



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

# PROYECCIONES DE LA SUSTENTABILIDAD DEL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN LA ISLA RAPA NUI

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

CAMILA ALEJANDRA DONOSO YAÑEZ

PROFESORA GUÍA:  
XIMENA VARGAS MESA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
PABLO MENDOZA ZÚÑIGA  
IGNACIO TORO MENA

SANTIAGO DE CHILE  
2024

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE:** Ingeniera Civil  
**ESTUDIANTE:** Camila Alejandra Donoso Yañez  
**FECHA:** 2024  
**PROFESORA GUÍA:** Ximena Vargas Mesa

## **PROYECCIONES DE LA SUSTENTABILIDAD DEL ALMACENAMIENTO DE AGUA EN LA ISLA RAPA NUI**

En las últimas décadas, la isla Rapa Nui ha experimentado importantes impactos del cambio climático, tales como disminuciones en la precipitación y aumentos en la temperatura, lo que ha provocado una notable reducción en la oferta hídrica. Este escenario se complica aún más debido a la vulnerabilidad del sistema hidrológico de la isla, que depende en gran medida de un acuífero susceptible a infiltraciones salinas y contaminación. Además, el aumento de la demanda hídrica, impulsado por el crecimiento de la población, ha puesto una presión adicional sobre los recursos hídricos de la isla.

En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo evaluar la sustentabilidad futura del abastecimiento de agua en la isla Rapa Nui (164 km<sup>2</sup>), ubicada en el océano Pacífico. La evaluación se realiza mediante la proyección de la oferta y demanda hídrica a corto (2030-2059) y largo plazo (2070-2099), utilizando los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 de la sexta fase del Proyecto de Comparación de Modelos Acoplados (CMIP6 por sus siglas en inglés) y el modelo hidrológico SUMMA, forzado con los modelos climáticos TaiESM1, MPI-ESM1.2-LR y CMCC-CM2-SR5.

La metodología incluye la recopilación de datos meteorológicos y geomorfológicos para forzar el modelo SUMMA, la estimación de la oferta hídrica mediante la recarga del acuífero, la proyección de la demanda hídrica con ajustes históricos, y el análisis del déficit hídrico para evaluar la sustentabilidad del sistema en términos de confiabilidad, resiliencia y vulnerabilidad. Los resultados indican una disminución considerable en la recarga del acuífero, con reducciones del 20-98% proyectadas para el futuro cercano y del 42-100% para el futuro lejano, en comparación con el período histórico. Además, el aumento en la demanda hídrica debido al crecimiento poblacional y la actividad pecuaria exacerba el déficit hídrico. Se concluye que el sistema de abastecimiento de agua en Rapa Nui no será sustentable bajo las condiciones proyectadas, subrayando la necesidad urgente de implementar medidas de adaptación y gestión de recursos para asegurar un suministro de agua sostenible en el futuro.

# Agradecimientos

Quisiera expresar mi más profundo agradecimiento a mis padres, quienes, de todas las maneras posibles, siempre me han apoyado y acompañado. Han celebrado mis logros, me han aconsejado en mis momentos difíciles y siempre han estado ahí para mí. También quiero agradecer a mi grupo querido, Saver y Thomas, por los momentos compartidos, las risas, las lágrimas, las salidas, y esos silencios que también se aprecian. Los quiero muchísimo.

Un agradecimiento especial a mi fiel compañero, mi gato, que, aunque no lo sepa, o quizás sí, siempre ha estado a mi lado brindándome su cariño y compañía.

A mi profesora guía, Ximena Vargas, le extiendo mi más sincero agradecimiento por sus valiosas recomendaciones, orientación y apoyo, tanto en lo académico como en lo personal. Sus enseñanzas me acompañarán siempre. De igual manera, agradezco a los profesores Pablo Mendoza e Ignacio Toro por compartir conmigo su conocimiento y su pasión por la hidrología, los admiro un montón.

También agradezco a mis mentores, Marcia Paredes y Fabián Lema, quienes con infinita paciencia me guiaron en el desarrollo de este trabajo. Sus enseñanzas fueron clave para la culminación de esta etapa.

Finalmente, quiero agradecer a todas esas personas que conocí durante mi tiempo en Beauchef: Cote, César, Marcelo, Camilo, Javi, Dani, Carri, Cata, Coti, Seba, Luciano, Jero, Danielito, y tantos otros que alegraron mis días y compartieron conmigo esta experiencia.

# Tabla de Contenido

<b>Capítulo 1 : Introducción.....</b>	<b>1</b>
1.1. Objetivos.....	2
1.1.1. Objetivos específicos .....	2
1.2. Organización de la memoria .....	2
<b>Capítulo 2 : Estado del Arte .....</b>	<b>3</b>
2.1. Cambio climático.....	3
2.2. Modelos de Circulación Global (GCMs).....	6
2.2.1. Selección de escenarios y modelos.....	6
2.2.2. Métodos de escalamiento espacial.....	7
2.3. Modelación hidrológica .....	8
2.3.1. Modelo hidrológico SUMMA.....	9
2.3.2. Índices de eficiencia de modelos.....	10
2.4. Estudios previos en isla Rapa Nui.....	13
2.5. Índices de sustentabilidad hídrica.....	14
<b>Capítulo 3 : Caracterización zona de estudio .....</b>	<b>18</b>
3.1. Antecedentes generales.....	18
3.2. Información meteorológica.....	19
3.3. Caracterización de la recarga subterránea .....	20
3.4. Caracterización de la demanda hídrica .....	21
<b>Capítulo 4 : Metodología.....</b>	<b>24</b>
4.1. Determinación de la oferta hídrica .....	25
4.1.1. Forzantes meteorológicas.....	25
4.1.2. Modelo hidrológico y calibración .....	29
4.2. Determinación de la demanda hídrica.....	31
4.3. Análisis de la sustentabilidad hídrica .....	32
<b>Capítulo 5 : Resultados y discusión .....</b>	<b>33</b>
5.1. Forzantes meteorológicas .....	33
5.1.1. Período histórico (1985-2014).....	33
5.1.2. Período futuro (2015-2099).....	34
5.2. Calibración y validación del modelo SUMMA .....	38
5.3. Resultados modelación hidrológica .....	41
5.3.1. Balance hídrico en Rapa Nui .....	44
5.3.2. Determinación de la oferta hídrica .....	45
5.4. Determinación de la demanda hídrica.....	47
5.5. Índices de sustentabilidad hídrica.....	49

<b>Capítulo 6 : Conclusiones.....</b>	<b>57</b>
<b>Bibliografía .....</b>	<b>59</b>
<b>Anexo A: Parámetros de calibración .....</b>	<b>66</b>
<b>Anexo B: Series estacionales y distribución media anual de forzantes históricas.....</b>	<b>67</b>
<b>Anexo C: Evaluación de desempeño histórico de GCMs crudos .....</b>	<b>68</b>
<b>Anexo D: Resultados downscaling .....</b>	<b>70</b>
<b>Anexo E: Resultados método KNN .....</b>	<b>72</b>
<b>Anexo F: Distribución espacial de variables meteorológicas históricas .....</b>	<b>73</b>

## Figuras

Figura 2-1: Combinaciones de Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP) y forzamientos radiativos (RCP) para el año 2100. Imagen adaptada de O'Neill, et al., 2016. ....	5
Figura 2-2: Representación conceptual de los procesos físicos dominantes a escala de cuenca. Fuente: (Clark, et al., 2015a). ....	9
Figura 2-3: Diagrama conceptual de la arquitectura de SUMMA que respalda múltiples opciones de modelos para una variedad de procesos físicos, integrados como parte de un solucionador numérico común. Fuente: Imagen adaptada de Clark, et al., 2015a. ....	10
Figura 3-1: Mapa con la ubicación geográfica (a), rango de elevaciones (b), y uso (c) y tipo de suelo (d) de la isla Rapa Nui. ....	18
Figura 3-2: En panel superior, se muestra la variación estacional de precipitación y temperatura en la isla Rapa Nui, según el producto grillado del BH5 (izq.) y la estación Mataverí (der.). El panel inferior presenta la distribución espacial de precipitación y temperatura del producto grillado. El círculo negro indica la ubicación de la estación Mataverí. ....	20
Figura 4-1: Diagrama de flujo de la metodología empleada en el presente trabajo. ....	24
Figura 4-2: Diagrama de flujo de la metodología K-Nearest Neighbor (KNN) para generar clima futuro a partir de similares meteorológicos en el período histórico. ....	29
Figura 5-1: Selección de modelos GCMs crudos para la isla Rapa Nui, mediante distancia euclidiana entre los índices PPI de precipitación ( <i>PPIP<sub>r</sub></i> ) y temperatura ( <i>PPIT<sub>a</sub></i> ), con respecto a su valor ideal igual a 1 (Gateño, et al., 2023). En el subtítulo se especifican las ponderaciones utilizadas en los criterios del índice PPI. ....	34
Figura 5-2: Selección de modelos GCMs corregidos con método MBC <sub>n</sub> para la isla Rapa Nui. La elección se realiza mediante índice modificado PPI (Gateño, et al., 2023)	

para precipitación ( <i>PPIPr</i> ) y temperatura ( <i>PPITas</i> ). En el subtítulo se especifican las ponderaciones utilizadas en los criterios del índice PPI modificado y en líneas punteadas el valor ideal de cada PPI.....	35
Figura 5-3: Series anuales de precipitación (panel superior) y temperatura (panel inferior) con resultados de downscaling de los modelos TaiESM1, MPI.ESM1.2.LR y CMCC.CM2.SR5, usando el método MBCn. Para el período histórico, el ensamble gris muestra los tres modelos GCMs, con el promedio en gris y las observaciones en negro. Para el futuro, los ensambles rojo y verde corresponden a los modelos para los escenarios SSP5-8.5 y SSP2-4.5, respectivamente, con sus promedios en líneas punteadas de los mismos colores.....	36
Figura 5-4: Curvas de variación estacional de la precipitación (A y B) y la temperatura (C y D) para el período histórico, futuro cercano y futuro lejano, utilizando los modelos TaiESM1, MPI.ESM1.2.LR y CMCC.CM2.SR5, bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5.....	37
Figura 5-5: Gráficos de dispersión comparan la evapotranspiración mensual simulada por el modelo SUMMA con los datos del producto satelital MODIS. En el panel A se muestran los resultados del período de calibración, y en el panel B los del período de evaluación. La línea punteada roja representa la recta 1:1.....	39
Figura 5-6: Variación estacional de evapotranspiración (ET) en Rapa Nui, para el período de calibración (A) y evaluación (B). .....	40
Figura 5-7: Serie anual de precipitación, evapotranspiración y escorrentía en Rapa Nui, durante el período histórico (1985-2014), obtenida de forzantes observadas y simuladas por los modelos TaiESM1, MPI.ESM1.2.LR y CMCC.CM2.SR5.....	42
Figura 5-8: Variación porcentual en el futuro cercano (panel superior) y lejano (panel inferior) de ET, P y Recarga con respecto al período histórico de cada modelo y escenario de cambio climático. ....	43
Figura 5-9: Oferta hídrica en la isla Rapa Nui para los períodos histórico y futuro cercano y lejano, según los escenarios de cambio climático SSP2-4.5 y SSP5-8.5.....	46
Figura 5-10: En el panel izquierdo se muestran los ajustes matemáticos para los datos históricos de población flotante (a), residente (c) y pecuaria (e). En el panel derecho se muestra la proyección de la demanda hídrica de la población flotante (b), residente (d) y pecuaria (f). .....	49
Figura 5-11: El panel superior muestra la serie anual de déficit en la isla Rapa Nui, para ambos escenarios de cambio climático. El panel inferior muestra los índices de sustentabilidad (SI) de cada usuario de agua y del sistema hídrico total, tanto para el período futuro cercano como lejano. Las barras de error representan la dispersión proveniente de los modelos climáticos.....	51
Figura 5-12: Evaluación de desempeño futuro de índice SI según usuario de agua. En el panel izquierdo se encuentra el desempeño del futuro cercano, y en el panel derecho el desempeño del futuro lejano. Las abreviaturas MaxDef, Rel, Res y Vul se	

