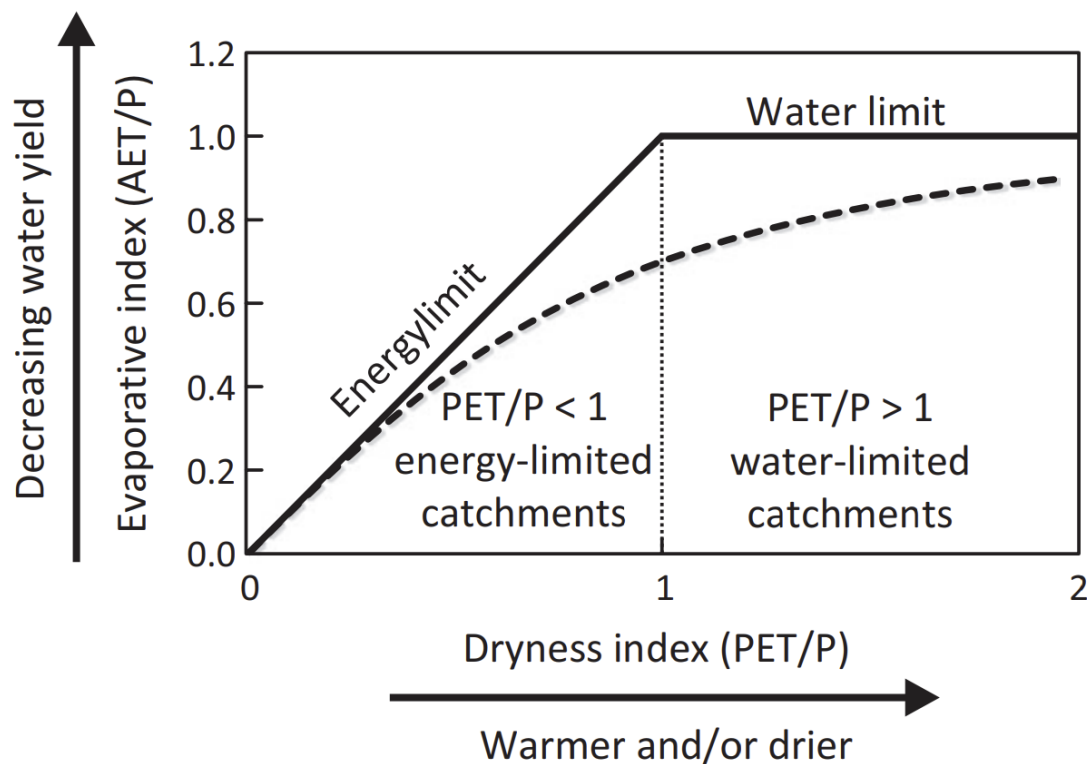


Figura 4-4. Diagrama de Budyko (índice de evaporación vs. índice de aridez). Las líneas continuas representan los límites de energía y agua para el índice de evaporación, y la línea discontinua representa la curva teórica original de Budyko (Budyko, 1974).

#### **4.4 Oferta hídrica a partir de modelo hidrológico**

Para evaluar la variación del recurso hídrico en la isla Robinson Crusoe, se utilizó el modelo hidrológico desarrollado por Hinojosa (2025) para la misma isla. Dicho modelo permite simular caudales diarios ( $m^3/s$ ) en los principales puntos de captación a partir de las proyecciones de precipitación y temperatura obtenidas de los modelos climáticos globales (GCMs) y evapotranspiración potencial, obtenida a partir de método de Oudin et al. (2005), bajo ambos escenarios de emisiones considerados.

Con el fin de comparar los resultados con los obtenidos mediante el método de Budyko, se calcula el caudal promedio de la isla a partir del promedio de los caudales simulados en las distintas captaciones. Posteriormente, los caudales diarios se convirtieron a unidades de esorrentía anual (mm/año), utilizando las áreas de las captaciones definidas en el Capítulo 2 (Tabla 2-2), con el propósito de mantener la consistencia de unidades con los valores estimados mediante Budyko.

Asimismo, se analizaron los cambios porcentuales en los caudales asociados a distintas probabilidades de excedencia (Q50 y Q85) y se evalúa la variabilidad de la esorrentía promedio mensual, con el fin de examinar cómo podría modificarse la distribución interanual bajo distintos escenarios climáticos.

## 5 Resultados y Análisis

En esta sección se presentan, en primer lugar, la proyección histórica de los modelos climáticos CMIP6 y la selección de aquellos más representativos para la isla Robinson Crusoe, en base a su desempeño histórico frente a observaciones locales. A continuación, se muestran las proyecciones futuras de precipitación y temperatura diaria obtenidas a partir de los modelos seleccionados, considerando los escenarios climáticos SSP2-4.5 y SSP5-8.5. Luego, se presentan los resultados de la corrección de sesgo mediante el método MBCn, que permitió ajustar las proyecciones a las condiciones locales.

Posterior a esto, se exponen los resultados obtenidos a partir de la aplicación de la ecuación hidroclimática de Budyko, como una primera aproximación a la estimación de la disponibilidad hídrica superficial en la isla. Finalmente, se presentan los resultados generados por un modelo hidrológico entrenado a partir de una cuenca costera similar a la de la isla, el cual permite una estimación más detallada de los impactos proyectados en el recurso hídrico bajo distintos escenarios climáticos.

### 5.1 Periodo histórico forzantes meteorológicas

En esta sección se analizan las series históricas de precipitación media anual y temperatura media anual para la isla Robinson Crusoe durante el período 1985–2014, comparando los valores observados con los simulados por distintos modelos climáticos globales.

La Figura 5-1 presenta las proyecciones históricas de precipitación media anual de los 31 modelos climáticos, detallados en la Tabla 4-1, junto con los valores registrados en la estación Juan Fernández (observaciones). Se aprecia una marcada dispersión entre los modelos, con una tendencia general a subestimar los valores observados. La serie observada (línea negra) muestra una mayor variabilidad interanual, alcanzando máximos cercanos a 1400 mm, mientras que la mayoría de los modelos simulan precipitaciones en un rango de 200 a 800 mm anuales. Este resultado evidencia la limitada capacidad de los GCM para representar los extremos de precipitación en esta zona insular.

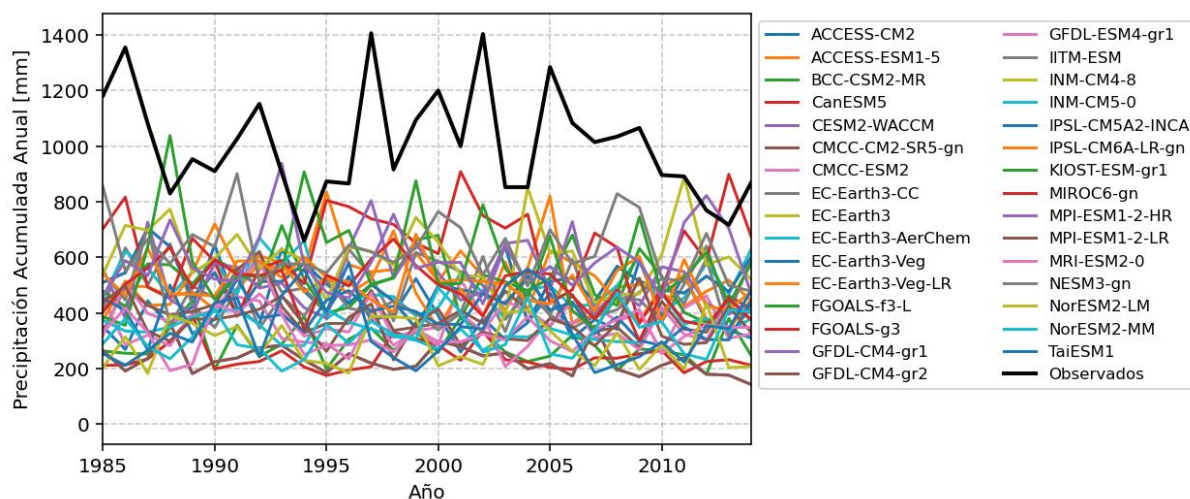


Figura 5-1. Comparación de la precipitación acumulada anual observada y simulada por los modelos climáticos globales (1985–2014). La línea negra gruesa representa los valores registrados en la estación Juan Fernández (observados), mientras que cada modelo es representado por un color.

En cuanto a la temperatura media anual (Figura 5-2), se observa una mayor dispersión en las simulaciones de los modelos climáticos en comparación con los datos observados. Algunos modelos tienden a sobreestimar significativamente la temperatura, mientras que otros presentan una subestimación más moderada. No obstante, existen varios modelos cuya representación se aproxima de mejor manera a la serie observada, la cual muestra un valor promedio cercano a 15 °C para el periodo histórico analizado.

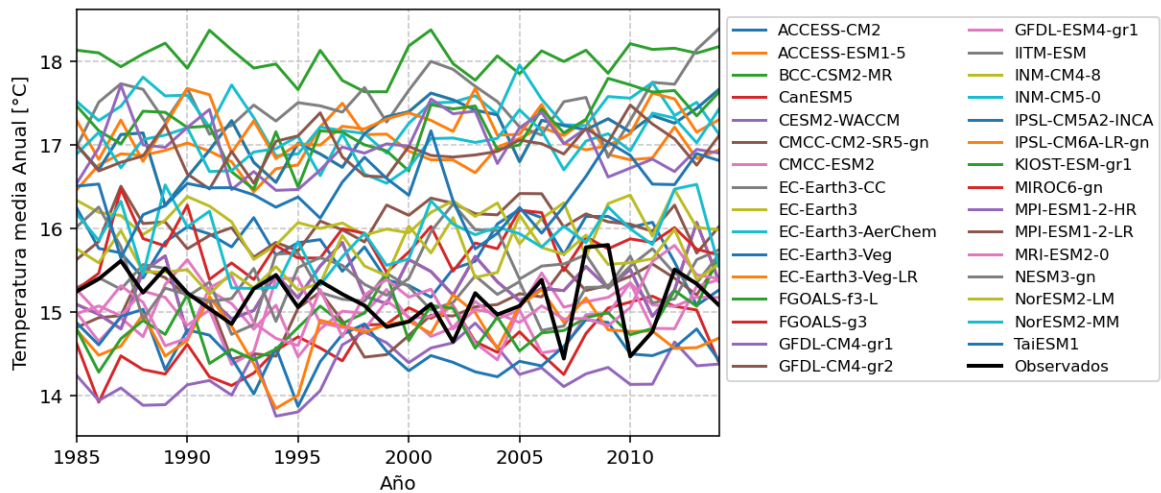


Figura 5-2: Comparación de la temperatura media anual observada y simulada por los modelos climáticos globales (1985–2014).

Para profundizar en el análisis estacional, la Figura 5-3 muestra la precipitación promedio mensual y la Figura 5-4 presenta la precipitación mensual normalizada, lo que permite evaluar la capacidad de los modelos para representar tanto la magnitud como la estacionalidad relativa de la precipitación observada. A primera vista se aprecia que los modelos reproducen adecuadamente el patrón estacional, con figuras similares que muestran un máximo invernal concentrado entre mayo y agosto y valores bajos en los meses de verano. Sin embargo, existe una subestimación sistemática de la magnitud, especialmente durante los meses más lluviosos. En junio y julio, por ejemplo, la diferencia puede alcanzar hasta 135 mm entre los datos observados y el modelo con menor precipitación.

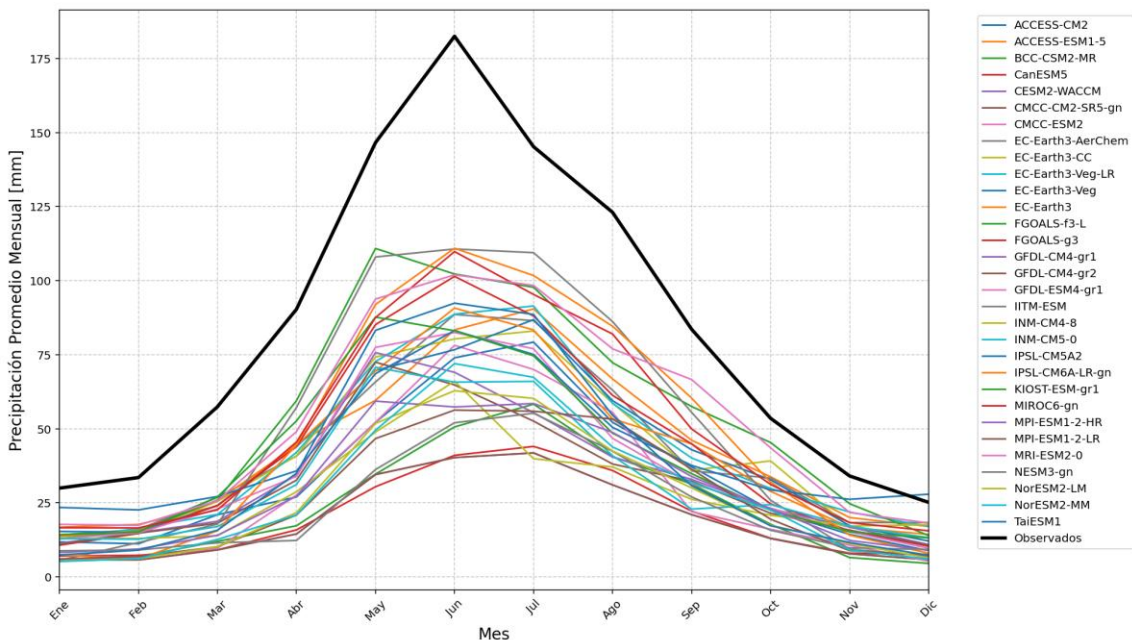


Figura 5-3: Comparación de la precipitación promedio mensual observada y simulada por los modelos climáticos globales.