refieren a la descomposición del índice SI, máximo déficit, confiabilidad, resiliencia, vulnerabilidad y sustentabilidad, respectivamente. ....	53
Figura 5-13: Índice SI y SGI para distintos escenarios de reducción de la demanda total (flotante + pecuaria) en el futuro lejano. En líneas punteadas se muestra el valor SGI en el escenario más conservador de reducción de la demanda. ....	54
Figura 5-14: Serie anual de déficit en la isla Rapa Nui, para ambos escenarios de cambio climático, considerando política de reducción del 90% de la demanda total en el futuro lejano. ....	55
Figura 5-15: Población flotante anual proyectada y crecimiento ideal de la población junto a valor límite al año 2100 que se esperaría tras aplicación de política de reducción del 90% de la demanda. ....	56
Figura 5-16: Población pecuaria anual proyectada y crecimiento ideal de la población junto a valor límite al año 2100 que se esperaría tras aplicación de política de reducción del 90% de la demanda. ....	56
Figura B-1: En el panel izquierdo, se presentan las curvas de variación estacional de las forzantes meteorológicas utilizadas para la ejecución del modelo hidrológico SUMMA para la isla Rapa Nui. En el panel derecho se presentan los mapas de distribución media anual de aquellas variables. ....	678
Figura C-1: Desempeño de las componentes del índice PPI de precipitación (a), que incluye montos anuales (b), Variabilidad interanual (c), Amplitud estacional (c) y distribución probabilística mensual o PSS (d). Las etiquetas muestran los cinco mejores modelos según cada criterio. ....	69
Figura C-2: Desempeño de las componentes del índice PPI de temperatura (a), que incluye montos anuales (b), Variabilidad interanual (c), Amplitud estacional (c) y distribución probabilística mensual o PSS (d). Las etiquetas muestran los cinco mejores modelos según cada criterio. ....	70
Figura D-1: Curvas de variación estacional de modelos GCMs crudos (panel izquierdo) y corregidos con método MBCn (panel derecho), tanto para precipitación (panel superior) como temperatura (panel inferior). En línea sólida de color negro se muestran las observaciones y en líneas punteadas de colores los tres modelos seleccionados. ....	71
Figura D-2: Serie anual de número de días con precipitación (P) mayor a 0,05 mm. Las observaciones se representan con una línea sólida negra (Mataverí) y los modelos seleccionados se representan con líneas punteadas de colores. ....	72
Figura E-1: Curvas de variación estacional de las forzantes Humedad Relativa (HR), Velocidad del viento, Radiación de onda corta (SWR) y larga (LWR), para los escenarios de cambio climático SSP2-4.5 y SSP5-8.5, para los períodos histórico, futuro cercano y futuro lejano. ....	73
Figura F-1: Distribución espacial de ET (A), Q (B), y Recarga (C) simuladas por el modelo SUMMA-Rapa Nui para el período 1985-2014, a partir de forzantes meteorológicas observadas. ....	74

Figura F-2: Distribución espacial de ET (A), Q (B), y Recarga (C) simuladas por el modelo SUMMA-Rapa Nui para el período 1985-2014, a partir de datos del modelo CMCC.CM2.SR5.....	74
Figura F-3: Distribución espacial de ET (A), Q (B), y Recarga (C) simuladas por el modelo SUMMA-Rapa Nui para el período 1985-2014, a partir de datos del modelo MPI.ESM1.2.LR.....	75
Figura F-4: Distribución espacial de ET (A), Q (B), y Recarga (C) simuladas por el modelo SUMMA-Rapa Nui para el período 1985-2014, a partir de datos del modelo TaiESM1.....	75

## Tablas

Tabla 2-1: Resumen de las Trayectorias Compartidas de Desarrollo Socioeconómico (SSP). Fuente: (O'Neill et al., 2016).....	5
Tabla 3-1: Evolución de la población residente en la isla Rapa Nui según los Censos de Vivienda y Urbanismo de 1982, 1992, 2002 y 2017. ....	22
Tabla 3-2: Evolución de la población flotante en la isla Rapa Nui según los informes estadísticos del SERNATUR, para el período 2012-2020. ....	22
Tabla 3-3: Evolución de la población pecuaria (bovinos y equinos) de la isla Rapa Nui según los Censos de 1997, 2007 y 2011. ....	23
Tabla 5-1: Promedios climatológicos de precipitación (mm) y temperatura (°C) para el período histórico, y cambios proyectados en las variables. Se consideran los modelos TaiESM1, MPI.ESM1.2.LR y CMCC.CM2.SR5 y los escenarios de cambio climático SSP2-4.5 y SSP5-8.5.....	37
Tabla 5-2: Métricas de desempeño de calibración y evaluación del modelo SUMMA para isla Rapa Nui. ....	39
Tabla 5-3: Principales flujos hidrológicos para el balance hídrico de la isla Rapa Nui, para período histórico y futuro cercano y lejano, bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5. ....	45
Tabla 5-4: Rangos de recarga del acuífero en Rapa Nui, expresados en porcentaje de la precipitación, milímetros y caudal (L/s), según estimaciones del modelo SUMMA, literatura histórica y proyecciones para el futuro cercano y lejano.....	47
Tabla 5-5: Comparación de la oferta natural de agua y la demanda proyectada en Rapa Nui (Mm <sup>3</sup> ) para distintos periodos y escenarios climáticos (SSP2-4.5 y SSP5-8.5) ...	50
Tabla A-1: Nombre, descripción, rango y valor óptimo de parámetros utilizados para la calibración del modelo hidrológico SUMMA para la isla Rapa Nui. ....	66

# Capítulo 1: Introducción

El cambio climático se refiere a alteraciones estadísticas a largo plazo en las condiciones del clima de una región, debido a forzantes naturales o actividades humanas, principalmente a través de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI; IPCC, 2023). En la isla Rapa Nui, se han proyectado importantes cambios en el clima: Gatica y Toro (2021) estimaron un aumento en la frecuencia de sequías extremas, la Dirección General de Aguas (DGA, 2022) proyectó una disminución de la precipitación anual (menor al 1%) para el período 2030-2060 en comparación con el período histórico 1985-2015, y un aumento en la temperatura de aproximadamente 1°C, y Toro et al. (2023) concluyeron que las precipitaciones máximas y los valores de Precipitación Máxima Posible (PMP) aumentarán en el futuro cercano (2030-2060).

Para analizar los impactos de estas alteraciones y definir políticas de adaptación y mitigación, el Panel Internacional de Cambio Climático (IPCC) utilizó Modelos de Circulación General (GCMs) y definió en 2021 los escenarios socioeconómicos futuros, conocidos como Trayectorias Compartidas de Desarrollo Socioeconómico (SSP, por sus siglas en inglés), que describen futuros optimistas y pesimistas en términos de emisiones y políticas climáticas necesarias para alcanzar ciertos forzamientos radiativos (O'Neill et al., 2016).

Estos modelos escalados espacial y estadísticamente alimentan modelos hidrológicos que proyectan la respuesta de las cuencas a corto, mediano y largo plazo, entregando información esencial para la gestión del agua.

DGA (2019, 2022), por ejemplo, utilizó el modelo Variable Infiltration Capacity (VIC; Liang et al., 1994) en Rapa Nui para evaluar los impactos de cuatro GCMs bajo el escenario RCP8.5, revelando una ligera disminución en la precipitación y un aumento en temperatura y evapotranspiración para 2030-2060, en comparación al período 1985-2015, lo que afectará negativamente la recarga del acuífero. Milad (2010) señala que esta reserva subterránea es la principal fuente de agua en la isla, pero es vulnerable a la contaminación, y subraya la necesidad de un plan de gestión para protegerlo.

De este modo, los impactos del cambio climático en el ciclo del agua y la vulnerabilidad del acuífero proyectan una situación desfavorable para los recursos hídricos de Rapa Nui. Por ello, esta memoria busca proyectar la oferta y demanda de agua en la isla, con el objetivo de evaluar la sustentabilidad del sistema de abastecimiento en el corto (2030-2060) y largo plazo (2070-2100), bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 del proyecto CMIP6, utilizando el modelo hidrológico SUMMA, forzado con los GCMs TaiESM1, MPI.ESM1.2.LR y CMCC.CM2.SR5.

# 1.1. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es evaluar la sustentabilidad futura del sistema de abastecimiento de agua en la isla Rapa Nui, incluyendo el análisis de la confiabilidad, resiliencia y vulnerabilidad del sistema hídrico de la isla.

## 1.1.1. Objetivos específicos

- Determinar la disponibilidad hídrica presente y futura en la isla Rapa Nui, bajo los escenarios de cambio climático SSP2-4.5 y SSP5-8.5.
- Estimar la demanda de agua presente y futura en la isla Rapa Nui.
- Evaluar la sustentabilidad del sistema de abastecimiento de agua en la isla Rapa Nui.

# 1.2. Organización de la memoria

El presente documento se encuentra organizado en los capítulos descritos a continuación:

En el Capítulo 2 se revisa la literatura relevante para presentar el estado del arte sobre temas como el cambio climático, Modelos de Circulación Global (GCMs), metodologías de selección de GCMs y escalamiento estadístico de modelos, modelación hidrológica e índices de sustentabilidad hídrica.

En el Capítulo 3 se realiza una caracterización de la zona de estudio, que incluye información geográfica, geomorfológica, climatológica e hidrológica de la isla Rapa Nui. También, se caracteriza la recarga subterránea (oferta) y la demanda hídrica de la región.

En el Capítulo 4 se describe la metodología empleada en esta memoria, enfocándose en la implementación del modelo SUMMA para la evaluación de la oferta de agua. Además, se explican los métodos utilizados para calcular la demanda hídrica, los cuales son fundamentales para establecer los criterios del análisis de sustentabilidad del sistema de abastecimiento de agua de la isla.

En el Capítulo 5 se exponen los principales resultados de la modelación, que incluyen la calibración, el balance hídrico, y los flujos simulados para la isla, tanto para el período histórico (1985-2014), como para el futuro cercano (2030-2059) y lejano (2070-2099). También, se presentan las proyecciones de la demanda hídrica y se analizan los resultados desde el punto de vista de sostenibilidad. A partir de estos resultados, en el Capítulo 6 se presentan las conclusiones y las recomendaciones para futuras investigaciones.

# Capítulo 2: Estado del Arte

## 2.1. Cambio climático

El clima, según la definición de la Organización Meteorológica Mundial (OMM), se entiende como una descripción estadística de las condiciones meteorológicas de cierta zona, en términos de valores medios y su variabilidad espacial y temporal, durante un período típicamente de 30 años. De esta manera, el cambio climático corresponde a una alteración a largo plazo en estas condiciones medias y variables (ECCC, Environment and Climate Change Canada, 2019).

Los cambios climáticos pueden atribuirse a procesos naturales del sistema terrestre, como erupciones volcánicas o variaciones en la radiación solar, así como a factores externos. En particular, las actividades humanas representan la principal causa del cambio climático debido a las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), derivadas del uso insostenible de la energía, los cambios en el uso del suelo, los estilos de vida y los patrones de consumo y producción global (IPCC, Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023).

Estos gases absorben la radiación de onda larga emitida desde la superficie terrestre, lo que resulta en un aumento de la temperatura global (Mitchell, 1989). Asimismo, se anticipan daños relacionados con la naturaleza, como el retroceso de glaciares, el aumento del nivel del mar y alteraciones en el ciclo del agua. Específicamente, se prevén afectaciones en la variabilidad de las precipitaciones en diferentes partes del mundo, lo que tendrá efecto en los regímenes hidrológicos de las cuencas (Chauvin, Planton, Douville, & et al., 2002).

En este contexto, en el año 1988, el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), en conjunto con la OMM, crearon el Panel Internacional de Cambio Climático (IPCC), con el objetivo de proporcionar a los gobiernos información científica que puedan utilizar para desarrollar políticas climáticas que apunten a la adaptación y mitigación de los efectos del fenómeno.

En concreto, el IPCC produce periódicamente informes que evalúan los impactos y riesgos futuros del cambio climático, apoyándose en el trabajo de diversas instituciones de investigación a nivel global que desarrollan Modelos de Circulación General (GCM, por sus siglas en inglés). Estos modelos simulan el clima de la Tierra mediante la resolución de ecuaciones numéricas que caracterizan cómo la materia y energía interactúan en diferentes partes del océano, atmósfera y suelo (NOAA, 2014).