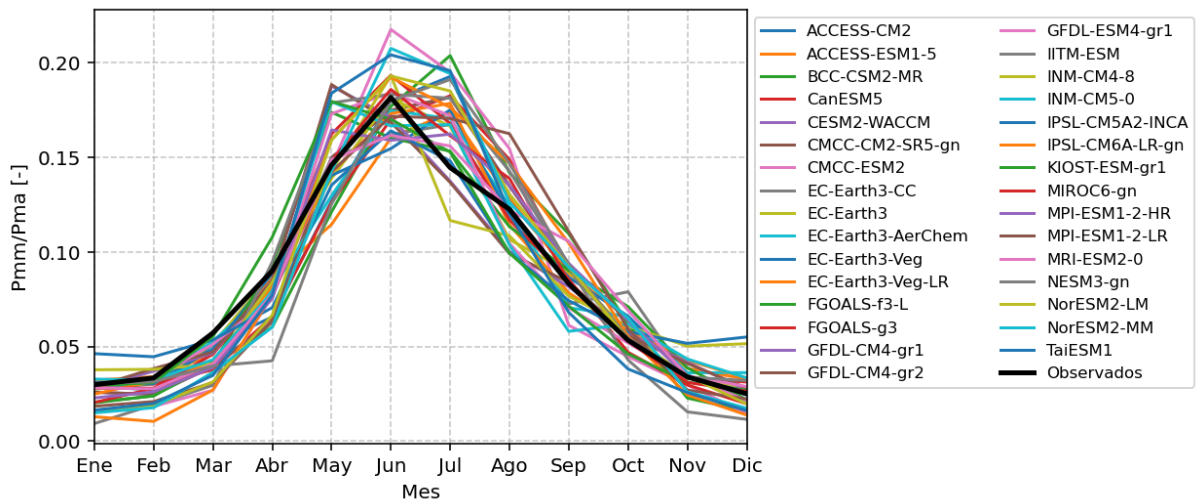


Figura 5-4: Comparación de la precipitación normalizada entre datos observados y simulaciones de modelos climáticos globales.

De forma análoga, la Figura 5-5 y la Figura 5-6 muestran la temperatura media mensual y su versión normalizada, donde se aprecia que la mayoría de los modelos representa adecuadamente la estacionalidad térmica, con un mínimo invernal entre julio y agosto y un máximo en enero y febrero. Aunque se observa una leve sobreestimación generalizada respecto a los valores observados, la coherencia entre los modelos es mayor que en la representación de la precipitación. Cabe destacar que, más adelante, estas observaciones se evidenciarán y detallarán mejor mediante distintas métricas estadísticas para evaluar la representatividad de los modelos.

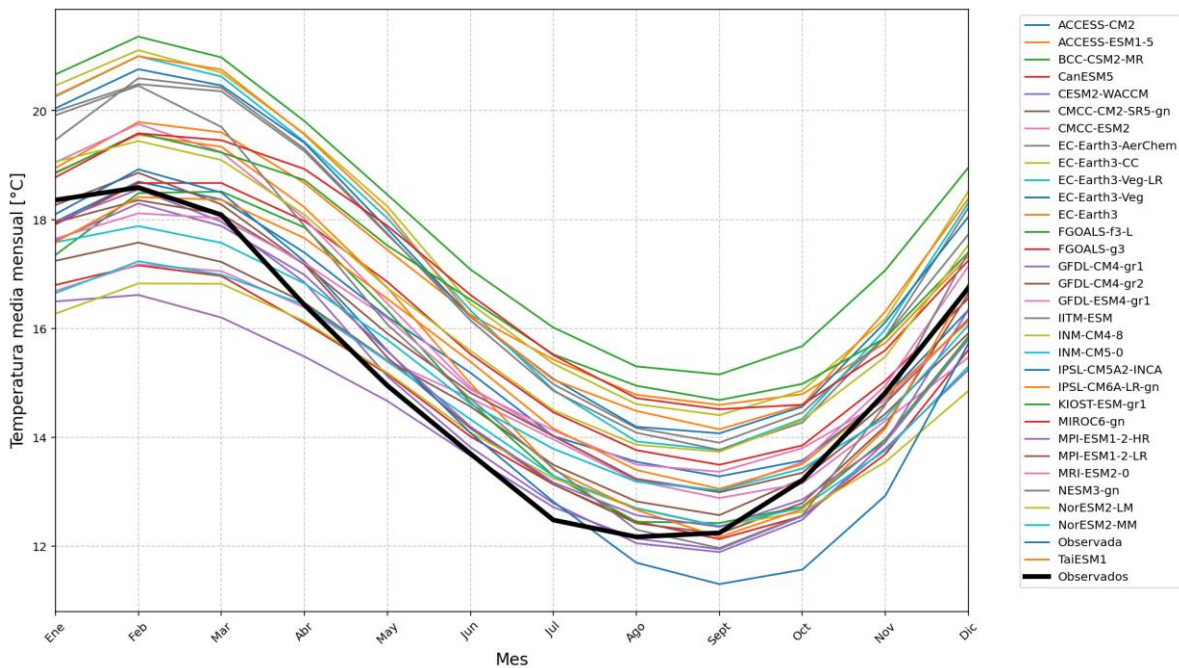


Figura 5-5: Comparación de la temperatura media mensual observada y simulada por los modelos climáticos globales

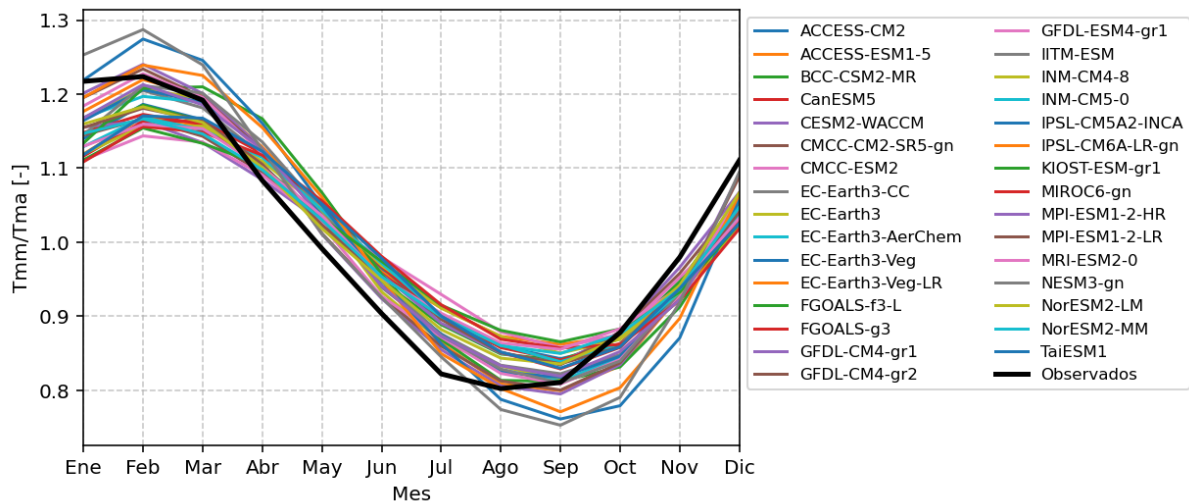
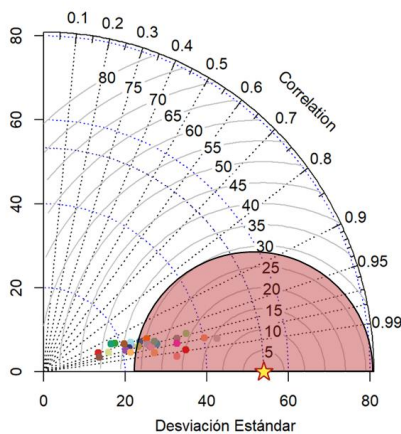


Figura 5-6: Comparación de la temperatura media normalizada entre datos observados y simulaciones de modelos climáticos globales.

## 5.2 Evaluación de GCMs

La Figura 5-7 presenta los diagramas de Taylor para datos mensuales de precipitación y temperatura, donde se observa que los modelos más cercanos al punto de observación son los que mejor representan las condiciones climáticas de la isla. En el caso de la precipitación, los modelos reproducen adecuadamente la correlación mensual, aunque tienden a subestimar la desviación estándar. Para la temperatura, en cambio, muestran una correlación alta (superior a 0.9) y una distribución estándar más homogénea, lo que indica que capturan con mayor precisión esta variable en comparación con la precipitación, cuya variabilidad es subestimada.

a) Diagrama de Taylor: Precipitación Promedio Mensual



b) Diagrama de Taylor: Temperatura Promedio Mensual

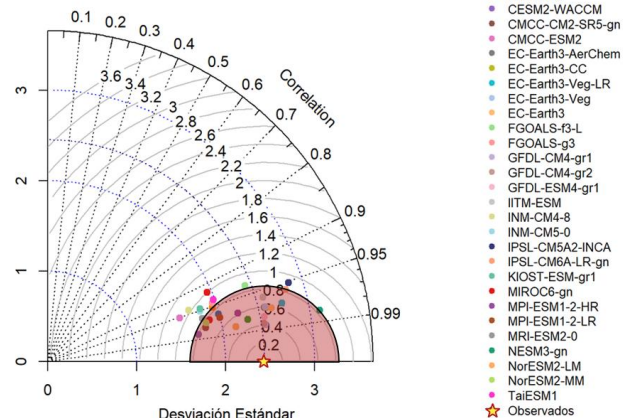


Figura 5-7. (a) Diagrama de Taylor para precipitación mensual promedio simulada por los GCMs. (b) Diagramas de Taylor para temperatura promedio mensual simulada por los GCMs.

Para el caso de la Figura 5-8 se presentan los diagramas de Taylor para los datos normalizados de precipitación y temperatura, los cuales permiten evaluar la capacidad de los modelos para representar la variabilidad interanual de las variables. En ambos casos se evidencia un mejor desempeño de los modelos al trabajar con datos normalizados en comparación con los valores mensuales, lo que se refleja en desviaciones más próximas a las observadas y en menores distancias promedio respecto al punto de

referencia de las observaciones. Esto indica que, si bien los modelos tienden a subestimar los valores absolutos de precipitación, logran representar de manera adecuada la variabilidad interanual de esta variable. En ambas figuras se resaltan los modelos seleccionados por presentar el mejor desempeño bajo este criterio de evaluación.

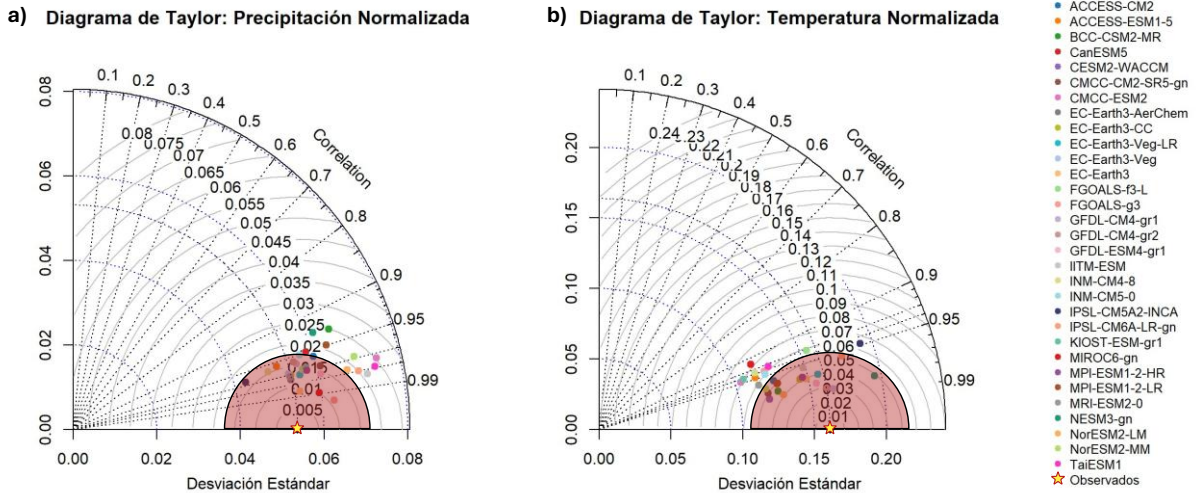


Figura 5-8. (a) Diagrama de Taylor para precipitación promedio normalizada simulada por los GCMs. (b) Diagramas de Taylor para temperatura promedio normalizada simulada por los GCMs.

Para el segundo enfoque, la Figura 5-9 muestra un diagrama que resume los valores del índice de desempeño pasado para precipitación y temperatura, donde el valor ideal ( $PPI_{tas} = PPI_{pr} = 1$ ) se ubica en la esquina superior izquierda y representa el mejor ajuste simultáneo para ambas variables. Al considerar las cinco métricas previamente descritas, se observa que la mayoría de los modelos presenta un buen desempeño en ambas variables, con valores del índice ligeramente superiores para temperatura que para precipitación.

Cabe señalar que en los Anexos A. 1, Anexos A. 2 y Anexos A. 3 se detallan los valores de  $PPI_{tas}$  y  $PPI_{pr}$  para cada modelo, junto con las métricas empleadas en su cálculo. Asimismo, con fines comparativos, en los Anexos A. 4 se presenta el diagrama del PPI calculado con  $S_k = 1$ .