Para generar proyecciones climáticas con estos modelos, se han definido posibles escenarios socioeconómicos futuros denominados: (1) “Reporte Especial sobre Escenarios de Emisiones” (Special Report on Emissions Scenarios, SRES, 2001); (2) Trayectorias de Concentración Representativas (Representative Concentration Pathways, RCP, 2014); y (3) Trayectorias Compartidas de Desarrollo Socioeconómico (Shared Socioeconomic Pathways, SSP, 2021):

**1.Escenarios SRES:** Estos escenarios fueron utilizados por el IPCC en su Tercer y Cuarto Informe de Evaluación (AR3 y AR4, respectivamente; IPCC, 2001; 2007). Los escenarios SRES corresponden a cuatro líneas narrativas que describen diferentes desarrollos en áreas demográficas, sociales, económicas, tecnológicas y ambientales. Como resultado, las simulaciones abarcan una amplia gama de forzantes de GEI, que pueden tener impactos variados.

**2.Escenarios RCP:** Los RCP fueron implementados en el quinto informe de evaluación del IPCC (AR5; IPCC, 2013) como una alternativa a los SRES. Estos escenarios suponen que, dependiendo del comportamiento de la humanidad en cuanto a las concentraciones de emisiones, se generarán distintas perturbaciones en el balance radiativo terrestre. Así, los escenarios con menor y mayor esfuerzo en la reducción de GEI prevén un forzamiento radiativo de 8,5 y 2,6 W/m<sup>2</sup> para el año 2100 (RCP8.5 y RCP2.6, respectivamente). Como resultado, se obtiene un rango de futuros optimistas y pesimistas que producirían aumentos de temperatura global desde 1,0 a 4,0°C en comparación con la situación observada hasta el año 2012 (IPCC, Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013).

**3.Escenarios SSP:** Los escenarios SSP fueron desarrollados como parte del AR6 del IPCC (2023) y representan futuros posibles en función de diferentes combinaciones de variables socioeconómicas y climáticas, que incluyen: población, educación, urbanización, producto interno bruto (PIB), crecimiento económico, tasa de desarrollos tecnológicos, emisiones de GEI y aerosoles, oferta y demanda de energía, cambios en el uso del suelo, entre otras (O'Neill et al., 2016).

Estos escenarios fueron diseñados para trabajar en combinación con los RCPs y, como resultado, se obtuvieron cinco SSPs que definen el nivel de política climática requerida para alcanzar los forzamientos radiativos determinados por los RCPs. La Tabla 2-1 proporciona una breve descripción de cada una de las cinco narrativas de escenarios SSP.

Las combinaciones de SSP y escenarios de forzamiento radiativo varían en función de diferentes niveles de emisiones y políticas climáticas, siendo algunos incompatibles entre sí. Por ejemplo, SSP5, que prioriza el desarrollo de combustibles fósiles, y que por lo tanto establece un mundo con altas emisiones, es incompatible con un escenario de bajo forzamiento (2,6 W/m<sup>2</sup>, por ejemplo). Alcanzar forzamientos menores requeriría políticas

climáticas más estrictas y una mitigación sólida, como las que se proponen para los escenarios SSP1. La Figura 2-1 muestra las combinaciones posibles entre SSP y RCP.

Tabla 2-1: Resumen de las Trayectorias Compartidas de Desarrollo Socioeconómico (SSP). Fuente: (O'Neill et al., 2016).

SSP1	Desarrollo sustentable - tomando el camino verde. Desafíos menores a la mitigación y adaptación.
SSP2	Un camino intermedio. Desafíos medianos de adaptación y mitigación.
SSP3	Rivalidad regional - un camino pedregoso. Desafíos importantes hacia la mitigación y adaptación.
SSP4	Inequidad - un camino dividido. Bajos desafíos hacia la mitigación, importantes desafíos hacia la adaptación.
SSP5	Desarrollo basado en combustibles fósiles - Tomando la autopista. Desafíos importantes de mitigación, leves de adaptación.

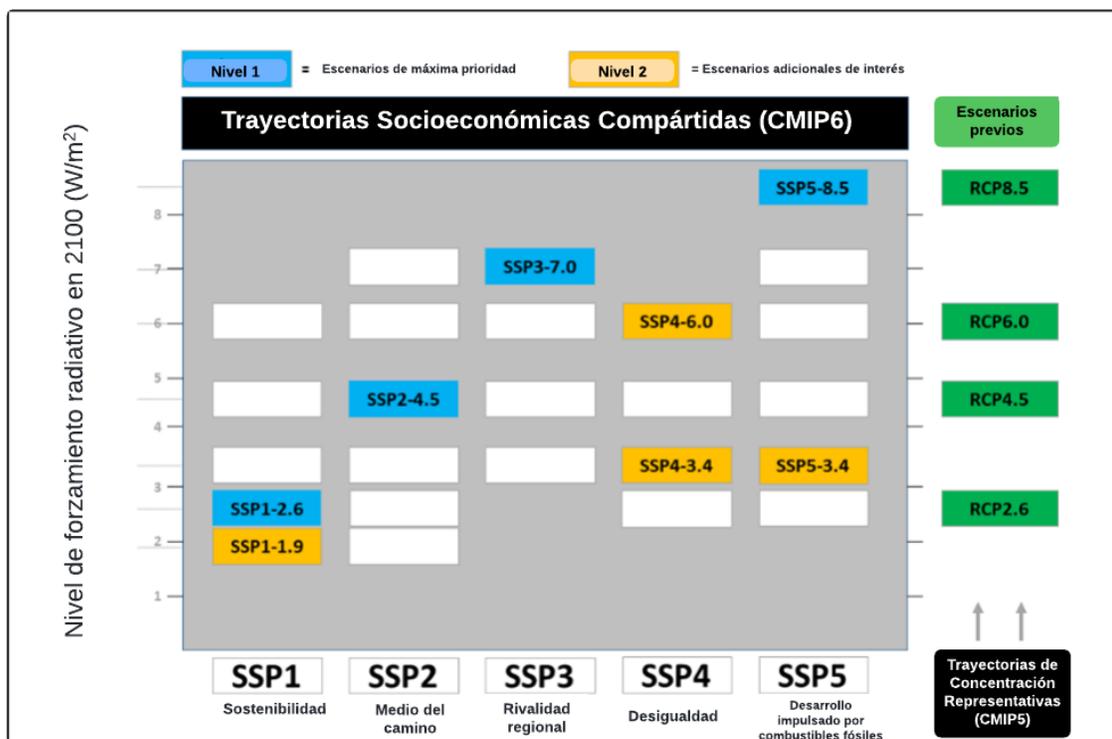


Figura 2-1: Combinaciones de Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP) y forzamientos radiativos (RCP) para el año 2100. Imagen adaptada de O'Neill, et al., 2016.

## 2.2. Modelos de Circulación Global (GCMs)

Un Modelo de Circulación Global simula el clima de la Tierra mediante la resolución de ecuaciones numéricas que caracterizan las dinámicas del océano, atmósfera y suelo. Estos modelos dividen la superficie de la Tierra en una cuadrícula tridimensional de celdas. Los resultados de los procesos simulados en cada celda se transmiten a celdas vecinas para modelar el intercambio de materia y energía a lo largo del tiempo. El tamaño de la celda de la cuadrícula define la resolución horizontal del modelo, y la resolución temporal abarca minutos, horas, días o años (NOAA, 2014).

A continuación, se discuten los métodos de selección de escenarios y modelos y los procesos de escalamiento espacial que se han desarrollado en respuesta a la necesidad de adecuar estas herramientas a las características propias de la escala local.

### 2.2.1. Selección de escenarios y modelos

Utilizar la totalidad de GCMs existentes resulta en un alto costo computacional, por lo cual se requiere escoger aquellos modelos que representen adecuadamente la climatología de la zona de estudio.

Gateño, et al. (2023), por ejemplo, proponen una metodología de selección de GCMs basada en sus desempeños históricos. El estudio se llevó a cabo considerando 27 modelos asociados al CMIP6, y el diagnóstico se realizó en el período 1979-2014 para las series de precipitación y temperaturas extremas. Los resultados permitieron concluir que, considerando la variabilidad espacial del desempeño de los GCMs, la selección de modelos debe incluir, entre sus criterios, la reproducción de (i) ciclo anual; (ii) variabilidad interanual; y (iii) las tendencias observadas en el período histórico.

Por otro lado, en el proyecto Balance Hídrico Nacional (DGA, 2019; 2022) destacan los siguientes criterios empleados en la metodología de selección de GCMs:

a. Respuesta regional a modos globales de variabilidad climática: Se buscó aquellos modelos que representaban adecuadamente fenómenos interanuales como la influencia de El Niño/Oscilación del Sur (ENSO) y el Modo Anular del hemisferio sur (SAM), debido a su influencia en la variabilidad de precipitación en Chile. Cabe mencionar que este criterio aplica principalmente a Chile continental, por lo que no necesariamente refleja de manera precisa la influencia climática en otras regiones, como Rapa Nui, donde los patrones climáticos podrían estar gobernados por otros factores debido a su ubicación en el Pacífico.

b. Sensibilidad climática: Hace referencia a la respuesta global del sistema climático a una cierta forzante externa. Se seleccionaron distintos modelos, con el fin de representar sensibilidades bajas, medias y altas.

c. Cambios regionales. Se evaluó, para cada modelo, los cambios proyectados de temperatura y precipitación. Se seleccionó un conjunto de modelos con impactos diversos.

En línea con lo anterior, es relevante considerar las recomendaciones de Jerez et al. (2024), quienes destacan la importancia de seleccionar modelos climáticos no solo en función de su capacidad para representar la climatología histórica, sino también por su habilidad para reproducir eventos extremos y preservar la señal del cambio climático. Este enfoque integral permite mejorar la calidad de las proyecciones hidrológicas y la toma de decisiones a largo plazo, especialmente en regiones con alta variabilidad climática.

## 2.2.2. Métodos de escalamiento espacial

A pesar de la utilidad de los GCMs para estudiar el cambio climático, estas herramientas operan a grandes escalas espaciales (>100 km), por lo que su aplicabilidad es limitada, pues las características locales o incluso regionales en las variables climáticas superficiales que ofrecen son poco representativas (Rummukainen, 1997). Para refinar la información entregada por los GCMs, se han desarrollado diversos métodos de escalamiento (o “downscaling” en inglés), y que pueden ser dinámicos o estadísticos.

El escalamiento dinámico toma las condiciones de borde de un GCM para forzar un modelo climático regional (RCM por sus siglas en inglés), en donde las propiedades de la atmósfera se calculan en grillas más finas resolviendo ecuaciones termodinámicas y de movimiento. Sin embargo, este proceso tiene un costo computacional significativo. Por otro lado, el escalamiento estadístico evalúa relaciones espaciales y temporales entre variables climáticas de gran escala y locales sobre un período específico de entrenamiento (período histórico), y extienden estas relaciones para proyectarlas en períodos climáticos simulados no observados (clima futuro y clima pasado) (Spak, Holloway, Lynn, & Goldberg, 2007).

Entre los métodos de escalamiento estadísticos se encuentra el Mapeo de cuantiles Delta (QDM, por sus siglas en inglés, Cannon, et al., 2015), que busca preservar los cambios relativos proyectados por el GCM en los cuantiles, al mismo tiempo que corrige sesgos sistemáticos en los cuantiles de la serie modelada con respecto a los valores observados (Cannon, Sobie, & Murdock, 2015). Sin embargo, este algoritmo descuida la dependencia entre variables, por lo cual Cannon (2018) propuso el método Corrección de sesgo de Mapeo Cuantil Multivariado (MBCn, por sus siglas en inglés), que es una generalización multivariada del mapeo de cuantiles. Además de corregir los sesgos utilizando las funciones de distribución acumulada del método QDM, MBCn considera la covariabilidad entre las variables (Cannon A. , 2018).

## 2.3. Modelación hidrológica

Un modelo es una representación simplificada de un sistema del mundo real. Específicamente, un modelo hidrológico simula los procesos de transporte y acumulación de agua de una zona, generalmente una cuenca o unidad de respuesta hidrológica, con el fin de comprender las componentes del ciclo hidrológico y evaluar los impactos del clima y de las propiedades del suelo sobre la hidrología y los recursos hídricos de una región.

Las filosofías de modelación consideran un variado espectro relativo a resolución y complejidad, pero, en principio, todos los modelos deberían reflejar la comprensión sobre la partición de los flujos de agua de un sistema. Algunas clasificaciones de modelos hidrológicos son (Hrachowitz & Clark, 2017):

**1. Simplificación espacial:** Se distinguen los modelos concentrados y distribuidos. Por un lado, los concentrados representan al dominio de interés como una entidad única describiendo respuestas a gran escala que resultan de heterogeneidades a escalas pequeñas. Por otro lado, los distribuidos proveen, en distinto grado, representaciones explícitas de la heterogeneidad natural dentro del dominio del modelo, referidas a distribuciones de parámetros y forzantes meteorológicas.