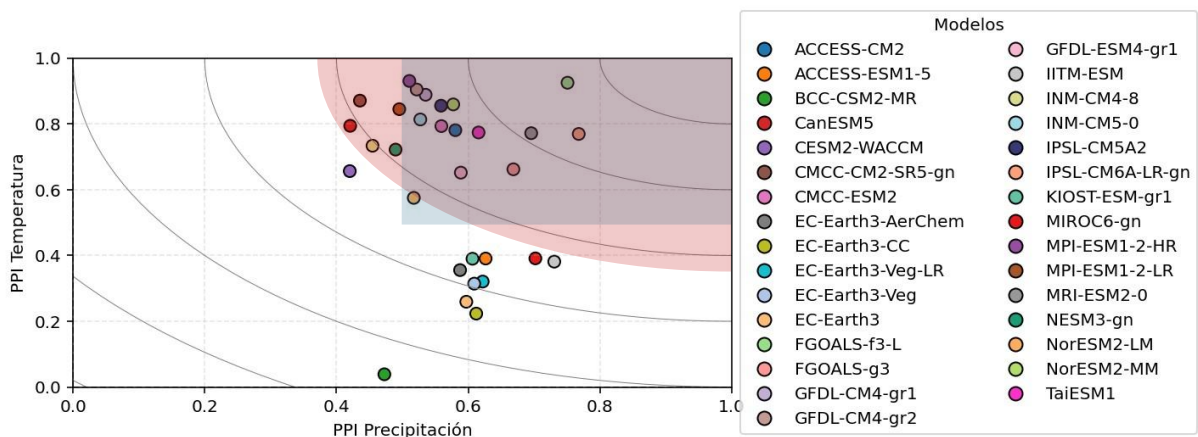


Figura 5-9. Índice de desempeño pasado para precipitación (eje x) y temperatura (eje y) donde cada punto representa un GCM.

Como resultado del proceso de selección, que consideró tanto la evaluación estadística como el criterio de genealogía de código, se obtuvo un conjunto de siete modelos, los cuales se presentan en la Tabla 5-1, la Tabla 5-2 y la Tabla 5-3. En ellas se detallan los valores de  $PPI_{tas}$  y  $PPI_{pr}$ , junto con las métricas empleadas en su cálculo y el valor de la distancia euclidiana (ED). Estos modelos representan de manera más precisa las condiciones climáticas en la isla Robinson Crusoe.

Tabla 5-1: Métricas de desempeño (M) y valores de  $PPI_{pr}$  para los modelos CMIP6 seleccionados por su mayor capacidad para representar las condiciones climáticas en la isla Robinson Crusoe.

Modelo	M_yr_μ	M_yr_σ	M_seas_σ	M_seas_r	M_month_PSS	PPI_pr
ACCESS-CM2	0.409	0.519	0.457	0.958	0.944	0.581
FGOALS-g3	0.522	0.591	0.610	0.994	0.967	0.669
GFDL-CM4-gr1	0.401	0.386	0.416	0.960	0.967	0.535
IPSL-CM6A-LR-gn	0.574	0.856	0.745	0.980	0.956	0.768
MPI-ESM1-2-HR	0.359	0.363	0.386	0.970	0.953	0.511
MRI-ESM2-0	0.628	0.574	0.623	0.972	0.975	0.696
NorESM2-MM	0.345	0.616	0.446	0.968	0.906	0.577

Tabla 5-2: Métricas de desempeño (M) y valores de  $PPI_{tas}$  para los modelos CMIP6 seleccionados por su mayor capacidad para representar las condiciones climáticas en la isla Robinson Crusoe.

Modelo	M_yr_μ	M_yr_σ	M_seas_σ	M_seas_r	M_month_PSS	PPI_tas
ACCESS-CM2	1.442	0.965	0.817	0.965	0.908	0.781
FGOALS-g3	1.653	0.696	0.804	0.944	0.9	0.662
GFDL-CM4-gr1	0.852	0.806	1.017	0.987	0.956	0.889
IPSL-CM6A-LR-gn	1.458	0.836	1.145	0.958	0.922	0.770
MPI-ESM1-2-HR	0.945	0.900	0.904	0.970	0.969	0.931
MRI-ESM2-0	1.343	0.762	0.740	0.965	0.872	0.772
NorESM2-MM	1.124	1.115	0.752	0.973	0.911	0.859

Tabla 5-3: Valores de la distancia euclidiana (ED) para los modelos seleccionados por su mayor capacidad para representar las condiciones climáticas en la isla Robinson Crusoe.

Modelo	ED
MPI-ESM1-2-HR	0.494
GFDL-CM4-gr1	0.478
FGOALS-g3	0.473
ACCESS-CM2	0.473
NorESM2-MM	0.445
MRI-ESM2-0	0.380
IPSL-CM6A-LR-gn	0.327

### 5.3 Corrección de Sesgo método MBCn

La Figura 5-10 presenta los gráficos de las series de precipitación y temperatura históricas y proyecciones corregidas para los escenarios SSP2-4.5 Y SSP5-8.5. En ellas se aprecia que, hasta cerca de 2060, la precipitación y la temperatura media anual presentan comportamientos similares en ambos escenarios. A partir de esa fecha, las trayectorias se separan por escenario, alcanzando diferencias de alrededor de 350 mm en precipitación acumulada anual y 1 °C en temperatura hacia finales de siglo. En cuanto a la amplitud entre modelos, se observa un rango de hasta 1.000 mm en precipitación y cerca de 2 °C en temperatura, lo que evidencia la considerable incertidumbre asociada a este tipo de proyecciones, especialmente en el caso de la precipitación.

Para fines de siglo (2070–2100), bajo el escenario más desfavorable SSP5-8.5, la precipitación anual media disminuye en promedio 270 mm (-26.8%), mientras que la temperatura media aumenta en 2 °C. En el escenario de emisiones intermedias SSP2-4.5, la precipitación se reduce en promedio 120 mm (-12.2%) y la temperatura incrementa en 1 °C.

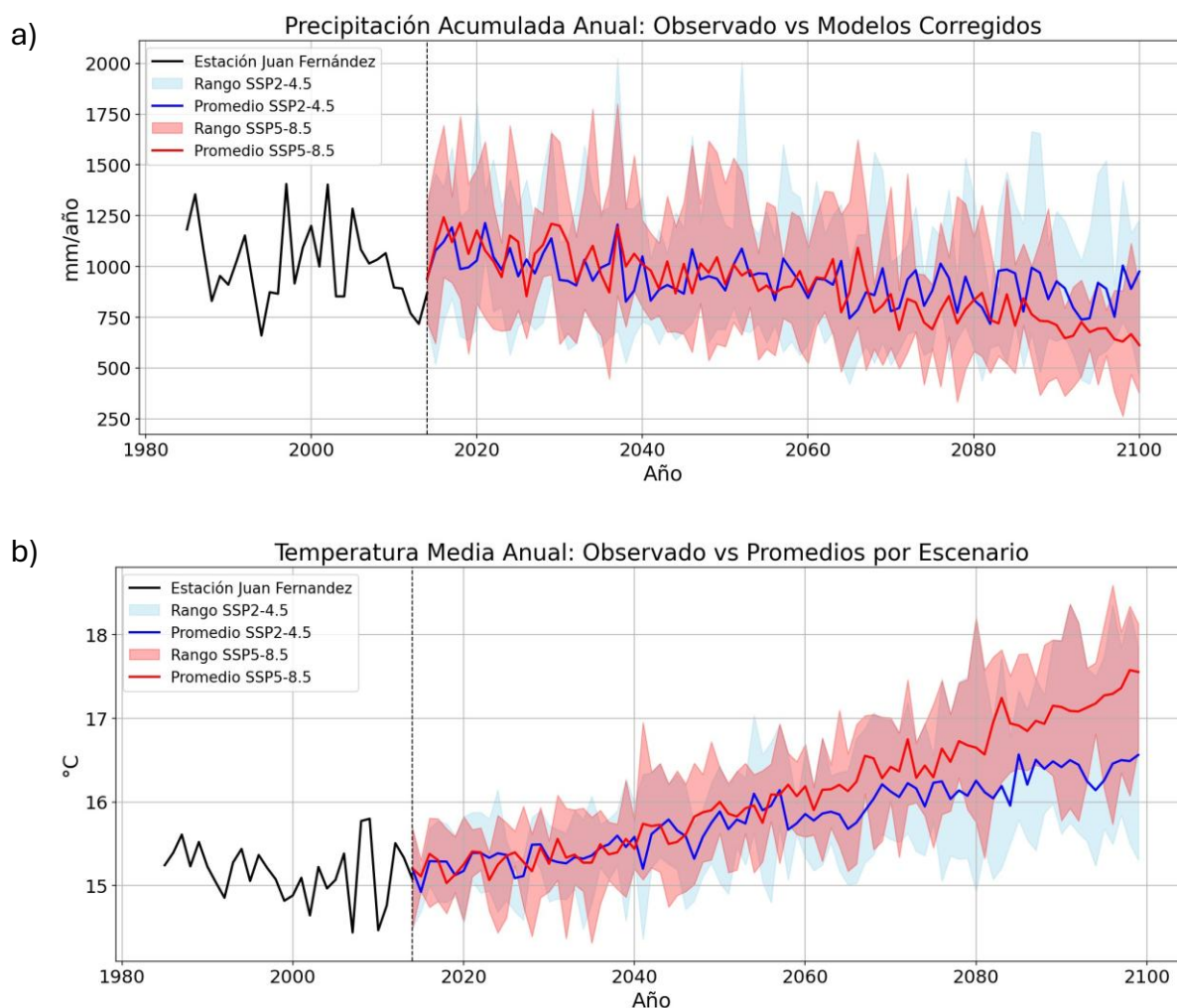


Figura 5-10. Series históricas y proyecciones corregidas de (a) precipitación media anual y (b) temperatura media anual, donde las áreas sombreadas representan el rango de valores proyectados por los modelos para los escenarios SSP2-4.5 (celeste) y SSP5-8.5 (rojo). La línea negra corresponde a los datos observados de la estación Juan Fernández, mientras que las líneas azul y roja indican el promedio de los modelos para cada escenario.

## 5.4 Balance Hídrico por método de Budyko

La Figura 5-11 presenta el diagrama de Budyko para la estación Juan Fernández junto con otras cuencas continentales. En primer lugar, se observa que la aplicación de la corrección MBCn permite que todos los modelos se ubiquen en un mismo índice de aridez que el calculado a partir de los datos históricos de la estación meteorológica. Asimismo, se evidencia que, históricamente, la isla presenta un índice de aridez menor, aunque cercano a 1, lo que indica condiciones de clima húmedo. Sin embargo, al analizar las proyecciones climáticas hacia finales de siglo, se advierte que este índice supera el valor de 1, lo que implica una transición hacia condiciones más áridas.

Además, a modo de comparación, en el diagrama se incorporan tres cuencas evaluadas en el período histórico 1985–2014, que son parte de las consideradas por Hinostroza (2025) para identificar aquellas con características climáticas y fisiográficas semejantes a las de Juan Fernández. En el diagrama se observa que las cuencas del centro-sur del país, Estero Bellavista (Región del Biobío) y Río Cauquenes (Región del Maule), presentan índices de aridez similares a los de la isla. De ellas, la cuenca del Río Cauquenes fue la seleccionada para el modelo hidrológico, y según el diagrama de Budyko, muestra prácticamente el mismo índice de aridez que Juan Fernández. En contraste, la cuenca Estero Quintero, que pese a encontrarse en la misma región, exhibe un índice de aridez mucho mayor.

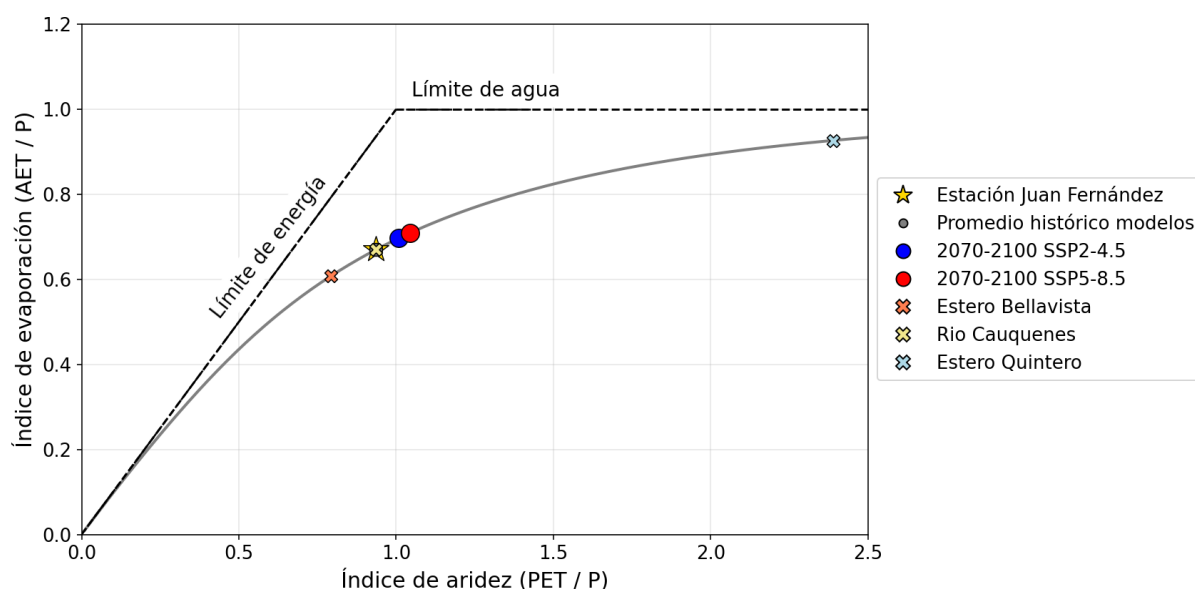


Figura 5-11. Diagrama de Budyko para la isla Robinson Crusoe, mostrando el promedio histórico y las proyecciones futuras de los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5, junto con las cuencas de referencia continentales.