**2. Simplificación del sistema:** Se distinguen los modelos de base física, que buscan representar explícitamente tantos procesos físicos como sean posible, de los modelos de base conceptual, que proveen una representación matemática simplificada para describir el sistema hidrológico. Estos últimos se basan en parametrizaciones simples que describen una respuesta a gran escala de heterogeneidades a escalas pequeñas.

**3. Estrategia de refinamiento/Escalas:** Existen, por otra parte, los modelos basados en el razonamiento inductivo (bottom-up) que se diferencian de los deductivos (top-down). La primera clasificación busca generar entendimiento por medio de la agregación de elementos individuales del sistema, comenzando desde la microescala, mientras que la segunda clase de modelos genera aprendizaje a partir de observaciones de variables integradas en el sistema, es decir, comenzando desde la macro-escala.

Ante la necesidad de contar con herramientas para comprender fenómenos hidrológicos y predecir almacenamientos y flujos en distintas regiones del mundo, la comunidad científica ha desarrollado numerosos modelos que adoptan distintos enfoques. En el caso particular de Chile insular, por ejemplo, solo se tiene registro de la aplicación del modelo VIC en las últimas dos fases del proyecto “Balance Hídrico Nacional” de la Dirección General de Aguas (DGA, 2022). En dichos estudios, se adoptó un enfoque distribuido, por lo que se utilizó una grilla de resolución espacio-temporal de 0,01° latitud - longitud y diaria, respectivamente, donde se representaron los procesos de evapotranspiración, acumulación y derretimiento de nieve, infiltración y generación de flujo base y escorrentía superficial, principalmente.

### 2.3.1. Modelo hidrológico SUMMA

La Estructura para Unificar Múltiples Alternativas de Modelamiento (SUMMA por sus siglas en inglés; Clark, et al., 2015a; 2015b; 2015c) es un software libre y de código abierto que facilita la configuración de diversas alternativas de modelos hidrológicos de base física. En otras palabras, esta plataforma permite llevar a cabo un análisis sistemático de conceptualizaciones de modelado (hipótesis) del ciclo hidrológico, considerando parametrizaciones de flujo, configuraciones espaciales y técnicas de solución numérica.

SUMMA se basa en un conjunto general de ecuaciones de conservación de masa y energía, que nacen del entendimiento común sobre los flujos dominantes que afectan la evolución temporal de los estados hidrológicos y termodinámicos (ver Figura 2-2). En conjunto con un solucionador numérico común para estas ecuaciones, se constituye el "núcleo estructural" del modelo SUMMA, que puede ser aplicado sobre discretizaciones espaciales concentradas o distribuidas.

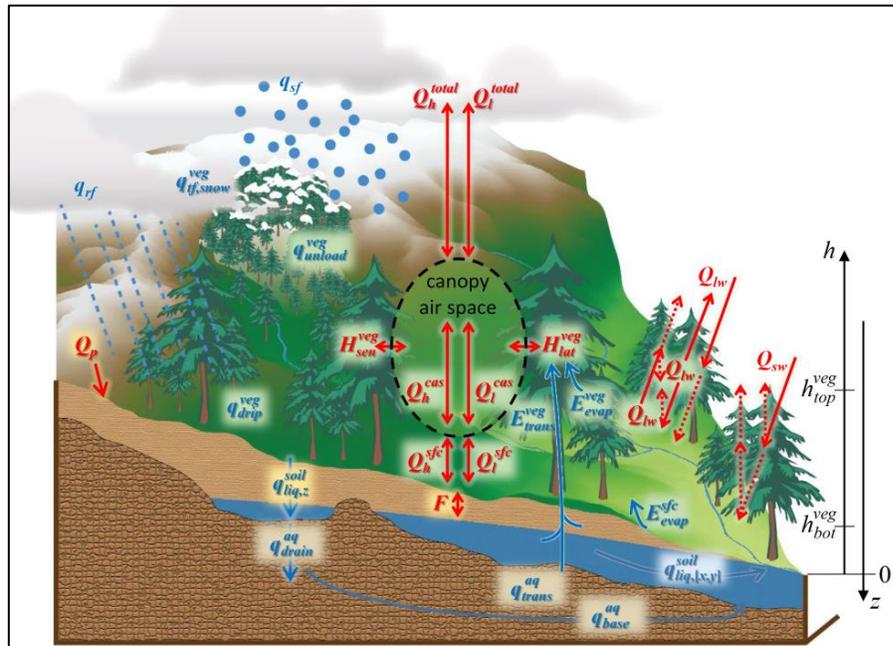


Figura 2-2: Representación conceptual de los procesos físicos dominantes a escala de cuenca. Fuente: (Clark et al., 2015a).

SUMMA ofrece una estructura modular que permite integrar diferentes representaciones de procesos físicos dentro de un conjunto común de ecuaciones de conservación (ver Figura 2-3). Esto permite modelar diversos flujos como, por ejemplo, la redistribución del agua en el suelo, mediante el drenaje por gravedad hasta el flujo subsuperficial. Esta flexibilidad facilita la evaluación sistemática y controlada de distintos procesos físicos que deben ser representados explícitamente en el modelo, permitiendo así abordar diversas filosofías de modelado.

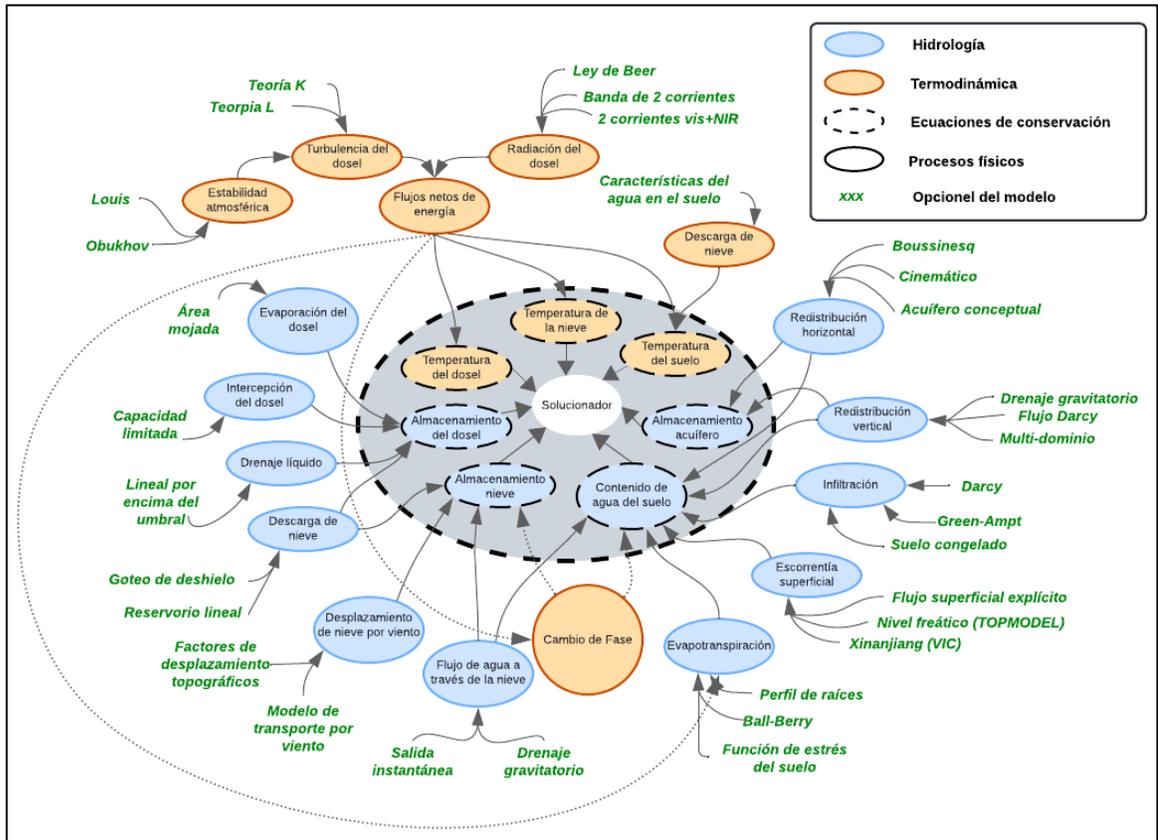


Figura 2-3: Diagrama conceptual de la arquitectura de SUMMA que respalda múltiples opciones de modelos para una variedad de procesos físicos, integrados como parte de un solucionador numérico común.

Fuente: Imagen adaptada de Clark, et al., 2015a.

Cabe mencionar que la implementación de SUMMA tiene limitaciones importantes. Por un lado, la ejecución del modelo se restringe a los flujos de agua y energía mostrados en la Figura 2-3. No incluye, por ejemplo, representaciones explícitas para almacenamiento en depresiones, humedales y lagos. Sin embargo, esto se puede abordar mediante acoplamiento con otros modelos o modificando el código SUMMA.

Por otro lado, SUMMA aproxima el subdominio del suelo como una serie de columnas verticales compuestas por horizontes de suelo superpuestos, que pueden (o no) conectarse lateralmente. Esta característica no permite una representación tridimensional completa del dominio del modelo, lo que resulta en la omisión de procesos detallados en el subsuelo.

## 2.3.2. Índices de eficiencia de modelos

La precisión y confiabilidad de los modelos hidrológicos dependen de su capacidad para representar procesos físicos y de reproducir los datos referenciales (u observaciones) de flujos de la zona de estudio. Para realizar este diagnóstico de desempeño, se utilizan

índices de eficiencia, que son herramientas cuantitativas esenciales en la validación y calibración de modelos hidrológicos.

Tradicionalmente, el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE; Nash & Sutcliffe, 1970) es el criterio que se utiliza para evaluar el desempeño de un modelo. La Ec. 2.1 ilustra el cálculo de este índice, escalado en el intervalo  $[-\infty, 1]$ . NSE = 1 indica una correspondencia perfecta entre la simulación y la referencia; NSE = 0 señala que las simulaciones del modelo tienen la misma capacidad explicativa que la media de las observaciones; y NSE < 0 denota que el modelo es un peor predictor que la media de las observaciones (Knoben, Freer, & Woods, 2019).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^{t=T} (X_{sim}(t) - X_{obs}(t))^2}{\sum_{t=1}^{t=T} (X_{obs} - \overline{X_{obs}})^2} \quad Ec. 2.1$$

Donde T es el número total de pasos de tiempo,  $X_{sim}(t)$  es la variable simulada en el tiempo t,  $X_{obs}(t)$  es la variable de referencia u observada en el tiempo t, y  $\overline{X_{obs}(t)}$  es el promedio de las observaciones.

De acuerdo con la interpretación que se le otorga a este índice, se desprende que la habilidad de la métrica se evalúa según la base comparativa entre las simulaciones y la 'media de las observaciones' (Gupta, Kling, Yilmaz, & Martinez, 2009). Esto supone un problema para validar los modelos, porque el NSE no sería un punto de referencia igualmente representativo para diferentes regímenes de flujo. Por ejemplo, si se evalúan las simulaciones de caudales, la media de las observaciones de esta variable no es representativa de regímenes con una estacionalidad muy marcada (Knoben, Freer, & Woods, 2019).

Para abordar estas deficiencias, se desarrolla el índice de eficiencia de Kling-Gupta (KGE; Gupta, et al., 2009). Esta métrica se basa en una descomposición del NSE en tres componentes constitutivos: correlación ( $r$ ), sesgo de variabilidad ( $\alpha$ ) y sesgo de media ( $\beta$ ), presentados en las ecuaciones 2.2, 2.3 y 2.4.

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \quad Ec. 2.2$$

$$\alpha = \frac{\sigma_{sim}}{\sigma_{obs}} \quad Ec. 2.3$$

$$\beta = \frac{\mu_{sim}}{\mu_{obs}} \quad Ec. 2.4$$

Donde  $\sigma_{obs}$  es la desviación estándar de las observaciones,  $\sigma_{sim}$  es la desviación estándar de las simulaciones,  $\mu_{sim}$  es la media de la simulación, y  $\mu_{obs}$  es la media de la observación.