A partir de las proyecciones corregidas mediante el método MBCn, se estima la escorrentía promedio anual aplicando el enfoque de Budyko. La Figura 5-12 muestra las variaciones relativas proyectadas de la precipitación ( $\Delta P$ ), la evapotranspiración ( $\Delta ET$ ) y la escorrentía media anual ( $\Delta Q$ ) para finales del siglo XXI, bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5. En ambos casos se observa una disminución generalizada de las tres variables, aunque con distinta magnitud entre modelos. En el escenario SSP2-4.5, la reducción de la escorrentía varía aproximadamente entre -20 % y -40 %, mientras que en SSP5-8.5 las disminuciones son más pronunciadas, alcanzando valores entre -45 % y -65 %.

A pesar del incremento proyectado de la temperatura por los modelos, se observa que la evapotranspiración real también disminuye, ya que la menor disponibilidad hídrica limita la cantidad de agua que puede evaporarse o transpirarse. Este comportamiento refleja un régimen controlado por la restricción de agua, donde la reducción de la precipitación se traduce en una disminución conjunta tanto de la escorrentía como de la evapotranspiración, evidenciando una intensificación de las condiciones de aridez en la isla hacia finales de siglo.

Por otro lado, la precipitación presenta una alta dispersión entre modelos. Por ejemplo, el modelo IPSL-CM6A-LR proyecta una disminución mínima o incluso nula de la precipitación hacia finales de siglo en el escenario SSP2-4.5, acompañada de un leve aumento de la evapotranspiración. Este comportamiento contrasta con los demás modelos, que indican descensos simultáneos de P, ET y Q, reflejando distintas sensibilidades de los modelos ante los forzamientos climáticos.

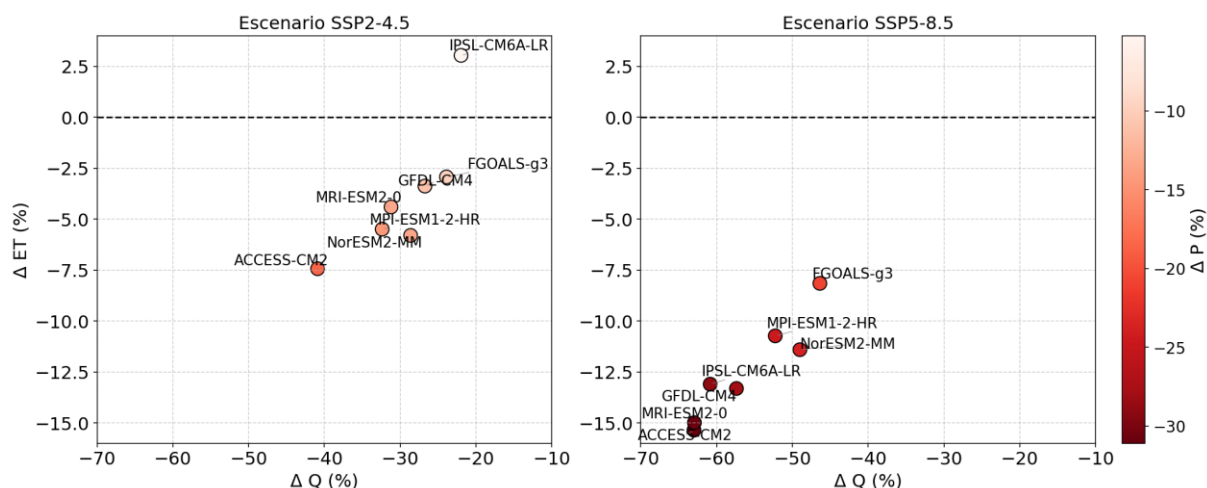


Figura 5-12. Variación relativa (%) de Q, P y ET bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 para 2071–2100 respecto a 1985–2014, estimada mediante el método de Budyko en la estación Juan Fernández.

En la Tabla 5-4 se presentan los valores de variación porcentual de la escorrentía media anual ( $\% \Delta Q$ ) y de la precipitación anual promedio ( $\% \Delta P$ ), junto con el cambio absoluto de la temperatura media anual ( $\Delta T$ , en  $^{\circ}C$ ), junto con las desviaciones estándar que presentan los valores de los modelos para cada escenario y periodo temporal. Los resultados muestran una tendencia clara hacia una reducción progresiva de la escorrentía y la precipitación a lo largo del siglo XXI, más acentuada bajo el escenario SSP5-8.5. Mientras que en el corto plazo (2015–2039) aún se observan leves aumentos o estabilidad, a partir de mediados de siglo la mayoría de los modelos proyectan descensos significativos, alcanzando reducciones promedio de hasta un 56 % en la escorrentía y cerca de un 27 % en la precipitación hacia finales del siglo.

En cuanto a los valores de desviación estándar, estos reflejan la incertidumbre inherente de las proyecciones climáticas. En el caso de la precipitación y la escorrentía, dicha incertidumbre tiende a disminuir con el tiempo, lo que indica una mayor convergencia entre los modelos hacia finales del siglo. En el escenario más desfavorable (SSP5-8.5), la desviación estándar de la escorrentía pasa de un 14 % en el corto plazo a aproximadamente un 6,8 % a finales de siglo, mientras que en la precipitación disminuye de alrededor de un 6 % a un 4 %. Esto sugiere que, si bien los modelos presentan cierta dispersión en las proyecciones iniciales, tienden a coincidir con mayor consistencia en las tendencias de reducción hacia los periodos futuros. En contraste, la temperatura muestra un comportamiento opuesto, con un aumento de la dispersión en el tiempo, reflejando una mayor variabilidad en las proyecciones del calentamiento hacia finales del siglo XXI.

Tabla 5-4: Variación porcentual de la escorrentía media anual (% $\Delta Q$ ) y de la precipitación anual promedio (% $\Delta P$ ), y cambio absoluto de la temperatura media anual ( $\Delta T$ , en  $^{\circ}C$ ), junto con sus respectivas desviaciones estándar ( $\sigma$ ), proyectados por los GCMs seleccionados para distintos periodos bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5.

Periodo	Escenario SSP2-4.5						Escenario SSP5-8.5					
	% $\Delta Q$	$\sigma$ (% $\Delta Q$ )	% $\Delta P$	$\sigma$ (% $\Delta P$ )	$\Delta T$ [ $^{\circ}C$ ]	$\sigma T$ [ $^{\circ}C$ ]	% $\Delta Q$	$\sigma$ (% $\Delta Q$ )	% $\Delta P$	$\sigma$ (% $\Delta P$ )	$\Delta T$ [ $^{\circ}C$ ]	$\sigma T$ [ $^{\circ}C$ ]
2015-2039	2.9	9.8	1.8	4.6	0.2	0.1	14.1	14.0	6.9	6.3	0.2	0.1
2040-2069	-20.1	9.0	-8.4	4.3	0.6	0.2	-19.5	10.1	-7.7	5.1	0.8	0.3
2070-2100	-29.4	6.3	-12.2	4.1	1.1	0.6	-56.0	6.8	-26.8	3.9	1.8	0.4

## 5.5 Variación de la oferta hídrica a partir de modelación hidrológica

Aplicados los parámetros derivados de los modelos y ponderando la precipitación según la captación evaluada, se obtuvieron los promedios de variación porcentual de la escorrentía media anual para cada punto de captación, los cuales se presentan en la Tabla 5.5. Los porcentajes de cambio resultan similares entre sí, al igual que sus respectivas desviaciones, lo que indica una respuesta hidrológica coherente entre las captaciones. Dado que la temperatura y la evapotranspiración potencial (ETP) son iguales en todas las captaciones, las diferencias entre ellas provienen exclusivamente de la ponderación aplicada a la precipitación. En el modelo hidrológico, un mayor factor de ponderación sitúa a la captación en un estado más húmedo (mayor almacenamiento efectivo) y, por lo tanto, el caudal se vuelve menos sensible, en términos relativos, ante el mismo cambio climático. De ahí que el porcentaje de reducción de escorrentía sea inversamente proporcional a dicha ponderación.

Al analizar el promedio de las captaciones, se observa un comportamiento coherente con el estimado mediante el enfoque de Budyko, evidenciándose un leve aumento de la escorrentía en el futuro cercano, con incrementos promedio de 3.9 % bajo SSP2-4.5 y 14.06 % bajo SSP5-8.5. Este aumento inicial es seguido por una disminución gradual hacia fines de siglo, alcanzando reducciones promedio de -30.9 % en SSP2-4.5 y -57.5 % en SSP5-8.5 al término del periodo de análisis. En paralelo, la desviación estándar entre modelos tiende a disminuir con el tiempo, lo que indica una mayor convergencia en las proyecciones hacia los escenarios de largo plazo.

Tabla 5-5: Variación porcentual proyectada de la escorrentía media anual y desviación estándar entre modelos por captación, bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5.

Captación	SSP2-4.5						SSP5-8.5					
	2015-2039		2040-2069		2070-2100		2015-2039		2040-2069		2070-2100	
	Prom [%]	$\sigma$ [%]	Prom [%]	$\sigma$ [%]	Prom [%]	$\sigma$ [%]	Prom [%]	$\sigma$ [%]	Prom [%]	$\sigma$ [%]	Prom [%]	$\sigma$ [%]
Cortafuegos	4.01	11.27	-21.78	10.96	-31.05	7.57	14.84	14.17	-20.09	12.14	-57.78	7.13
El Guindal	3.96	11.17	-21.60	10.87	-30.88	7.52	14.72	14.08	-19.95	12.05	-57.53	7.15
Juan Bueno	3.90	11.13	-21.56	10.82	-30.83	7.49	14.63	14.03	-19.93	12.02	-57.44	7.15
Carbonera	3.89	11.11	-21.53	10.81	-30.80	7.48	14.61	14.02	-19.90	12.00	-57.39	7.15
Dama Juana	3.88	11.10	-21.51	10.80	-30.78	7.47	14.60	14.01	-19.89	11.99	-57.37	7.16
Promedio	3.93	11.16	-21.60	10.85	-30.87	7.51	14.68	14.06	-19.95	12.04	-57.50	7.15

En la Tabla 5-6 se encuentran los rangos de variación porcentual de la escorrentía media anual estimada con Budyko y con la modelación hidrológica, junto con los caudales diarios con 50 % y 85 % de excedencia hacia fines de siglo. Al comparar los resultados de los dos enfoques de estimación de escorrentía, se observa una coherencia general en las tendencias proyectadas. Las diferencias entre métodos son pequeñas, aunque los valores derivados del modelo hidrológico tienden a mostrar reducciones ligeramente más pronunciadas que los obtenidos con Budyko, especialmente hacia el final del siglo. En el escenario SSP2-4.5, las disminuciones de la escorrentía anual proyectadas oscilan entre -41 % y -22 % con Budyko, y entre -42 % y -19 % con el modelo hidrológico. En el escenario más

pesimista (SSP5-8.5), las reducciones se acentúan, alcanzando entre -63 % y -46 % para Budyko y entre -67 % y -46 % para el modelo. Estas diferencias mínimas reflejan la consistencia entre ambos enfoques y refuerzan la confiabilidad de la tendencia general hacia una marcada disminución de la escorrentía en la isla Robinson Crusoe hacia finales de siglo.

En cuanto a los caudales con distintas probabilidades de excedencia Q50 y Q85, se observa una tendencia similar a la descrita para la escorrentía media anual. En ambos escenarios, los valores de Q50 presentan reducciones progresivas a lo largo del siglo, con magnitudes comparables a las de la escorrentía promedio en el escenario SSP2-4.5, a diferencia del SSP5-8.5 donde los valores se intensifican y las reducciones se encuentran en rangos aún más desfavorables, llegando a valores cercanos de hasta -73% para finales del siglo.

Por su parte, los caudales Q85, asociados a condiciones más secas o de menor disponibilidad hídrica, muestran reducciones aún más pronunciadas y una mayor amplitud en sus rangos, especialmente bajo el escenario de altas emisiones (SSP5-8.5), donde existen proyecciones que superan el -90 % en el periodo 2070–2100. Este comportamiento indica una alta vulnerabilidad del régimen de caudales bajos frente al cambio climático, lo que podría tener implicancias directas sobre la disponibilidad de agua en periodos de sequía prolongada.

Tabla 5-6: Rangos de variación porcentual de la escorrentía media anual y del caudal diario proyectados bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 para distintos periodos.

Escorrentía/ Caudal	Variación para SSP2-4.5 [%]			Variación para SSP5-8.5 [%]		
	2015-2039	2040-2069	2070-2100	2015-2039	2040-2069	2070-2100
<i>Q<sub>anual Budyko</sub></i>	[-15.40, 16.09]	[-30.14, -5.55]	[-40.89, -21.96]	[-10.58, 30.07]	[-35.45, -5.02]	[-62.99, -46.37]
<i>Q<sub>anual Modelo</sub></i>	[-18.71, 17.61]	[-38.60, -6.04]	[-42.13, -19.06]	[-8.83, 29.78]	[-38.77, -2.06]	[-66.70, -45.82]
<i>Q<sub>50</sub></i>	[-21.30, 15.88]	[-37.82, -12.41]	[-45.11, -24.62]	[-54.53, 20.02]	[-57.94, -14.36]	[-73.18, -35.87]
<i>Q<sub>85</sub></i>	[-11.77, 24.04]	[-40.31, -4.32]	[-72.82, -48.69]	[-25.00, 32.49]	[-59.66, -2.7]	[-92.82, -64.57]

A modo de complemento, la Tabla 5-7 presenta los valores promedio de variación porcentual de la escorrentía y de los caudales simulados. Se observa que la disminución proyectada del caudal anual estimada mediante la modelación hidrológica es levemente mayor que la obtenida con el enfoque de Budyko, lo que refleja la sensibilidad del modelo hidrológico frente a las variaciones en los forzantes climáticos.