Al igual que NSE, el KGE se encuentra escalado en el intervalo  $[-\infty, 1]$ , sin embargo, no son criterios comparables, porque se diferencian en su formulación matemática y, por lo tanto, en el enfoque que adoptan para evaluar el desempeño de un modelo (Knoben, Freer, & Woods, 2019). La eficiencia de Kling-Gupta considera múltiples criterios en la evaluación y, a diferencia del NSE que se centra en la capacidad del modelo para reproducir la magnitud de las observaciones (sesgo), el KGE considera tanto el sesgo como la variabilidad en los datos, que incluye la revisión de la relación entre las desviaciones estándar ( $\alpha$ ) y de los promedios ( $\beta$ ) de las simulaciones versus las referencias.

En términos prácticos, tanto el **NSE** como el **KGE** permiten clasificar el rendimiento de un modelo de acuerdo con valores establecidos en la literatura. Valores de ambos índices superiores a 0.75 se consideran "excelentes", entre 0.65 y 0.75 "buenos", entre 0.5 y 0.65 "aceptables", y menores a 0.5 "malos" (Moriasi et al., 2007). También, Towner et al. (2019) propusieron cuatro categorías de referencia para clasificar los valores de eficiencia Kling-Gupta (KGE). Estas son: "Bueno" ( $KGE \geq 0.75$ ), "Intermedio" ( $0.75 > KGE \geq 0.5$ ), "Deficiente" ( $0.5 > KGE > 0$ ), y "Muy deficiente" ( $KGE \leq 0$ ).

Asimismo, para analizar el desempeño de un modelo hidrológico, se utilizan métricas de evaluación como el coeficiente de determinación ( $R^2$ ; Ec. 2.5), el Error Cuadrático Medio (RMSE; Ec. 2.6), el sesgo (PBIAS; Ec. 2.7) y el índice de Nash-Sutcliffe (NSE; ver Ec. 2.1).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad \text{Ec. 2.5}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2} \quad \text{Ec. 2.6}$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} * 100 \quad \text{Ec. 2.7}$$

Donde:

- $\bar{O}$ : Promedio de los valores observados.
- $O_i$ : Valores observados.
- $S_i$ : Valores simulados.
- $n$ : Número de observaciones.

## 2.4. Estudios previos en isla Rapa Nui

A continuación, se presenta una revisión de publicaciones recientes sobre las principales problemáticas que envuelven a la isla Rapa Nui en términos de seguridad hídrica, que incluye vulnerabilidad en su acuífero e impactos negativos del cambio climático bajo distintos escenarios. Además, se estudia el registro de aplicaciones de modelos hidrológicos sobre la isla.

En primer lugar, destaca la memoria de Milad, C. (2010), donde se evaluó el uso y disponibilidad de aguas subterráneas en la isla Rapa Nui. El estudio plantea que el agua almacenada en el acuífero de la isla significa la principal fuente de abastecimiento para sus habitantes. Sin embargo, es vulnerable a la contaminación provocada por aguas servidas, vertederos, centros de acumulación de combustibles y actividades agrícolas desarrolladas en la zona. El mapa de vulnerabilidad que resulta de la investigación demuestra que la situación en la isla es crítica, pues las principales fuentes contaminantes se ubican sobre suelos considerablemente permeables, lo que aumenta el riesgo de contaminación del acuífero. Por este motivo, se concluye la necesidad de desarrollar un plan de gestión para la protección del recurso hídrico en la isla Rapa Nui.

Además de la vulnerabilidad intrínseca del sistema hidrológico de la isla, existen publicaciones que advierten sobre los impactos del cambio climático en Rapa Nui. Quilliam et al. (2014) evaluaron estos impactos proyectados para 2100, considerando el escenario SRES más desfavorable. Los resultados obtenidos indicaron que toda la infraestructura portuaria estará en riesgo de inundación por mareas a finales de siglo. Se prevé también que la recesión de la línea costera de las playas, junto con el aumento del nivel del mar, resulte en que una de las dos playas de la isla quede permanentemente inundada. Además, se identificó que la seguridad del suministro de agua presenta un riesgo grave debido a los cambios en la precipitación y evaporación.

Luego, Gatica y Toro (2021) contribuyeron al entendimiento de los impactos del cambio climático sobre la isla con su estudio de evaluación de frecuencia de ocurrencia de sequías hidrológicas, donde se utilizaron 75 GCMs hasta fines de siglo bajo dos escenarios RCP, 4.5 y 8.5. Los resultados obtenidos indicaron un aumento en la frecuencia de eventos de sequía para ambos RCP, siendo más graves para el RCP 8.5. El estudio destaca que “para un período móvil de 48 meses y RCP 8.5, las sequías extremas históricas de rara ocurrencia (1/30) pasarían a ser relativamente frecuentes (1/4) en el futuro cercano (2021-2060) y ser la condición más frecuente ( $>1/2$ ) en el futuro lejano (2061-2100)” (Gatica & Toro, 2021).

Más recientemente, Toro et al. (2023) evaluaron el potencial efecto del cambio climático sobre la precipitación máxima y Máxima Probable (PMP) para 24 y 72 horas utilizando 31 GCMs bajo dos escenarios SSP, 2-4.5 y 5-8.5. En este caso, los resultados obtenidos indicaron que los modelos de cambio climático son consistentes en proyectar

aumentos de la precipitación máxima y PMP, siendo el escenario SSP 5-8.5 el que muestra aumentos más severos en relación con el SSP 2-4.5. Sin embargo, el estudio destaca la incertidumbre asociada a los escenarios y, por lo tanto, recomiendan evaluar más de un escenario de concentraciones y la mayor cantidad de modelos posibles, pues ello permitiría caracterizar la dispersión de las proyecciones y tomar decisiones en base al nivel de riesgo que se considere adecuado.

Con respecto a la implementación de modelos hidrológicos en la isla Rapa Nui, solo se tiene un único antecedente: DGA (2019), en el marco del Balance Hídrico Nacional (BH4), empleó el modelo VIC para comprender los impactos de los GCMs CCSM4, CSIRO-Mk3-6-0, IPSL-CM5A-LR y MIROC-ESM, bajo el escenario RCP8.5. Luego, en la última actualización del mismo proyecto (BH5; DGA, 2022), se actualizó el producto grilla de forzantes climáticas que se había generado para el BH4.

De este modo, los resultados de las publicaciones incluyeron:

i) Producto grillado de 1 [km] con información meteorológica y de flujos verticales. Esta cuadrícula se generó a partir de la utilización de diversas fuentes satelitales y modelos estadísticos para distribuir espacialmente la precipitación y temperatura registrados en la estación Mataverí. Se obtuvo una grilla con un marcado gradiente altitudinal para precipitaciones y temperaturas.

ii) Los resultados obtenidos del modelo VIC muestran que, en el periodo 1985-2015, las precipitaciones promedio en la isla alcanzan valores de 1293 [mm], las cuales se reparten en un 40% en forma de evapotranspiración y un 60% de escorrentía. La escorrentía superficial es escasa y un 82% de ella se transforma en recarga.

iii) Los resultados de la modelación en el período 2030-2060, muestran que la isla experimentará una disminución marginal en sus montos de precipitación anual (menor a 1%), pero la temperatura aumentará en promedio 1°C, lo cual aumentará el potencial evapotranspirativo en la isla, aproximadamente 12% más con respecto a su valor histórico en el periodo 1985-2015. La escorrentía disminuiría un 8% y, con ello, se afectará directamente la tasa de recarga en la isla, la cual disminuiría, también, en un 8%.

## 2.5. Índices de sustentabilidad hídrica

Loucks (1997) definió la sustentabilidad hídrica, o de los sistemas de recursos hídricos, como "aquellos diseñados y gestionados para contribuir plenamente a los objetivos de la sociedad, tanto en el presente como en el futuro, manteniendo su integridad ecológica, ambiental e hidrológica". En este sentido, es importante tener conocimiento sobre la sustentabilidad hídrica de los sistemas locales, puesto que permite identificar los desafíos presentes y proyectados y, con ello, generar políticas que en la medida de lo posible

puedan satisfacer los requerimientos actuales y futuros (Sandoval-Solis, McKinney, & Loucks, 2011).

Para evaluar la sustentabilidad hídrica, se emplean índices diseñados para cuantificar el estado de sostenibilidad del agua. Estos índices consideran una variedad de factores, incluida la disponibilidad de datos, las características socioeconómicas y ambientales específicas de cada región, así como las necesidades de los usuarios de agua (Juwana, Muttil, & Perera, 2012). A lo largo del tiempo, se han desarrollado diversos índices de sostenibilidad hídrica con el objetivo de conciliar las diferentes interpretaciones de este concepto. Entre estas métricas se destaca el Índice de Sostenibilidad (SI), elaborado por Sandoval-Solis et al. (2011).

El índice SI es una extensión del índice de sustentabilidad propuesto por Loucks (1997), con mejoras en su estructura, escala y contenido para hacerlo más flexible y ajustable a los requisitos de cada cuenca (Sandoval-Solis, McKinney, & Loucks, 2011). Los autores propusieron la Ecuación 2.8 para el i-ésimo uso de agua. Este índice se definió como un promedio geométrico de M criterios de rendimiento ( $C_m^i$ ) para todos los usuarios de agua.

$$SI^i = \left[ \prod_{m=1}^M C_m^i \right]^{1/M} \quad \text{Ec. 2.8}$$

Sandoval-Solis, et al. (2011) proponen cuatro criterios de rendimiento: confiabilidad (*Rel*), resiliencia (*Res*), vulnerabilidad (*Vul*) y déficit máximo (*Max. Def*), obteniéndose la Ecuación 2.9 para el índice SI.

$$SI^i = [Rel^i * Res^i * (1 - Vul)^i * (1 - Max.Def)^i]^{1/4} \quad \text{Ec. 2.9}$$

Para comprender cada componente, primero se debe definir el concepto Déficit de agua ( $D_t$ ) que, para cada período de tiempo t, se calcula como:

$$D_t^i = \begin{cases} Demanda_t^i - Oferta_t^i, & Demanda_t^i > Oferta_t^i \\ 0, & Demanda_t^i \leq Oferta_t^i \end{cases} \quad \text{Ec. 2.10}$$

Donde  $Demanda_t^i$  es la demanda de agua para el i-ésimo uso y  $Oferta_t^i$  es la oferta suministrada al uso i en el tiempo t.

La confiabilidad,  $Rel^i$ , se considera como el porcentaje de tiempo en que la demanda de agua se suministra completamente, es decir, el número de veces que  $D_t^i = 0$  ( $N_{(D_t^i=0)}$ ), sobre el número total de pasos de tiempo N. La Ecuación 2.11 muestra el cálculo de esta componente, restringida al rango [0,1].

$$Rel^i = \frac{N_{(D_t^i=0)}}{N} \quad Ec. 2.11$$

La resiliencia,  $Res^i$ , es la probabilidad de que un período exitoso siga a un período de falla, es decir, el número de veces que  $D_t^i = 0$  sigue a  $D_t^i > 0$ , para todos los períodos de falla (número de veces donde  $D_t^i > 0$ ). La Ecuación 2.12 muestra el cálculo de la resiliencia, también restringida al rango [0,1].

$$Res^i = \frac{\text{Número de tiempos } D_t^i = 0 \text{ después de } D_t^i > 0}{\text{Número de tiempos } D_t^i > 0} \quad Ec. 2.12$$

La vulnerabilidad,  $Vul^i$ , se define como el valor esperado de los déficits, que es la suma de los déficits,  $D_t^i$ , dividida por el número de veces que ocurre un período de déficit,  $D_t^i$ , para el i-ésimo uso de agua. Para hacerlo adimensional, se divide por la demanda anual de agua,  $Demanda_t^i$ , para el i-ésimo uso (ver Ecuación Ec. 2.63).

$$Vul^i = \frac{\sum_{D_t^i > 0} D_t^i}{\frac{\text{Número de veces } D_t^i > 0}{\sum_{t=1}^{t=N} Demanda_t^i}} \quad Ec. 2.63$$

El déficit máximo,  $Max.Def^i$ , si ocurre, es el peor caso de déficit anual, es decir, máximo  $D_t^i$ , para el i-ésimo uso del agua. Se obtiene un déficit máximo adimensional dividiendo el déficit anual máximo por la demanda anual de agua según la Ecuación 2.14, donde  $D_{Anual}^i$  es el déficit anual considerando intervalos de tiempos mensuales.

$$Max.Def = \frac{\max(D_{Anual}^i)}{\sum_{t=1}^{t=12} Demanda_t^i} \quad Ec. 2.74$$

Con esto, el índice SI, para cada uso, permite evaluar diversas componentes relacionadas a la sustentabilidad hídrica. Para comparar grupos de usos de agua, se definió la sustentabilidad por Grupo (SGI) como un promedio ponderado de los índices de sustentabilidad (Loucks, 1997; Sandoval-Solis, McKinney, & Loucks, 2011). La Ecuación 2.15 se utiliza para calcular la sustentabilidad para el grupo  $k$  con usos de agua del 1 al  $j$  pertenecientes a este grupo.

$$SGI^k = \sum_{\substack{i=j \in k \\ i=1 \in k}} w^i * SI^i \quad Ec. 2.15$$

La ponderación  $w^i$ , correspondiente al peso relativo asignado al uso  $i$ , puede ser entendida como la razón entre la demanda del uso  $i$  sobre la demanda total del grupo  $k$ .

En resumen, este índice se calcula considerando cuatro criterios fundamentales para la gestión del agua: confiabilidad, resiliencia, vulnerabilidad y déficit máximo. Cada criterio se evalúa a lo largo de períodos específicos mediante indicadores cuantitativos y se combina usando un promedio geométrico para obtener el SI de cada usuario de agua. Posteriormente, el SGI, calculado como un promedio ponderado de los índices SI según las demandas relativas de los usos, proporciona una visión general de la sustentabilidad del sistema, facilitando la comparación entre diferentes políticas de gestión del agua o escenarios hidroclimáticos. El SGI varía entre 0 y 1, donde un valor más cercano a 1 indica una mayor sustentabilidad del sistema evaluado con respecto a los criterios considerados, los cuales pueden ser analizados individualmente.

# Capítulo 3: Caracterización zona de estudio

## 3.1. Antecedentes generales

La zona de estudio corresponde a la isla Rapa Nui (164 km<sup>2</sup>), ubicada en el océano Pacífico (27°90''O y 109°27''S), a una distancia aproximada de 3.700 kilómetros de la costa de Chile. En cada uno de los vértices del territorio, se encuentran las zonas de mayor elevación, siendo el vértice Note (Terevaka) el punto más alto con una cota de 507 m.s.n.m. (DGA, 2010). También posee dos estaciones meteorológicas, Mataveri y Vaitea, que cuentan con información desde los años 1954 y 2012, respectivamente.

Según el Catastro de uso de suelo y vegetación (2022), el 77% del territorio corresponde a Praderas y Matorrales, el 11% a Terreno Agrícola, el 7% a Bosques, y el 3% a Zona Urbana (ver Figura 3-1, panel c). Destaca también la importante presencia de limo arcilloso arenoso en la zona, suelo altamente permeable que produce la ocurrencia de reservas subterráneas (ver Figura 3-1, panel d).

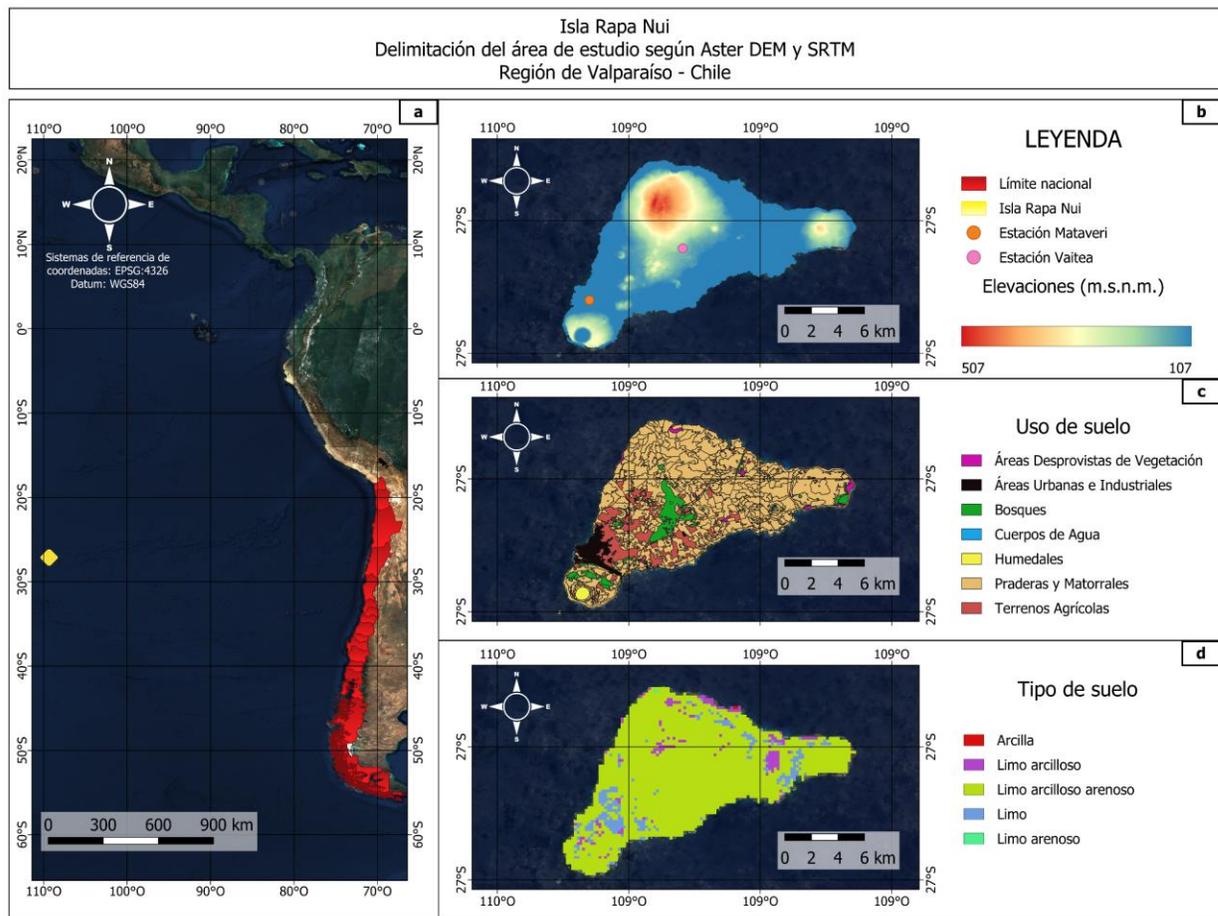


Figura 3-1: Mapa con la ubicación geográfica (a), rango de elevaciones (b), y uso (c) y tipo de suelo (d) de la isla Rapa Nui.

También, la geomorfología de origen volcánico y de alta permeabilidad que facilitan la percolación a través de fracturas de rocas (Muñoz, 2004) produce la ausencia de flujos superficiales permanentes, y las reservas subterráneas se encuentran a grandes profundidades, lo que dificulta la extracción del recurso. Se cuenta además con una gran cantidad de pozos, pero debido a infiltraciones salinas entre los cursos subterráneos y el mar, se han generado empeoramientos en la calidad del agua (CIREN, 2021).

## 3.2. Información meteorológica

DGA (2022) generó un conjunto de datos meteorológicos distribuidos para la isla Rapa Nui. Esta memoria utiliza dicho conjunto como fuente de información. A continuación, se detallan los datos proporcionados por este producto y las observaciones de la estación Mataveri.

Por un lado, en el período 1985-2014 el promedio de las celdas de la grilla del BH5 indican una precipitación media anual de 1.300 mm y temperatura media anual de 21°C. También muestra una variación estacional moderada, con mayores precipitaciones entre los meses abril y septiembre. Para la precipitación, la distribución espacial de esta variable muestra un gradiente con menores cifras cerca de la estación, y siendo hasta dos veces lo observado en Mataveri en el lado este de la isla. La temperatura muestra zonas con altos registros entorno a Mataveri y también en el vértice Este del territorio (Figura 3-2).

Por otro lado, las observaciones de la estación meteorológica Mataveri indican una precipitación media anual cercana a los 1.200 mm, con una variación estacional moderada, y una temperatura media anual de 21°C, similar a los resultados anteriores (ver Figura 3-2), sin embargo, se observa que el producto grillado sobrestima, en general, los registros de precipitación de la estación Mataveri.

Los regímenes estacionales que señalan ambas fuentes de información, y la distribución espacial de las variables hidroclimáticas en la isla, están influenciados por la confluencia de tres regímenes climáticos del Pacífico identificados por zonas, los cuales corresponden a la *zona de convergencia inter-tropical del Pacífico Sur*, determinando una alta temperatura superficial del mar (TSM) y precipitación intensa; también se tiene la *zona bajo la influencia del Anticiclón del Pacífico Sur*, el cual mantiene una baja TSM y precipitación; y por último se encuentra la *zona de inestabilidad baroclínica*, la cual aumenta la intensidad de las precipitaciones en el invierno austral (DGA, 2019).

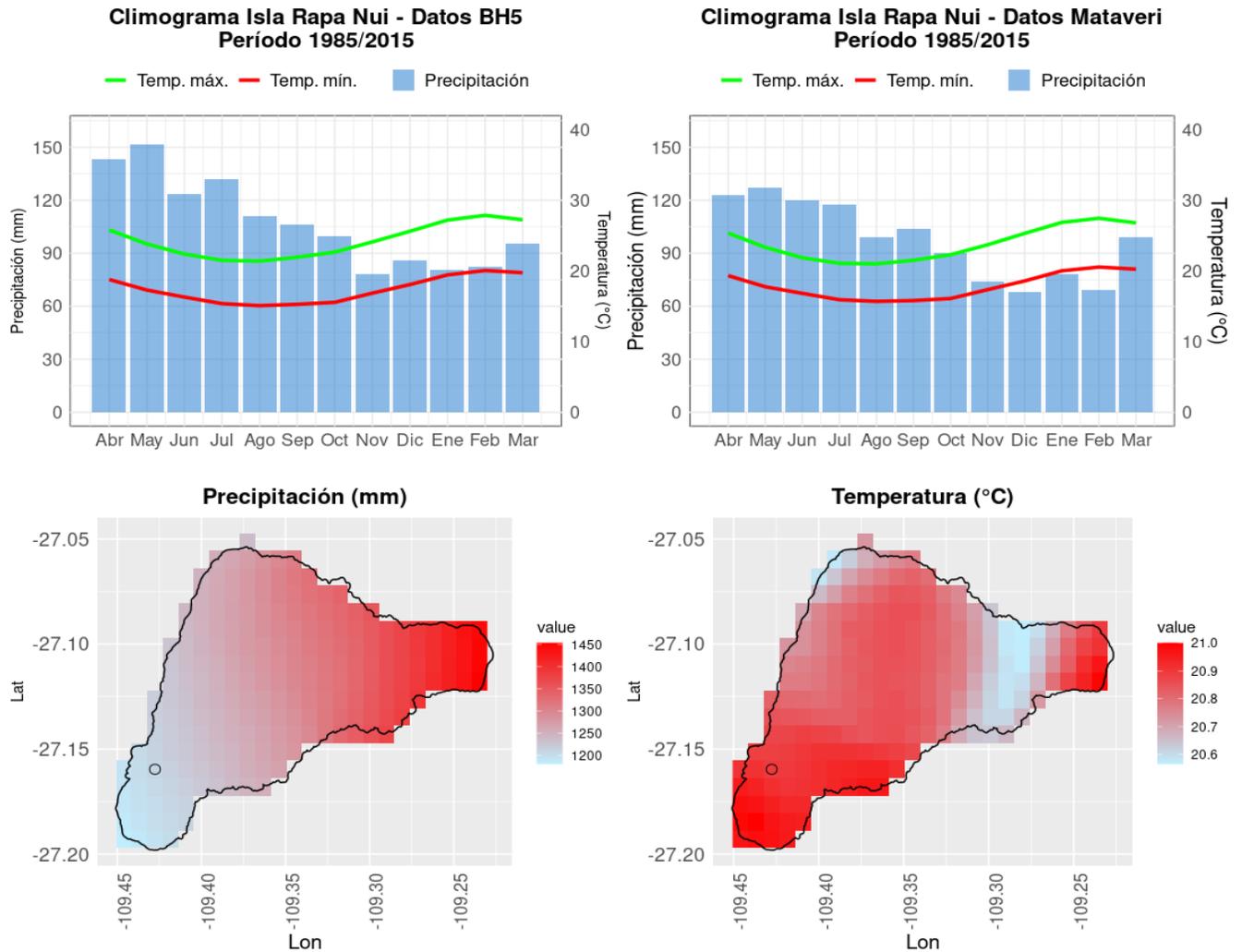


Figura 3-2: En panel superior, se muestra la variación estacional de precipitación y temperatura en la isla Rapa Nui, según el producto grillado del BH5 (izq.) y la estación Mataveri (der.). El panel inferior presenta la distribución espacial de precipitación y temperatura del producto grillado. El círculo negro indica la ubicación de la estación Mataveri.