En cuanto a los caudales con distintas probabilidades de excedencia, se evidencia que Q50 presenta una variabilidad similar a la escorrentía media anual, con diferencias de hasta un 5 % en algunos periodos. No obstante, Q85, muestra una disminución mucho más pronunciada hacia finales del siglo, alcanzando una reducción promedio de un 80 % bajo el escenario SSP5-8.5.

Tabla 5-7: Promedios de variación porcentual de la escorrentía media anual y caudales proyectados bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5.

Escorrentía/ Caudal	Variación para SSP2-4.5 [%]			Variación para SSP5-8.5 [%]		
	2015-2039	2040-2069	2070-2100	2015-2039	2040-2069	2070-2100
<i>Q<sub>anual Budyko</sub></i>	2.93	-20.08	-29.38	14.08	-19.54	-55.97
<i>Q<sub>anual Modelo</sub></i>	3.92	-21.60	-30.87	14.68	-19.95	-57.50
<i>Q<sub>50</sub></i>	0.98	-24.14	-35.99	10.84	-23.35	-60.32
<i>Q<sub>85</sub></i>	-6.13	-39.95	-54.06	7.55	-37.90	-80.38

La Figura 5-13 presenta la distribución de las proyecciones de variación de la escurrentía y del caudal estimadas por los modelos para el periodo 2015–2039, bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5. En ella se incluyen las estimaciones de escurrentía media anual obtenidas mediante el enfoque de Budyko y con el modelo hidrológico de Hinojosa (2025), junto con los caudales diarios correspondientes a las probabilidades de excedencia del 50 % y del 85 %.

En general, se observa que el escenario SSP5-8.5 presenta una mayor dispersión entre modelos (cajas más amplias), lo que indica una mayor incertidumbre asociada al escenario climático más extremo, mientras que en el escenario SSP2-4.5 las proyecciones son más consistentes y concentradas. Tanto el enfoque de Budyko como el modelo hidrológico muestran valores de media positivos (entre 0 y 20%), lo que sugiere un ligero aumento de la escurrentía media anual en el corto plazo, más pronunciado en el escenario SSP5-8.5. Además, las medianas obtenidas mediante el modelo hidrológico son levemente superiores a las del método de Budyko, lo que podría estar asociado a la sensibilidad del modelo ante pequeñas variaciones en la precipitación y temperatura. Cabe destacar que los valores atípicos (outliers), representados por puntos fuera de las cajas, corresponden a los modelos GFDL-CM4 (valor positivo) e IPSL-CM6A-LR (valor negativo) para este periodo analizado.

En cuanto a los caudales diarios, las proyecciones de Q50 muestran un comportamiento similar al de la escurrentía media anual, con valores centrales positivos y una variabilidad comparable entre escenarios. Sin embargo, Q85 presenta una mayor dispersión, especialmente bajo SSP2-4.5, lo que indica una mayor sensibilidad de los caudales bajos frente a las condiciones climáticas proyectadas. Además, se identifica un valor atípico (outlier) cercano al -50 %, correspondiente al modelo IPSL-CM6A-LR que proyecta una fuerte disminución del caudal en comparación con el resto, evidenciando la incertidumbre inherente a los modelos de cambio climático.

Para el mediano plazo (2040–2069) se proyecta una disminución generalizada de la escurrentía en ambos escenarios, con valores comprendidos entre aproximadamente -10 % y -30 %. La variabilidad entre modelos es similar en los dos escenarios, aunque en SSP5-8.5 se observan valores extremos ligeramente más amplios y una mediana más negativa, cercana al -20 %. En el caso del caudal Q50, las proyecciones muestran una menor dispersión bajo SSP2-4.5, mientras que en SSP5-8.5 la variabilidad es comparable a la de la escurrentía, con medianas en torno al -25 %, lo que refleja una reducción progresiva en los caudales medios. Por su parte, el caudal Q85, evidencia descensos más pronunciados, con medianas cercanas a -45 % en SSP2-4.5 y -35 % en SSP5-8.5, aunque este último escenario presenta mayor dispersión entre modelos. Cabe destacar la presencia de valores atípicos, que indican una menor reducción del caudal y corresponden al modelo MPI-ESM1-2-HR.

Para el horizonte de tiempo lejano (2070–2100), se observa una reducción en el tamaño de las cajas para la escurrentía, lo que indica una menor dispersión entre los modelos en comparación con los periodos anteriores, es decir, mayor consenso en las proyecciones. Esta reducción de la variabilidad es más evidente cuando se estima mediante el modelo hidrológico, lo que sugiere una convergencia de los modelos hacia escenarios más secos. En ambos enfoques, Budyko y modelación hidrológica, las medianas son similares, con reducciones cercanas al -30 % en SSP2-4.5 y alrededor de -55 % en SSP5-8.5, reflejando una marcada disminución en la disponibilidad hídrica hacia fines de siglo.

En cuanto a los caudales diarios, se aprecia un aumento relativo en la variabilidad respecto a la escurrentía media anual. El Q50 muestra medianas de aproximadamente -40 % para SSP2-4.5 y -60 % para SSP5-8.5, lo que indica un deterioro progresivo en los caudales medios. Por su parte, el Q85 exhibe la mayor dispersión, especialmente en SSP2-4.5, donde las diferencias entre modelos son más notorias. En contraste, bajo SSP5-8.5 existe mayor consenso entre los modelos, aunque las reducciones proyectadas son más severas, alcanzando un valor de mediana cercano al -85 %, lo que evidencia un riesgo crítico de disminución en los caudales bajos y, por ende, una mayor vulnerabilidad del sistema hídrico insular.

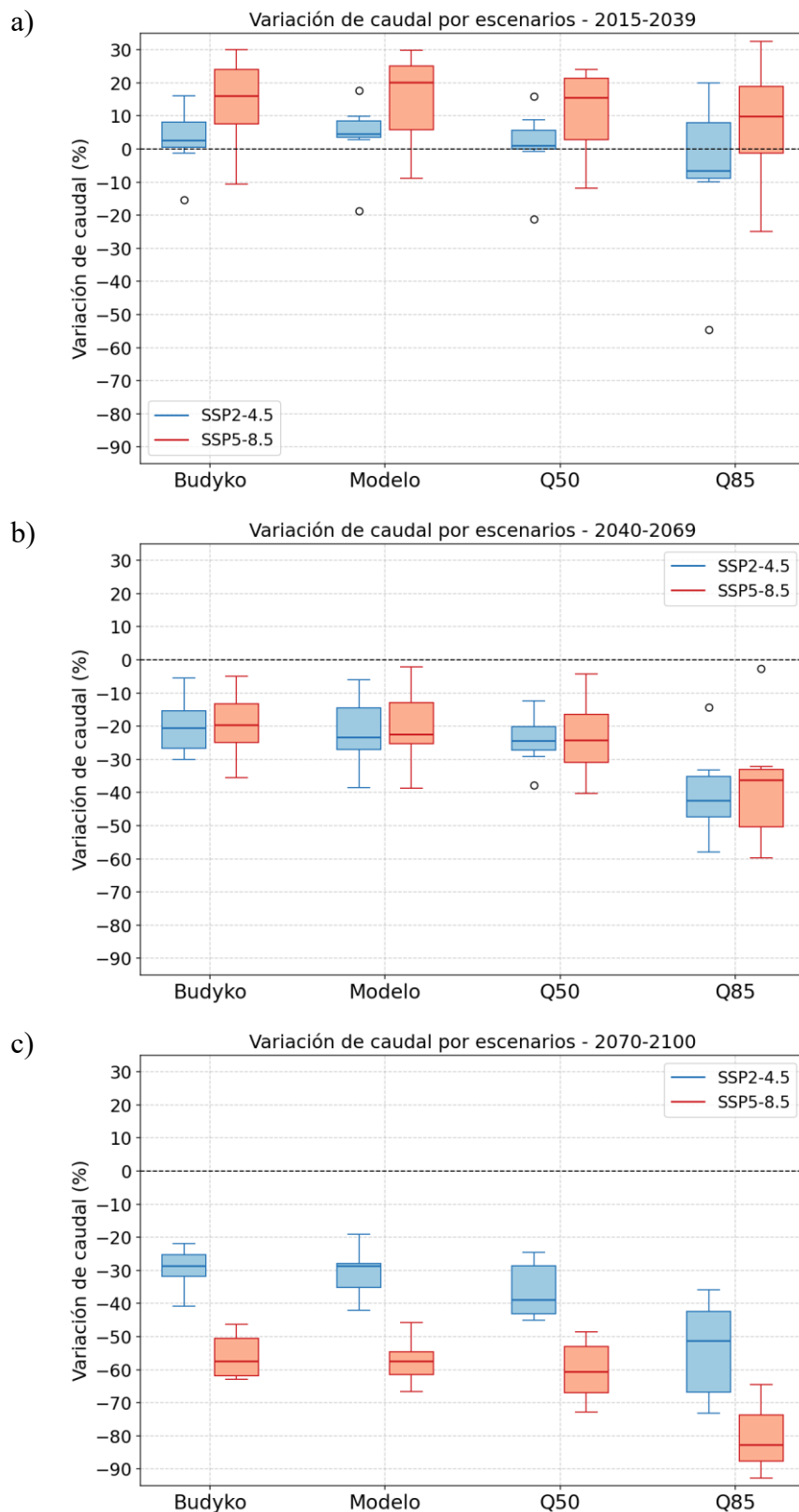


Figura 5-13. Boxplots de la variación proyectada de escorrentía y caudal en la isla bajo los escenarios SSP2-4.5 (azul) y SSP5-8.5 (rojo) para tres periodos futuros: a) 2015–2039, b) 2040–2069 y c) 2070–2100. Los resultados se presentan para los métodos Budyko, Promedio, Q50 y Q85, expresados como cambio porcentual respecto al periodo histórico (1985–2014).

Para analizar con mayor detalle el comportamiento de los caudales diarios, se presenta en la Figura 5-14 la curva de duración obtenida a partir del promedio de los valores históricos por captación. A partir de esta curva se estima que, para el período 1985-2100, el caudal Q50 alcanza aproximadamente 0.0018 m<sup>3</sup>/s, mientras que el Q85 corresponde a 0.0006 m<sup>3</sup>/s. La curva evidencia una caída abrupta en los primeros porcentajes de excedencia, lo que indica que un número reducido de días concentra los caudales más altos, asociados principalmente a eventos de precipitación intensa o de tormenta.

A partir de un 20–30 % de excedencia, los caudales ya son muy bajos, y hacia un 60 % tienden prácticamente a cero. Esto refleja un aporte subterráneo limitado y la ocurrencia de largos periodos con caudales mínimos, lo que a su vez indica que una captación sostenida requiere necesariamente de almacenamiento o de fuentes complementarias. Este análisis contribuye a explicar con mayor claridad la diferencia observada entre la variación de los caudales promedios diarios y los anuales.

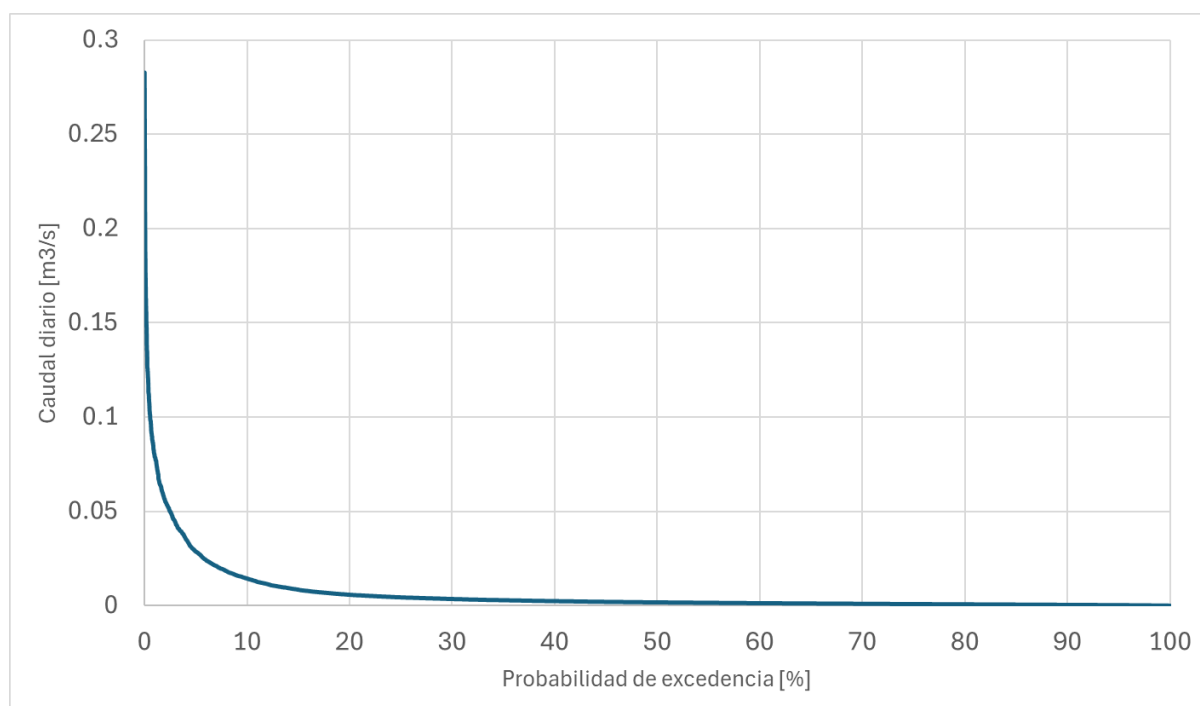


Figura 5-14. Curva de duración de caudales para la estación Juan Fernández en el período histórico 1985–2014.