### 3.3. Caracterización de la recarga subterránea

La revisión bibliográfica revela que la caracterización de la recarga subterránea en la isla Rapa Nui está marcada por una significativa incertidumbre. Inicialmente, la recarga natural del agua ocurre a través de la infiltración de agua lluvia. Adicionalmente, existe una recarga incidental, en menor escala, proveniente de la infiltración de agua que se fuga desde el sistema de distribución municipal de agua en Hanga Roa. Según estimaciones de la Sociedad Agrícola y Servicios Isla de Pascua (SASIPA), la filtración en dicho sistema oscila entre un 30% y 35% del agua bombeada, equivalente a aproximadamente 10,98 y 12,81 L/s. Sin embargo, debido a que Hanga Roa está ubicada en una gradiente inferior a

los pozos, esta recarga inducida no contribuye significativamente al campo de pozos (DGA, 2023).

De este modo, los cálculos de recarga varían ampliamente y, en general, se basan en porcentajes de precipitación o modelos hidrogeológicos. Algunos estudios relevantes son:

- **Álamos y Peralta (1992)** concluyeron que la recarga promedio anual es de aproximadamente 272 mm, o 3.170 L/s. Por su parte, **Matus (1994)** estimó que la recarga equivaldría al 80% de las precipitaciones.
- **Pincheira (2003)** estimó una recarga por precipitación de aproximadamente 350 mm/año, o 1.700 L/s, concentrada en zonas de la isla por debajo de los 300 metros de altura.
- **Herrera y Custodio (2008)** calcularon que la recarga varía entre 300 mm/año en zonas costeras de baja altitud y 400 mm/año en zonas más altas, representando un 27% de las precipitaciones, equivalentes a caudales promedio de entre 1.585 y 2.060 L/s.
- **DGA (2010)**, en su estudio *Caracterización hidrogeológica de la Isla de Pascua*, indicó que la infiltración hacia el acuífero podría estimarse entre un 10% y 20% de la precipitación, lo cual corresponde a un rango de 641-1.282 L/s, utilizando porcentajes similares a estudios en el continente.
- **Montgomery & Associates (2011)**, basándose en Herrera y Custodio (2008), estimaron que la recarga anual promedio del acuífero se sitúa entre 3.200 y 4.700 L/s.
- Finalmente, el *Indicador Hídrico Para la Capacidad de Carga (DGA, 2023)* considera que la recarga del acuífero depende de un coeficiente de recarga del 29,5%, con una reserva estimada de 16 Mm<sup>3</sup>.

Por otro lado, el *Modelo Hidrogeológico de la Isla de Pascua* (Schlumberger Water Services, 2013) compila estudios previos y propone un rango de recarga entre 25% y 34% de las precipitaciones. Más recientemente, en el proyecto del *Balance Hídrico Nacional*, se proyecta una disminución de aproximadamente 50 mm en la recarga promedio anual durante el periodo 2030-2050 en comparación con el periodo histórico, para un promedio de los cuatro modelos de cambio climático evaluados. En el período histórico la recarga se estimó en aproximadamente un 50% de la precipitación (i.e., ~600 mm/año).

### 3.4. Caracterización de la demanda hídrica

En la isla Rapa Nui, los principales usuarios del recurso hídrico incluyen la población residencial, flotante y pecuaria. La población residencial abarca tanto a los habitantes

urbanos como rurales; la población flotante se compone de turistas que visitan la isla; y la población pecuaria se refiere a bovinos y equinos (DGA, 2023).

Por cada uso del agua, se identifica su dotación, población y pérdidas:

1. Según los Censos de Vivienda y Urbanismo, la población residente para el año 2017 es de 7.750 habitantes. En la Tabla 3-1 se resume el número de habitantes registrados en la isla en los últimos Censos.

Por otro lado, según informa SASIPA, para la demanda de agua potable de zonas urbanas (2019) de la isla, la dotación es 242,7 litros por habitante al día. Además, existen pérdidas de distribución de un 45 por ciento. La dotación de agua del sector rural se basa en los parámetros del Manual Criterios de Diseño APR de la DOH 2019, 120-150 (l/hab/día) y pérdidas del 20%. En este caso, se considera una dotación de 150 (l/hab/día).

*Tabla 3-1: Evolución de la población residente en la isla Rapa Nui según los Censos de Vivienda y Urbanismo de 1982, 1992, 2002 y 2017.*

Censo	Población residente
1982	1.936
1992	2.764
2002	3.791
2017	7.750

2. Según informes estadísticos de SERNATUR, la cantidad anual de turistas extranjeros y nacionales que ingresan anualmente a isla es, en general, del orden de 100.000 pasajeros. En la Tabla 3-2 se muestra la evolución del turismo en Rapa Nui, desde el año 2012 hasta el 2020. Se descartan los años 2021 y 2022 por el cierre temporal de la isla debido a la pandemia COVID-19.

La estadía promedio de los turistas es de 5,5 días por turista, y se considera que su dotación es igual a 242,7 (L/hab/día), que corresponde al de la demanda de agua potable de zonas urbanas.

*Tabla 3-2: Evolución de la población flotante en la isla Rapa Nui según los informes estadísticos del SERNATUR, para el período 2012-2020.*

Censo	Turistas
2012	88.709
2013	86.622
2014	90.892
2015	102.956
2016	119.212
2017	129.732

2018	140.937
2019	159.772
2020	39.559

3. Para los años 1997 y 2007, los Censos Agropecuarios registraron una población de 3,198 y 2,951 animales, respectivamente. Moba (2011) reportó un aumento significativo, censando un total de 6,221 animales (ver Tabla 3-3).

Según el informe "Estimación de la demanda actual, proyecciones futuras y caracterización de la calidad de los recursos hídricos de Chile" (DGA, 2017), se estima que la demanda diaria de agua es de 45 litros por animal para los equinos y un promedio de 36,9 litros por animal para los bovinos.

*Tabla 3-3: Evolución de la población pecuaria (bovinos y equinos) de la isla Rapa Nui según los Censos de 1997, 2007 y 2011.*

Censo	Población pecuaria	
	bovinos	equinos
1997	2.576	622
2007	2.306	645
2011	3.860	2.361

De este modo, en el Indicador Hídrico Para la Capacidad de Carga (DGA, 2023) se estima una demanda total de 2 Mm<sup>3</sup>/año aproximadamente, para el año 2023.

# Capítulo 4: Metodología

La metodología implementada en esta memoria se esquematiza en la Figura 4-1, donde: i) se recopila información meteorológica y geomorfológica de la zona para forzar el modelo hidrológico SUMMA; ii) se construye el modelo con el fin de determinar la oferta hídrica de la isla, mediante la variable de recarga del acuífero; iii) se calcula la demanda hídrica y se proyecta mediante ajustes de datos históricos, y iv) a partir del déficit hídrico, se estudia la sustentabilidad del sistema de agua de la isla a través de los conceptos de confiabilidad, resiliencia y vulnerabilidad.

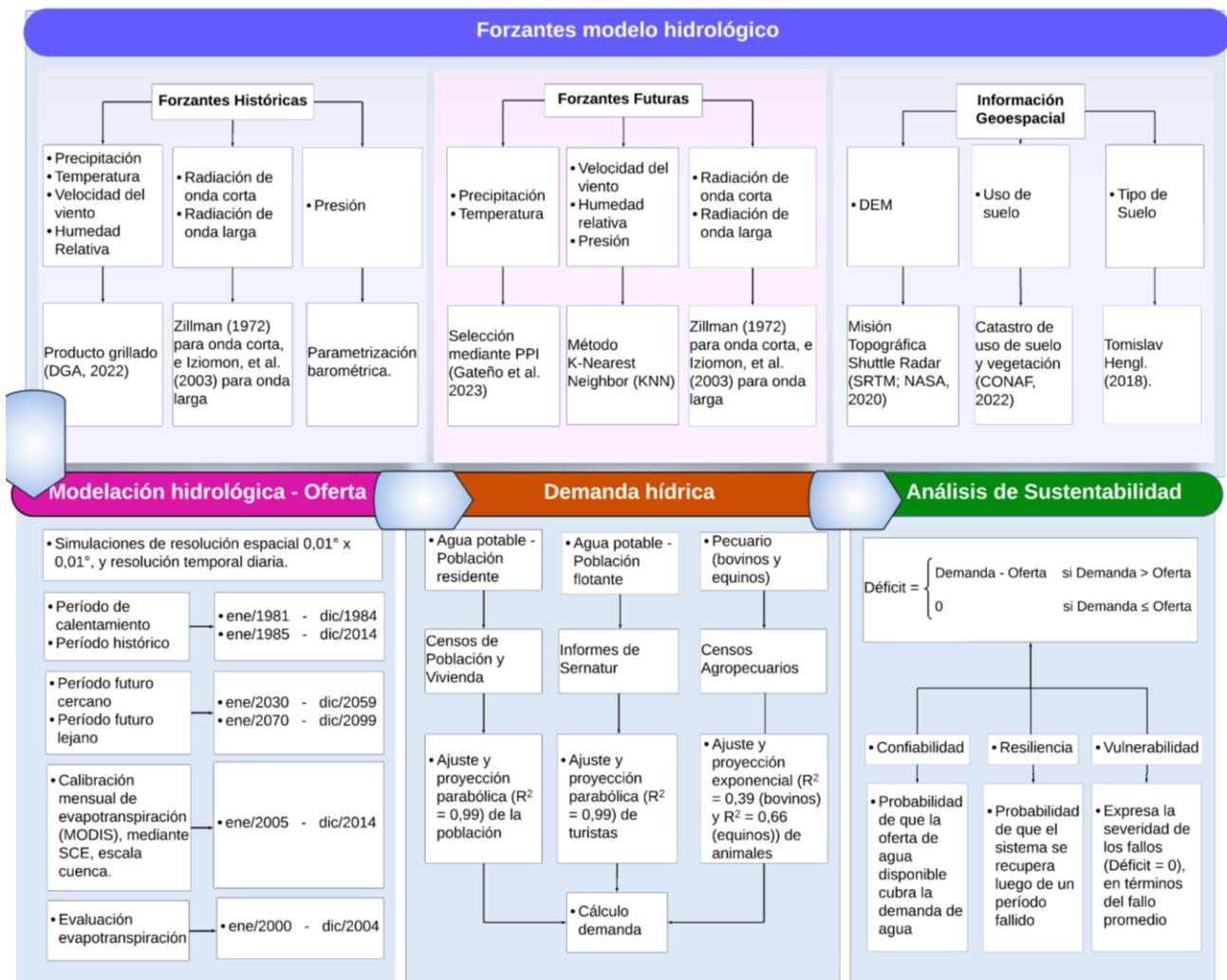


Figura 4-1: Diagrama de flujo de la metodología empleada en el presente trabajo.

## 4.1. Determinación de la oferta hídrica

### 4.1.1. Forzantes meteorológicas

Para implementar el modelo SUMMA y estimar la oferta hídrica de la isla Rapa Nui, se requieren siete forzantes meteorológicas: Precipitación, temperatura, presión, velocidad del viento, humedad específica y radiación de onda corta y larga.

A continuación, se describe el procedimiento para obtener estas variables a escala diaria y distribuidas en el espacio, tanto para el período histórico como futuro.

#### 4.1.1.1. Período histórico (1985 – 2014)

Primero, se descarga el producto de forzantes climáticas del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2022), que proporciona datos diarios de precipitación, temperatura media, velocidad del viento y humedad relativa, con una resolución espacial de  $0,01^\circ \times 0,01^\circ$  latitud-longitud, disponible desde enero de 1981 hasta diciembre de 2017.