La Figura 5-15 muestra la variación mensual promedio de escorrentía para el período histórico (1985–2014) y para el horizonte futuro lejano (2070–2100) bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5. Se observa que durante los meses más cálidos y secos (diciembre a marzo), las diferencias entre escenarios son mínimas, evidenciando valores de escorrentía bajos y relativamente estables, lo que refleja la limitada disponibilidad hídrica durante el verano. En contraste, durante los meses de invierno (junio a agosto), cuando se registran los mayores aportes hídricos, la reducción proyectada de la escorrentía se vuelve más pronunciada.

En cuanto a la variabilidad entre modelos, la Figura 5-15a muestra que bajo el escenario SSP2-4.5 se observa una mayor dispersión en las proyecciones de escorrentía, lo que indica una incertidumbre más elevada respecto al comportamiento futuro del régimen hidrológico. Esta variabilidad es especialmente visible durante los meses de mayor precipitación (junio–agosto), donde los modelos difieren considerablemente en la magnitud de la escorrentía proyectada: mientras algunos anticipan una disminución moderada, otros sugieren que los caudales podrían mantenerse cercanos a los valores históricos o incluso incrementarse levemente. En contraste, los meses secos (diciembre–marzo) presentan mayor coherencia entre modelos, reflejando una respuesta más uniforme ante la escasez de precipitaciones.

Por su parte, el escenario SSP5-8.5 muestra una mayor consistencia entre modelos, con una reducción más clara y homogénea a lo largo del año. Esto sugiere que, bajo condiciones de calentamiento más extremo, el efecto del forzamiento climático domina sobre la variabilidad interna del sistema, generando una señal más robusta de descenso generalizado de la escorrentía. Además, la menor dispersión observada en SSP5-8.5 puede interpretarse como una mayor certidumbre en la tendencia negativa, lo que refuerza la proyección de un régimen hídrico progresivamente más árido hacia fines de siglo.

En cuanto al promedio de las proyecciones, la Figura 5-15b muestra que la variabilidad interanual del caudal presenta una disminución generalizada en ambos escenarios, siendo esta más pronunciada bajo SSP5-8.5. Sin embargo, las curvas mantienen una forma similar a la serie histórica, lo que indica que, pese a la reducción en los valores absolutos de escorrentía, la estacionalidad del régimen hídrico se conserva. En otras palabras, las precipitaciones y caudales continúan concentrándose principalmente durante los meses de invierno (junio–agosto), mientras que los meses de verano (diciembre–marzo) permanecen caracterizados por bajos aportes hídricos. Esto sugiere que el cambio climático afectaría principalmente la magnitud del caudal, pero no alteraría de forma sustancial el patrón estacional de la escorrentía.

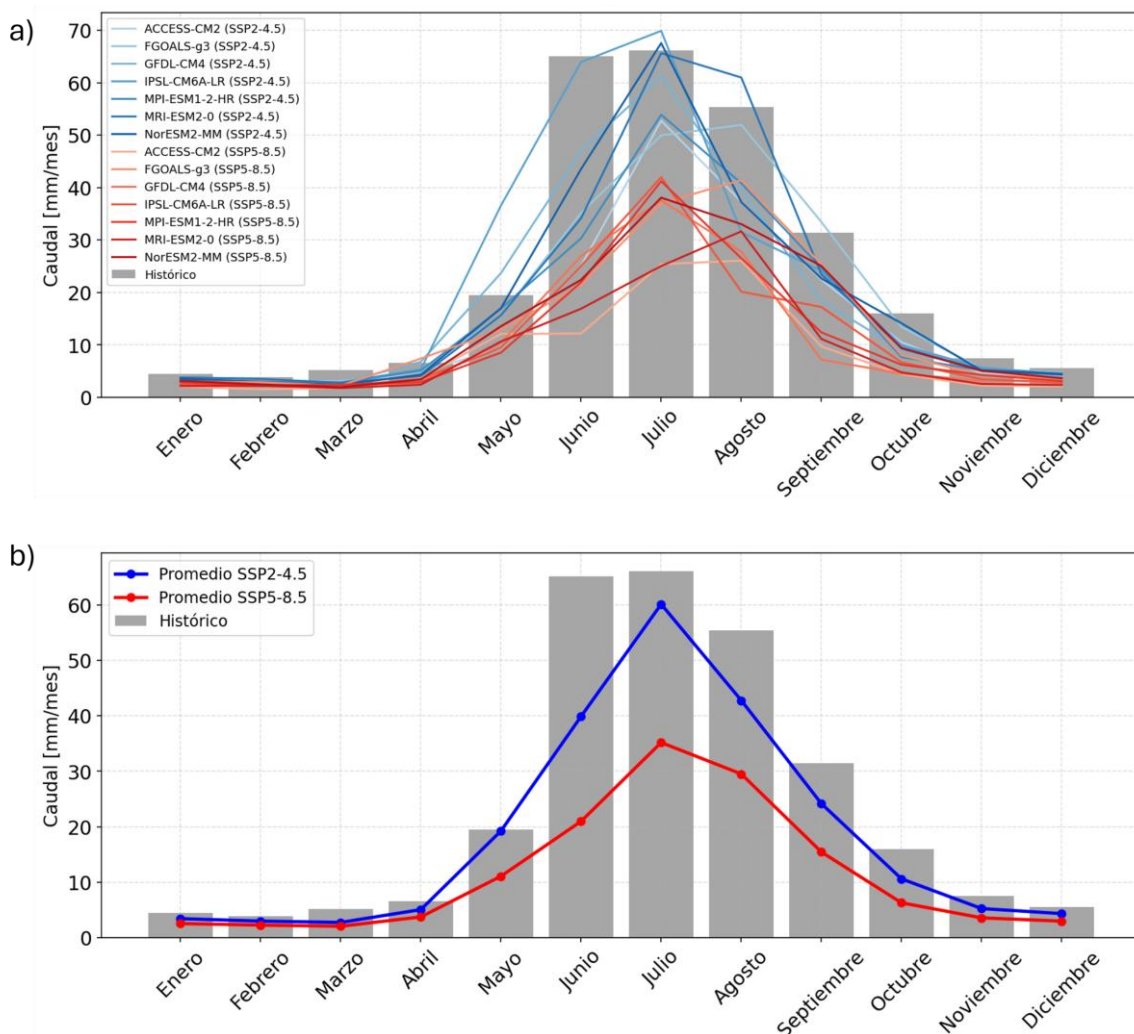


Figura 5-15. Variación interanual del caudal para finales del siglo. Se muestra el período histórico (1985–2014) representado en barras grises, junto con los a) Resultados de los modelos para los escenarios futuros SSP2-4.5 (líneas azules) y SSP5-8.5 (líneas rojas) y los b) Promedios de los modelos para los escenarios SSP2-4.5 (línea azul) y SSP5-8.5 (línea roja).

La Tabla 5-8 complementa este análisis al presentar los valores absolutos del caudal promedio mensual y su variación neta y porcentual proyectada bajo ambos escenarios de emisiones. Se observa que, aunque la magnitud del caudal varía estacionalmente, con máximos entre junio y agosto, el porcentaje de disminución es relativamente homogéneo a lo largo del año. En términos generales, las reducciones proyectadas fluctúan entre -1 y -47 % en el escenario SSP2-4.5, y entre -41 y -68 % bajo SSP5-8.5. Los meses de marzo y junio presentan las mayores disminuciones relativas en el escenario más desfavorable, coincidiendo con los periodos de transición estacional y de máxima recarga, respectivamente. Estos resultados confirman que, si bien la magnitud de las pérdidas varía mensualmente, la tendencia a la reducción es consistente e intensificada en el escenario de mayor forzamiento climático.

Tabla 5-8: Caudal promedio mensual y cambio porcentual proyectado para finales del siglo respecto al período histórico (1985–2014) para los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5.

Mes	Caudal Promedio [mm/mes]			Cambio porcentual de Caudal [%]	
	Historico	SSP2-4.5	SSP5-8.5	SSP2-4.5	SSP5-8.5
Enero	4.47	3.42	2.53	-23.46	-43.28
Febrero	3.87	2.99	2.26	-22.87	-41.56
Marzo	5.18	2.74	2.06	-47.12	-60.30
Abril	6.57	5.06	3.74	-22.98	-43.11
Mayo	19.49	19.24	11.07	-1.26	-43.18
Junio	65.11	39.90	20.98	-38.72	-67.78
Julio	66.11	60.15	35.20	-9.02	-46.76
Agosto	55.39	42.80	29.52	-22.74	-46.70
Septiembre	31.42	24.17	15.44	-23.07	-50.84
Octubre	16.00	10.60	6.29	-33.71	-60.70
Noviembre	7.46	5.25	3.57	-29.69	-52.19
Diciembre	5.56	4.33	2.98	-22.09	-46.46

## 6 Discusiones

### 6.1 Selección de modelos

En este estudio se aplican dos enfoques para priorizar modelos climáticos con mejor desempeño sobre la isla Robinson Crusoe y, con ello, obtener proyecciones más coherentes y robustas. El primero es el diagrama de Taylor, que resume tres métricas estadísticas (correlación, relación de desviación estándar y RMSE centrado). Su principal virtud es la visualización rápida de la habilidad relativa de los GCMs, sin embargo, no integra sesgos de magnitud, ni considera explícitamente propiedades espaciales, por lo que para esta clase de estudios puede resultar insuficiente.

Complementariamente, se emplea el PPI, como un marco más integral y flexible que permite combinar múltiples métricas de desempeño. En el trabajo de Gateño et al. (2024) el PPI incorpora, además de la habilidad para reproducir las medias climatológicas, métricas de patrones espaciales y la capacidad de los GCM para representar teleconexiones relevantes (ENSO y SAM). La formulación del PPI permite incluir o excluir métricas y asignar pesos diferenciados según el objetivo del análisis, lo que posibilita explorar la sensibilidad del ranking de modelos a distintas prioridades (e.g. dar más peso a la variabilidad estacional o a las teleconexiones).

En este trabajo, al evaluar información a escala puntual (y no de forma grillada), se consideran únicamente cinco métricas centradas en características anuales y estacionales, excluyendo las que evalúan patrones espaciales y la capacidad de reproducir teleconexiones. Asimismo, se asigna un peso uniforme a cada métrica ( $S_k = 0.2$ ) para otorgar igual importancia y facilitar la lectura conjunta en el diagrama ED. Aun así, el PPI aplicado aquí sigue siendo más completo que el diagrama de Taylor, pues integra múltiples dimensiones del desempeño en un único indicador, lo que permite comparar modelos de manera consistente cuando se requiere combinar varios criterios simultáneamente.

### 6.2 Método MBCn

Al comparar los resultados de esta memoria con los otros estudios que realizan un análisis similar: el Balance hídrico del año 2023 (DGA, 2022) y las simulaciones climáticas para el territorio insular chileno (Bustos, 2019). Ambos estudios generan proyecciones con modelos CMIP5 en los escenarios RCP2.6 y RCP8.5, mientras que esta memoria utiliza modelos CMIP6 con escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5. Dado que los marcos RCP y SSP no son equivalentes (por ejemplo, RCP2.6 no corresponde a SSP2-4.5), la comparación se restringe al escenario de altas emisiones, esto es, RCP8.5 frente a SSP5-8.5. Cabe destacar que los tres trabajos aplican corrección de sesgo mediante el método MBCn (Cannon, 2018), lo que mejora la comparabilidad de los resultados al homogenizar el tratamiento estadístico de las salidas de los modelos.

Para BH2023, bajo el escenario RCP8.5 y en el periodo 2030–2060, se reporta una disminución de ~11% en la precipitación. En esta memoria, para SSP5-8.5 y el periodo 2040–2069 (no idéntico, pero cercano), se estima una reducción de ~7,7%. Las magnitudes son comparables pese a la diferencia de ventanas temporales, adicionalmente, aquí los modelos fueron seleccionados por su desempeño histórico local (precipitación y temperatura), lo que se espera mejore la precisión de las proyecciones para la isla.

En cuanto al estudio de Bustos, bajo RCP8.5 hacia fines de siglo se proyecta un aumento de ~2 °C y una disminución promedio de ~30% en la precipitación. En esta memoria, para SSP5-8.5 en 2070–2100, se obtiene un aumento ~1,8 °C y una reducción promedio ~27%. Aunque los resultados son cercanos en magnitud, existen diferencias metodológicas relevantes: Bustos no aplica una selección por desempeño local y reporta descensos extremos de hasta ~50%, mientras que en este estudio el caso más desfavorable alcanza ~35%. En síntesis, las tres fuentes coinciden en la tendencia, pero la selección por desempeño local utilizada aquí tiende a acotar los extremos y a mejorar la coherencia de las proyecciones para Robinson Crusoe, lo que recalca la importancia de este proceso para este tipo de análisis.

### 6.3 Método de Budyko

Diversos estudios han aplicado la ecuación de Budyko para realizar balances hídricos, comparando en algunos casos sus resultados con modelos hidrológicos. Teng et al. (2012), por ejemplo, evaluaron el impacto del cambio climático en el caudal medio anual de Australia continental mediante las ecuaciones de Budyko y Fu junto con modelación hidrológica. Sus resultados destacan que la sencillez de la ecuación de Budyko, la similitud con las proyecciones hidrológicas y la alta incertidumbre en las precipitaciones futuras respaldan su utilidad para estimar impactos a gran escala regional. En particular, resulta valiosa en zonas con datos limitados, en estudios orientados a evaluar la disponibilidad hídrica de largo plazo o como etapa preliminar antes de una modelación más detallada. No obstante, las ecuaciones de Budyko y Fu presentan la limitación de estimar solo cambios en el caudal medio anual frente a variaciones en la precipitación y la evaporación potencial. En contraste, los modelos hidrológicos permiten incorporar variaciones subanuales, características climáticas adicionales y simular de manera continua el escurrimiento diario y mensual, aspecto fundamental para estudios de disponibilidad de agua.

Por otro lado, Melo et al. (2024) realizan un análisis de la incertidumbre en la proyección de escurrimiento a largo plazo utilizando el marco de Budyko y un modelo hidrológico conceptual, donde se concluye que, en general, las proyecciones futuras de escurrimiento obtenidas mediante el método Budyko resultan cuantitativamente superiores a las del modelo hidrológico bajo condiciones de mayor precipitación y menor índice de aridez, mientras que ocurre lo contrario en escenarios de menor precipitación y mayor aridez. A pesar de estas diferencias cuantitativas, ambos métodos representan cualitativamente los mismos patrones de variación de la escurrimiento. Asimismo, se destaca que las incertidumbres asociadas a los modelos climáticos son mayores que aquellas vinculadas a la complejidad o a los parámetros de los modelos hidrológicos. En este sentido, la curva de Budyko ofrece amplias posibilidades de aplicación en estudios de impactos hidrológicos en cuencas, ya que su simplicidad y bajos requerimientos de información la convierten en una alternativa útil frente a modelos hidrológicos complejos, especialmente para análisis de primer orden o aplicaciones a gran escala.

Estos antecedentes son pertinentes para el estudio, porque refuerzan el uso de Budyko como herramienta complementaria en la evaluación de impactos hidrológicos bajo cambio climático. Budyko resulta útil, robusto y de bajo costo computacional para estimar cambios en caudales medios anuales en contextos con información limitada; sin embargo, su alcance es acotado para describir la variabilidad interanual y los cuantiles de excedencia.

Cuando el objetivo es analizar caudales diarios y métricas con probabilidad de excedencia, se requiere un modelo hidrológico que represente procesos y almacenamientos propios de la cuenca. En este trabajo, la modelación hidrológica proyecta variaciones mayores que las estimadas con Budyko; esta mayor sensibilidad se interpreta como una señal de aridificación y una prolongación de los periodos secos según lo descrito por Melo et al. (2024). En términos operativos, ello implica caudales de excedencia más bajos y una reducción de la confiabilidad hídrica, aun cuando los promedios anuales sean similares entre métodos.

### 6.4 Modelación hidrológica

Al analizar la variación del caudal promedio anual mediante el método de Budyko y la modelación hidrológica, se observa que los resultados son consistentes entre ambos enfoques, aunque las incertidumbres asociadas no se reducen según el método. Este aspecto es relevante, ya que permite identificar tendencias robustas en los caudales proyectados, pero también resalta la necesidad de considerar la dispersión entre modelos al momento de interpretar los resultados.

Los boxplots muestran que los caudales bajos (Q85) son los más sensibles al cambio climático, registrando descensos más pronunciados y una mayor variabilidad entre modelos en comparación con los caudales medios (Q50) y los promedios anuales. Esto indica que los escenarios futuros no solo implican una reducción generalizada del recurso hídrico, sino que además incrementan la incertidumbre asociada a los periodos de bajo caudal, lo que puede tener implicancias críticas para la gestión del recurso en épocas secas.

Por otra parte, el análisis interanual y mensual muestra que las reducciones proyectadas no siguen un patrón estacional uniforme, sino que varían en magnitud según el escenario de emisiones. En el caso de SSP2-4.5, las disminuciones son más moderadas y dispersas a lo largo del año, con descensos que fluctúan entre -9 % en junio y -23 % en enero, sin una tendencia marcada hacia los meses invernales. En cambio, bajo el escenario SSP5-8.5, las reducciones son más intensas y persistentes, alcanzando un valor máximo cercano a -67 % en junio, aunque sin evidenciar una estacionalidad definida. Estos resultados sugieren que, aunque la disminución porcentual de la escorrentía es generalizada en todos los meses, su magnitud y distribución temporal se vuelven más irregulares conforme aumenta el forzamiento climático, afectando tanto la disponibilidad invernal como los caudales base de verano.

## 6.5 Limitaciones de los modelos climáticos en islas pequeñas

Las islas se encuentran entre las regiones más vulnerables del planeta frente al cambio climático, ya que deben enfrentar amenazas significativas como el aumento del nivel del mar, la intensificación de ciclones tropicales, el incremento de las temperaturas y las alteraciones en los patrones de precipitación. Sin embargo, los modelos climáticos globales (GCMs) presentan limitaciones para representar con precisión los procesos locales y de pequeña escala que determinan el clima insular (Nurse et al., 2014).

En este contexto, se ha enfatizado la necesidad de fortalecer la investigación climática en territorios insulares mediante un enfoque colaborativo y multiescalar. Tal como advierte el artículo publicado en *Nature Climate Change* por Evans et al. (2024), resulta urgente promover una cooperación mundial y regional que permita desarrollar proyecciones de alta resolución compatibles con las dimensiones y características físicas de las islas pequeñas. Alcanzar este objetivo implica no solo avanzar hacia modelos con resoluciones del orden de 1 km, capaces de representar procesos locales como la topografía abrupta e interacciones océano-atmósfera, sino también fomentar la capacitación y participación de científicos y técnicos en los propios estados insulares.

Esta problemática se refleja en el estudio desarrollado por Ley et al. (2023), quienes realizaron un análisis de impactos basados en escenarios climáticos para modelar la recarga de aguas subterráneas en pequeñas islas ubicadas en la costa alemana del mar del Norte. En dicho trabajo se generaron proyecciones climáticas de precipitación y temperatura a partir de modelos climáticos regionales (RCM), que si bien el uso de estos permite reducir parcialmente los sesgos sistemáticos presentes en los modelos climáticos globales (GCM), los resultados mostraron que la temperatura media histórica y la precipitación para el período de referencia (1961-1990) aún presentaban diferencias sustanciales entre las observaciones y las salidas combinadas GCM-RCM. Esta discrepancia puede atribuirse a la resolución espacial del RCM utilizado, de 12,5 km, ya que la isla estudiada posee una extensión aproximada de  $14 \times 2$  km, lo que implica que más del 50 % de su superficie queda representada por celdas correspondientes al océano dentro del dominio del modelo.

A pesar de que ambos trabajos, incluido el presente estudio, aplican métodos de corrección de sesgo con el propósito de reducir las discrepancias entre los datos observados y los modelados, persiste la necesidad de contar con modelos climáticos de mayor resolución espacial que permitan representar con mayor fidelidad los procesos locales complejos que caracterizan a los sistemas insulares. Factores como la topografía abrupta, la influencia orográfica sobre la precipitación y la variabilidad asociada a fenómenos de gran escala como El Niño y La Niña, requieren ser captados con mayor detalle para mejorar la comprensión del comportamiento climático y su respuesta ante los distintos escenarios de cambio proyectados.

## 7 Conclusiones

Este estudio evalúa modelos climáticos CMIP6 con mejor desempeño histórico mediante el índice de desempeño pasado (PPI), diagramas de Taylor y análisis de genealogía de código, seleccionando aquellos más representativos para la isla Robinson Crusoe. A estos modelos se aplica la corrección de sesgo MBCn, y con las proyecciones corregidas se utiliza el enfoque hidroclimático de Budyko para estimar la escorrentía promedio anual y finalmente, los resultados fueron incorporados a un modelo hidrológico desarrollado para la isla con parámetros transferidos desde una cuenca con similitudes climáticas y fisiográficas, lo que permite obtener una estimación más detallada de la disponibilidad hídrica futura de la isla.

A partir de los resultados obtenidos para las proyecciones de caudal en la isla, se puede concluir que:

1. La implementación de un proceso de selección de modelos climáticos basado en su desempeño previo a la generación de proyecciones constituye un paso esencial para garantizar resultados consistentes y representativos en la evaluación hidrológica de cuencas. En este trabajo, la aplicación complementaria de dos enfoques estadísticos de evaluación permite fortalecer la robustez del proceso de selección, garantizando que los modelos seleccionados no solo reproduzcan de manera más adecuada las condiciones observadas en la isla, sino que también generen proyecciones más consistentes y confiables. A partir de los resultados obtenidos, se recomienda el uso del índice PPI como herramienta central en este tipo de análisis, dado que integra un conjunto amplio de métricas estadísticas y posibilita incorporar la capacidad de los GCM de reproducir respuestas asociadas a teleconexiones climáticas.
2. El método de Budyko constituye una herramienta sólida para analizar la variabilidad anual y estimar los impactos de la escorrentía a gran escala, lo que lo convierte en un enfoque adecuado para estudios exploratorios. No obstante, su aplicación presenta limitaciones al momento de representar la variabilidad interanual y capturar procesos hidrológicos más detallados.
3. Los resultados muestran que, hacia finales de siglo, la precipitación media anual disminuiría en aproximadamente un 27% bajo el escenario más desfavorable SSP5-8.5, mientras que la temperatura media anual aumentaría en cerca de 1.8 °C. Estas proyecciones se traducen en una reducción del caudal promedio de un 57 % respecto al periodo histórico, lo que implica un riesgo considerable para la seguridad hídrica de la población local.
4. Las proyecciones hidrológicas evidencian una reducción generalizada del caudal en todos los escenarios, con resultados consistentes con los obtenidos mediante el método de Budyko para la variación del caudal promedio anual. Sin embargo, en el caso de los caudales bajos (Q85) se observa una disminución aún más severa, cercana al 80%, acompañada de una mayor incertidumbre, lo que genera una mayor vulnerabilidad en la gestión del recurso hídrico.
5. En cuanto a la calibración del modelo hidrológico, se recomienda explorar cuencas donantes con similitudes climáticas y topográficas, tanto en el hemisferio sur (p. ej., Islas Malvinas o Nueva Zelanda) como en el hemisferio norte (p. ej., islas del Caribe o Hawái), ajustando los criterios de selección para mejorar la transferencia de parámetros a las condiciones particulares de Robinson Crusoe.

Como trabajo futuro, se recomienda reforzar la red de monitoreo hidrometeorológico de la isla para contar con datos locales que mejoren la calibración de modelos hidrológicos y eviten la incertidumbre asociada al uso de parámetros transferidos, ya que puede inducir errores en las estimaciones.

Finalmente, es prioritario integrar estos resultados en la planificación territorial con el fin de gestionar de manera eficiente el recurso hídrico, considerando la alta vulnerabilidad de las islas frente al cambio climático y la necesidad de diseñar medidas de adaptación acordes con los escenarios futuros.

## Bibliografía

- Abdulkareem, J. H., Pradhan, B., Sulaiman, W. N. A., & Jamil, N. R. (2018). Review of studies on hydrological modelling in Malaysia. *Modeling Earth Systems and Environment*, 4(4), 1577–1605. <https://doi.org/10.1007/s40808-018-0509-y>
- AQUATERRA Ingenieros Ltda. (2025). *Estudio hidrogeológico y de mecánica de suelos, comuna de Juan Fernández*.
- Beck, H. E., van Dijk, A. I. J. M., de Roo, A., Miralles, D. G., McVicar, T. R., Schellekens, J., & Bruijnzeel, L. A. (2016). Global-scale regionalization of hydrologic model parameters. *Water Resources Research*, 52(5), 3599–3622. <https://doi.org/10.1002/2015WR018247>
- Budyko, M. I. (1974). *Climate-And-Life*.
- Burnash, R. J. C., Ferral, R. L., & McGuire, R. A. (1973). *A Generalized Streamflow Simulation System: Conceptual Modeling for Digital Computers*.
- Bustos, S. (2019). *Simulaciones climáticas regionales para el territorio insular Chileno*. <https://www.cr2.cl/informe-de-sintesis-simulaciones-climaticas-regionales-para-el-territorio-insular-chileno-cr2/>
- Cannon, A. J. (2018). Multivariate quantile mapping bias correction: an N-dimensional probability density function transform for climate model simulations of multiple variables. *Climate Dynamics*, 50(1–2), 31–49. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3580-6>
- 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(17), 6938–6959. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00754.1>
- Centro de Cambio Global UC. (2022). *Escenarios climáticos para Chile: evidencia desde el Sexto Informe del IPCC*. <https://cambioglobal.uc.cl/publicaciones/escenarios-climaticos-para-chile-evidencia-desde-el-sexto-informe-del-ipcc/>
- Christensen, J., Hulme, M., Von Storch, H., Whetton, P., Jones, R., Mearns, L., & Fu, C. (2001). Regional Climate Information – Evaluation and Projections. In *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 583–638). Cambridge University Press.
- Connors, S., Berger, S., Péan, C., & Bala, G. (2021). *Cambio Climático 2021: Un resumen para todo el mundo*.
- Creed, I. F., Spargo, A. T., Jones, J. A., Buttle, J. M., Adams, M. B., Beall, F. D., Booth, E. G., Campbell, J. L., Clow, D., Elder, K., Green, M. B., Grimm, N. B., Miniati, C., Ramlal, P., Saha, A., Sebestyen, S., Spittlehouse, D., Sterling, S., Williams, M. W., ... Yao, H. (2014). Changing forest water yields in response to climate warming: results from long-term experimental watershed sites across North America. *Global Change Biology*, 20(10), 3191–3208. <https://doi.org/10.1111/gcb.12615>
- Devia, G. K., Ganasri, B. P., & Dwarakish, G. S. (2015). A Review on Hydrological Models. *Aquatic Procedia*, 4, 1001–1007. <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.126>
- DGA. (2022). *Homologación del cálculo hidrológico para la estimación de la oferta natural de agua histórica y futura en Chile*. <https://repositoriodirplan.mop.gob.cl/biblioteca/items/12873b8e-dfa6-42d8-8b47-0d4794dba8b8/full>
- Dirección Meteorológica de Chile. (2024). *Reporte anual de la evolución del clima en Chile: Informe climático del año 2023*. <https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/publicaciones/reportesEvolucionClima>
- Dirección Meteorológica de Chile. (2025). *Reporte anual de la evolución del clima en Chile: Informe climático del año 2024*.

- Evans, J. P., Belmadani, A., Menkes, C., Stephenson, T., Thatcher, M., Gibson, P. B., & Peltier, A. (2024). Higher-resolution projections needed for small island climates. *Nature Climate Change*, *14*(7), 668–670. <https://doi.org/10.1038/s41558-024-02028-9>
- Gateño, F., Mendoza, P. A., Vásquez, N., Lagos-Zúñiga, M., Jiménez, H., Jerez, C., Vargas, X., Rubio-Álvarez, E., & Montserrat, S. (2024). Screening CMIP6 models for Chile based on past performance and code genealogy. *Climatic Change*, *177*(6). <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10584-024-03742-1>
- Hamon, W. R. (1960). *Estimating potential evapotranspiration*. Massachusetts Institute of Technology (MIT).
- Huffman, G., Bolvin, D., Braithwaite, D., Hsu, K., & Joyce, R. (2013). *Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD): NASA Global Precipitation Measurement (GPM) Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERG)*.
- INE. (2022). *Atlas Rural de Chile*. (Brahm Matías & Careaga Catalina, Eds.). <https://bibliotecadigital.odepa.gob.cl/handle/20.500.12650/71509>
- IPCC. (2021). Resumen para responsables de políticas. In *Cambio climático 2021: Bases físicas*.
- IPCC. (2023). *Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>
- IPCC. (2025). *History of the IPCC*. <https://www.ipcc.ch/about/history/>
- Jajarmizad, M., Harun, S., & Salarpour, M. (2012). A Review on Theoretical Consideration and Types of Models in Hydrology. *Journal of Environmental Science and Technology*, *5*(5), 249–261. <https://doi.org/10.3923/jest.2012.249.261>
- Liang, X., Wood, E. F., & Lettenmaier, D. P. (1996). Surface soil moisture parameterization of the VIC-2L model: Evaluation and modification. *Global and Planetary Change*, *13*(1–4), 195–206. [https://doi.org/10.1016/0921-8181\(95\)00046-1](https://doi.org/10.1016/0921-8181(95)00046-1)
- Liu, Z., Wang, Y., Xu, Z., & Duan, Q. (2017). Conceptual Hydrological Models. In *Handbook of Hydrometeorological Ensemble Forecasting* (pp. 1–23). Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-40457-3\\_22-1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-40457-3_22-1)
- Mianabadi, A., Davary, K., Pourreza-Bilondi, M., & Coenders-Gerrits, A. M. J. (2020). Budyko framework; towards non-steady state conditions. *Journal of Hydrology*, *588*, 125089. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2020.125089>
- Municipalidad Juan Fernandez. (2025). *Proyecto Mejoramiento de captaciones y aducciones, comuna de Juan Fernandez*. [www.munijf.cl~secpla@munijf.cl](http://www.munijf.cl~secpla@munijf.cl)
- Musy, A., Hingray, B., & Picouet, C. (Eds.). (2014). *Hydrology*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b17169>
- Orianna Sofía, O. S., & Méndez Rivas, R. (2022). Aplicación de modelos hidrológicos. *Revista Ciencia y Tecnología El Higo*, *12*(2), 59–80. <https://doi.org/10.5377/elhigo.v12i2.15228>
- Ortíz A, & Campillo R. (1982). *Estudio de los recursos físicos archipiélago Juan Fernández*.
- Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, 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. *Journal of Hydrology*, *303*(1–4), 290–306. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2004.08.026>
- Riahi, K., van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O’Neill, B. C., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O., Lutz, W., Popp, A., Cuaresma, J. C., KC, S., Leimbach, M., Jiang, L., Kram, T., Rao, S., Emmerling, J., ... Tavoni, M. (2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change*, *42*, 153–168. <https://doi.org/10.1016/J.GLOENVCHA.2016.05.009>

- Ruiz-Gracia, P., Monterroso-Rivas, A. I., Sánchez-Torres, G., Vargas-Castilleja, R. C., Báez-Vásquez, J., & Conde-Álvarez, A. C. (2022). *Breve Guía para la Selección, Descarga y Aplicación de Escenarios de Cambio Climático para México. De acuerdo con los últimos escenarios del IPCC.*
- Salazar, Á., Thatcher, M., Goubanova, K., Bernal, P., Gutiérrez, J., & Squeo, F. (2024). CMIP6 precipitation and temperature projections for Chile. *Climate Dynamics*, *62*(3), 2475–2498. <https://doi.org/10.1007/s00382-023-07034-9>
- Sharma, D., Das Gupta, A., & Babel, M. S. (2007). Spatial disaggregation of bias-corrected GCM precipitation for improved hydrologic simulation: Ping River Basin, Thailand. *Hydrology and Earth System Sciences*, *11*(4), 1373–1390. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1373-2007>
- Singh, V. P., & Frevert, D. K. (Eds.). (2006). *Watershed Models*. Taylor & Francis Group.
- Solomatine, D., & Wagener, T. (2011). *Hydrological Modeling: Vol. 2.16* (pp. 435–457). Elsevier B.V.
- Taylor, K. E. (2001). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, *106*(D7), 7183–7192. <https://doi.org/10.1029/2000JD900719>
- Taylor, K. E. (2005). *Taylor Diagram Primer*. [https://pcmdi.llnl.gov/staff/taylor/CV/Taylor\\_diagram\\_primer.pdf](https://pcmdi.llnl.gov/staff/taylor/CV/Taylor_diagram_primer.pdf)
- Vásquez, N. A., Mendoza, P. A., Knoben, W. J. M., Arnal, L., Lagos-Zúñiga, M., Clark, M., & Vargas, X. (2024). The Key Role of Temporal Stratification for GCM Bias Correction in Climate Impact Assessments. *Earth's Future*, *12*(8). <https://doi.org/10.1029/2023EF004242>
- Vásquez, N. A., Mendoza, P. A., Lagos-Zuñiga, M., Scaff, L., Muñoz-Castro, E., & Vargas, X. (2025). Robust spatial changes in climate classes: insights from bias-corrected CMIP6 models across Chile. *Environmental Research Letters*, *20*(1). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad9d5b>
- Wang, C., Wang, S., Fu, B., & Zhang, L. (2016). Advances in hydrological modelling with the Budyko framework: A review. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, *40*(3), 409-430.
- Wood, E. F., Lettenmaier, D. P., & Zartarian, V. G. (1992). A land-surface hydrology parameterization with subgrid variability for general circulation models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *97*(D3), 2717–2728. <https://doi.org/10.1029/91JD01786>

## Anexos

### A. Resultados para el índice de desempeño pasado (PPI)

Anexos A. 1: Tabla con métricas de desempeño (M) y valores de  $PPI_{pr}$  para los modelos CMIP6 considerados en este estudio.

Modelo	M_yr_μ	M_yr_σ	M_seas_σ	M_seas_r	M_month_PSS	PPI_pr
ACCESS-CM2	0.409	0.519	0.457	0.958	0.944	0.581
ACCESS-ESM1-5	0.518	0.549	0.491	0.956	0.964	0.626
BCC-CSM2-MR	0.285	0.337	0.347	0.932	0.906	0.473
CanESM5	0.240	0.258	0.262	0.950	0.956	0.421
CESM2-WACCM	0.229	0.268	0.261	0.969	0.942	0.420
CMCC-CM2-SR5-gn	0.222	0.340	0.261	0.969	0.942	0.436
CMCC-ESM2	0.358	0.456	0.496	0.974	0.914	0.559
EC-Earth3	0.498	0.437	0.510	0.986	0.95	0.597
EC-Earth3-AerChem	0.505	0.403	0.502	0.975	0.975	0.588
EC-Earth3-CC	0.494	0.513	0.493	0.971	0.994	0.612
EC-Earth3-Veg	0.494	0.508	0.488	0.969	0.953	0.609
EC-Earth3-Veg-LR	0.510	0.499	0.529	0.973	0.967	0.622
FGOALS-f3-L	0.635	0.742	0.670	0.968	0.972	0.751
FGOALS-g3	0.522	0.591	0.610	0.994	0.967	0.669
GFDL-CM4-gr1	0.401	0.386	0.416	0.960	0.967	0.535
GFDL-CM4-gr2	0.383	0.377	0.393	0.957	0.944	0.522
GFDL-ESM4-gr1	0.446	0.462	0.504	0.976	0.961	0.589
IITM-ESM	0.601	0.598	0.801	0.983	0.958	0.731
INM-CM4-8	0.340	0.246	0.308	0.960	0.95	0.455
INM-CM5-0	0.393	0.366	0.416	0.951	0.942	0.527
IPSL-CM5A2	0.505	0.395	0.402	0.965	0.944	0.559
IPSL-CM6A-LR-gn	0.574	0.856	0.745	0.980	0.956	0.768
KIOST-ESM-gr1	0.486	0.472	0.521	0.967	0.972	0.607
MIROC6-gn	0.588	0.611	0.652	0.989	0.961	0.702
MPI-ESM1-2-HR	0.359	0.363	0.386	0.970	0.953	0.511
MPI-ESM1-2-LR	0.326	0.338	0.387	0.950	0.95	0.495
MRI-ESM2-0	0.628	0.574	0.623	0.972	0.975	0.696
NESM3-gn	0.288	0.426	0.330	0.929	0.894	0.490
NorESM2-LM	0.324	0.408	0.404	0.978	0.964	0.517
NorESM2-MM	0.345	0.616	0.446	0.968	0.906	0.577
TaiESM1	0.450	0.469	0.619	0.979	0.911	0.616

Anexos A. 2: Tabla con métricas de desempeño (M) y valores de  $PPI_{tas}$  para los modelos CMIP6 considerados en este estudio.

Modelo	M_yr_μ	M_yr_σ	M_seas_σ	M_seas_r	M_month_PSS	PPI_tas
ACCESS-CM2	1.442	0.965	0.817	0.965	0.908	0.781
ACCESS-ESM1-5	2.303	0.682	0.798	0.951	0.886	0.391
BCC-CSM2-MR	3.106	0.582	0.942	0.979	0.936	0.039
CanESM5	0.613	0.992	0.770	0.970	0.914	0.794
CESM2-WACCM	0.400	1.366	0.707	0.985	0.9	0.657
CMCC-CM2-SR5-gn	0.930	1.038	0.744	0.979	0.894	0.871
CMCC-ESM2	0.898	0.808	0.641	0.951	0.814	0.793
EC-Earth3	2.641	0.792	1.061	0.973	0.969	0.259
EC-Earth3-AerChem	2.440	0.983	1.030	0.971	0.964	0.356
EC-Earth3-CC	2.736	0.991	1.037	0.971	0.967	0.223
EC-Earth3-Veg	2.510	0.743	1.034	0.971	0.967	0.314
EC-Earth3-Veg-LR	2.514	1.019	1.111	0.971	0.975	0.321
FGOALS-f3-L	1.106	0.903	0.972	0.936	0.95	0.925
FGOALS-g3	1.653	0.696	0.804	0.944	0.9	0.662
GFDL-CM4-gr1	0.852	0.806	1.017	0.987	0.956	0.889
GFDL-CM4-gr2	1.090	0.812	1.011	0.985	0.958	0.905
GFDL-ESM4-gr1	1.685	0.634	1.021	0.980	0.969	0.652
IITM-ESM	2.352	0.718	1.036	0.960	0.95	0.381
INM-CM4-8	0.545	0.811	0.690	0.942	0.889	0.734
INM-CM5-0	0.697	0.940	0.739	0.951	0.914	0.814
IPSL-CM5A2	0.771	0.914	1.167	0.952	0.881	0.855
IPSL-CM6A-LR-gn	1.458	0.836	1.145	0.958	0.922	0.770
KIOST-ESM-gr1	2.329	0.988	0.741	0.947	0.85	0.390
MIROC6-gn	2.308	0.709	0.800	0.920	0.894	0.391
MPI-ESM1-2-HR	0.945	0.900	0.904	0.970	0.969	0.931
MPI-ESM1-2-LR	1.282	1.047	0.818	0.970	0.931	0.845
MRI-ESM2-0	1.343	0.762	0.740	0.965	0.872	0.772
NESM3-gn	1.540	1.085	1.275	0.983	0.892	0.722
NorESM2-LM	1.939	1.043	0.882	0.984	0.933	0.575
NorESM2-MM	1.124	1.115	0.752	0.973	0.911	0.859
TaiESM1	1.419	1.181	0.813	0.939	0.908	0.774

Anexos A. 3: Tabla con valores de la distancia euclidiana (ED) para los modelos analizados.

Modelo	ED
ACCESS-CM2	0.473
ACCESS-ESM1-5	0.715
BCC-CSM2-MR	1.096
CanESM5	0.615
CESM2-WACCM	0.674
CMCC-CM2-SR5-gn	0.579
CMCC-ESM2	0.487
EC-Earth3	0.843
EC-Earth3-AerChem	0.765
EC-Earth3-CC	0.868
EC-Earth3-Veg	0.789
EC-Earth3-Veg-LR	0.777
FGOALS-f3-L	0.260
FGOALS-g3	0.473
GFDL-CM4-gr1	0.478
GFDL-CM4-gr2	0.488
GFDL-ESM4-gr1	0.539
IITM-ESM	0.675
INM-CM4-8	0.607
INM-CM5-0	0.508
IPSL-CM5A2	0.464
IPSL-CM6A-LR-gn	0.327
KIOST-ESM-gr1	0.726
MIROC6-gn	0.678
MPI-ESM1-2-HR	0.494
MPI-ESM1-2-LR	0.528
MRI-ESM2-0	0.380
NESM3-gn	0.581
NorESM2-LM	0.643
NorESM2-MM	0.445
TaiESM1	0.446

Anexos A. 4: Índice de desempeño pasado para precipitación (eje x) y temperatura (eje y) donde cada punto representa un GCM, donde  $S_k = 1$  para todas las métricas.