Para obtener las forzantes faltantes, se utilizan distintas parametrizaciones propuestas en la literatura. Para el caso de la presión, en cada celda se emplea la fórmula barométrica (Lente & Ósz, 2020), que describe cómo cambia la presión atmosférica con la elevación (Ec. 4.1).

$$P_{i,j} = P_{stand} \times \left( \frac{1 + Lb \times Elevation_{i,j}}{T_{stand}} \right)^{Mg \times g / Rg \times Lb} \quad Ec. 4.1$$

Donde:

- $P_{stand}$  (Pa): Presión estándar al nivel del mar.
- $T_{stand}$  (K): Temperatura estándar al nivel del mar.
- $Mg$  ( $\text{kg mol}^{-1}$ ): Masa molar del aire de la Tierra.
- $Rg$  ( $\text{J mol}^{-1}\text{K}^{-1}$ ): Constante universal del gas.
- $g$  ( $\text{m s}^{-2}$ ): Aceleración gravitacional.
- $Lb$  ( $\text{K m}^{-1}$ ): Tasa de cambio atmosférico.

Para calcular la humedad específica de cada celda, primero se determina la presión de vapor de saturación a partir de la temperatura y la humedad relativa del aire utilizando la Ecuación de Tetens, (Ec. 4.2). Finalmente, la humedad específica se obtiene considerando la proporción entre la presión de vapor actual y la presión atmosférica total (Ec. 4.3).

$$e^* = 0.611 \times \exp\left(17.3 * \frac{T_{air}-273.16}{T_{air}-273.16 + 237.3}\right) \times RelHum \quad Ec. 4.2$$

$$q = 0.622 * \frac{e^*}{\left(\frac{Presión}{1000}\right) - 0.378 \times e^*} \quad Ec. 4.3$$

Donde:

- $e^*$  (kPa): Presión de vapor en saturación.
- $T_{air}$  (K): Temperatura del aire.
- $RelHum$  (-): Humedad relativa del aire.
- $Presión$  (Pa): Presión atmosférica.

Las radiaciones de onda corta y larga se calculan mediante las parametrizaciones propuestas por Zillman (1972) e Iziomon, et al. (2003), respectivamente, que dependen de factores como la temperatura, humedad relativa, presión, elevación, y aspectos geomorfológicos de cada píxel. Las ecuaciones de cada método se detallan a continuación:

#### Radiación de onda corta

$$SWR = S_0(1 - \alpha) \cdot \cos(\theta) \cdot T \quad Ec. 4.4$$

Donde:

- $SWR$  ( $W/m^2$ ): Radiación de onda corta que llega a la superficie terrestre.
- $S_0$  ( $W/m^2$ ): Constante solar (la radiación solar que llega al tope de la atmósfera, típicamente alrededor de  $1361 W/m^2$ ).
- $\alpha$  (-): Albedo de la superficie.
- $\theta$  (radianes o grados): Ángulo cenital solar (grados o radianes), usado para calcular el coseno, que es adimensional.
- $T$  (-): Factor de transmisión atmosférica.

#### Radiación de onda larga

$$LWR = \sigma T_a^4 (\epsilon_c + (1 - \epsilon_c) \cdot N^2) \quad Ec. 8$$

Donde:

- $LWR$  ( $W/m^2$ ): Radiación de onda larga incidente.
- $\sigma$ : Constante de Stefan-Boltzmann ( $5,67 \times 10^{-8} W/m^2K^4$ )
- $T_a(K)$ : Temperatura del aire.
- $\epsilon_c(-)$ : Emisividad efectiva del cielo bajo condiciones de cielo despejado.
- $N(-)$ : Fracción de cobertura nubosa.

#### 4.1.1.2. Período futuro (2015 - 2099)

Primero, para la precipitación y temperatura, se utilizan las proyecciones realizadas por los GCMs correspondientes a los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 del proyecto CMIP6. En particular, se emplea el conjunto de datos NEX-GDDP-CMIP6, que ofrece 35 modelos ajustados espacialmente, basados en simulaciones de Modelos de Circulación General (SSPs). Estos modelos tienen una resolución temporal diaria y horizontal de  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$  latitud-longitud, cubriendo el período de 1950 a 2099.

A partir de los modelos disponibles en NEX-GDDP-CMIP6 para la zona de estudio, se lleva a cabo un proceso de selección en dos etapas, aplicable a cada escenario:

1. Se escoge una muestra de GCMs crudos según su capacidad de reproducir promedios climatológicos, variabilidad interanual, ciclos estacionales y distribución probabilística mensual en el período histórico observado, mediante el cálculo del Índice de Desempeño Pasado (PPI, por sus siglas en inglés), propuesto por Gasteño, et al. (2023).

Para seleccionar la muestra, se eligen los 14 mejores modelos según la performance conjunta de precipitación y temperatura caracterizada mediante la Distancia Euclidiana (ED; Ec. 4.6) a los valores óptimos  $PPI_{Pr} = 1$  y  $PPI_{Tas} = 1$ , respectivamente.

$$ED = \sqrt{(1 - PPI_{Pr})^2 + (1 - PPI_{Tas})^2} \quad \text{Ec. 4.6}$$

2. A continuación, se reescalan estadísticamente los modelos seleccionados en la primera etapa utilizando el método MBCn, generando series diarias de precipitación y temperatura con una resolución horizontal de  $0,01^\circ \times 0,01^\circ$  latitud-longitud. Luego, se eligen los tres mejores modelos según la performance conjunta de precipitación y temperatura ( $PPI_{Pr}$  y  $PPI_{Tas}$ ), caracterizada mediante la Distancia Euclidiana (ED).

A diferencia del caso anterior, en esta segunda etapa se utiliza el índice PPI para evaluar el desempeño de los modelos **corregidos** de precipitación y temperatura con respecto al período histórico, según promedios climatológicos, variabilidad interanual, ciclos estacionales y distribución probabilística mensual. También, se aprovecha la flexibilidad del índice y se incluye la evaluación de la frecuencia de las precipitaciones, es decir, se contemplan los promedios climatológicos anuales y la variabilidad interanual del número de días con precipitación mayor o igual a 0,05 mm.

Para las forzantes restantes, que son la velocidad del viento, humedad específica y presión, se emplea el método *K-Nearest Neighbor* (KNN; Lall & Sharma, 1996; Rajagopalan & Lall, 1999; Greene, et al., 2012) con el fin de generar estas variables futuras mediante la selección aleatoria de símiles meteorológicos en el período histórico.

En particular, el procedimiento comienza, para cada día del período futuro, con la búsqueda de  $k$  símiles meteorológicos en el período histórico, es decir, se escogen  $k$  análogos o variables cuyas distancias Euclidianas sean mínimas (Ec. 4.7) y, después, con las distancias ordenadas de menor a mayor, a cada símil se le asigna una probabilidad (Ec. 4.8), de tal manera que, al generar una probabilidad aleatoria, se seleccione unos de los  $k$  análogos. En la Figura 4-2 se muestra un diagrama de flujo con el procedimiento recién descrito.

$$r_{im} = \sqrt{\sum_{l=1}^d w_l * (v_{ml} - \widehat{v}_{jl})^2} \quad \text{Ec. 4.7}$$

Donde:

- $r_{im}$ : Distancia Euclidianas ponderada entre los períodos históricos y futuros  $m$  e  $i$ , respectivamente.
- $v_{ml}$ : Valor histórico pasado que se compara en búsqueda de análogo en el instante de tiempo  $m$  y píxel  $l$ .
- $\widehat{v}_{jl}$ : Valor futuro, de instante de tiempo  $i$  y píxel  $l$ .
- $w_l$ : Factor de peso o escala (se suele usar  $1/s_l$  siendo  $s_l$  alguna medida del rango o desviación estándar de  $v_{ml}$ ). Notar que en la dimensión  $l$  se pueden tener varias estaciones o, en este caso, píxeles.

$$r_{im_h} = P_h = \frac{1}{\sum_{l=1}^k \frac{1}{\bar{h}_l}} \quad \text{Ec. 4.8}$$

Donde:

- $r_{im_h}$ : Probabilidad asignada a los  $k$  similares meteorológicos de distancia euclidiana  $r_{im}$ .

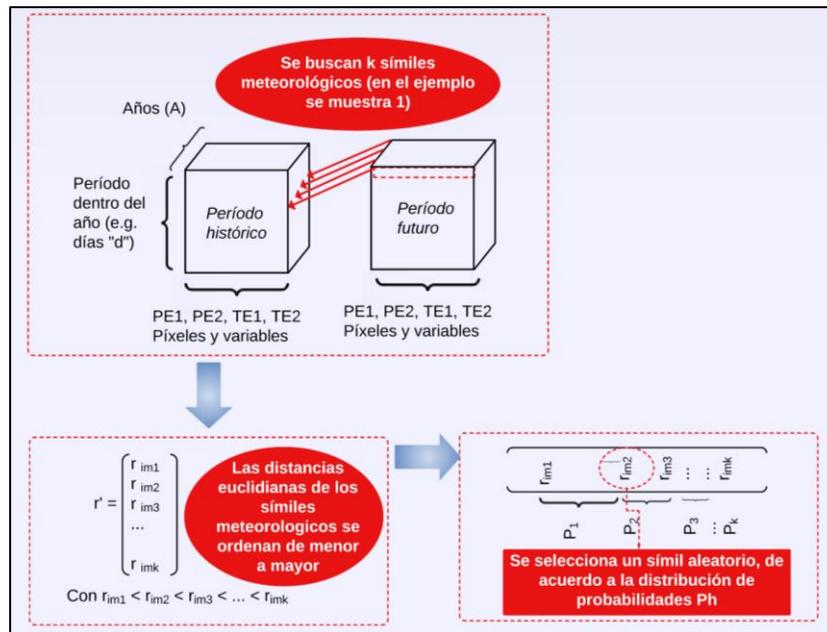


Figura 4-2: Diagrama de flujo de la metodología K-Nearest Neighbor (KNN) para generar clima futuro a partir de similares meteorológicos en el período histórico.

Finalmente, las radiaciones de onda corta y larga se calculan mediante las parametrizaciones propuestas por Zillman (1972) e Iziomon, et al. (2003), respectivamente, que dependen de factores como precipitación y temperatura proyectadas, elevación, y otros aspectos geomorfológicos de cada píxel.

De este modo, se derivan las forzantes necesarias para ejecutar el modelo SUMMA en el período futuro, para tres GCMs y dos escenarios de cambio climático, SSP2-4.5 y SSP5-8.5.

## 4.1.2. Modelo hidrológico y calibración

Para llevar a cabo el estudio de la oferta hídrica se considera la utilización del modelo de simulación hidrológica SUMMA. Al ser un modelo distribuido, primero se discretiza la zona de estudio en 218 píxeles de resolución horizontal de  $0,01^\circ \times 0,01^\circ$  latitud-longitud. Luego, cada celda se caracteriza geográfica, geomorfológica, climática e hidrológicamente.

En este sentido, la geomorfología se caracteriza mediante el Modelo de Elevación Digital SRTM, el cual se encuentra a una resolución espacial de 30 metros y del que se

deducen la elevación, pendiente, perímetro y aspecto de cada celda. Simultáneamente, se caracteriza el uso de suelo con el catastro de uso de suelo y vegetación (CONAF, 2022), y el tipo de suelo con el producto de Tomislav Hengl. (2018), que se encuentra a una resolución de 250 metros.

Luego, se configura la arquitectura del modelo y se establecen 7 capas de suelo, a profundidades 0; 0,05; 0,1; 0,5; 1; 1,5; 2,5; y 4 metros, y se establecen los valores iniciales de 16 parámetros. La calibración de estos se realiza a escala de cuenca mediante el algoritmo de optimización global Shuffled Complex Evolution (SCE; Duan, et al., 1993), que combina métodos probabilísticos y determinísticos. Los rangos de calibración de los parámetros utilizados se encuentran en la Tabla A-1 del 0.

La función objetivo de la calibración es el KGE, índice que incluye i) la correlación mediante el índice Pearson  $r$ ; ii) el sesgo  $\beta$ ; y iii) la variabilidad  $\alpha$  (ver Ec. 2.2). También, para analizar el desempeño del modelo, se utilizan las métricas de evaluación  $R^2$ , RMSE, PBIAS e índice de Nash-Sutcliffe.

Dado que la isla Rapa Nui no cuenta con flujos superficiales permanentes, la calibración del modelo se realizó mediante la incorporación de datos satelitales, generando así series de referencia útiles. Dembélé et al. (2020) demostraron que la integración de productos satelitales en la calibración de un modelo distribuido – originalmente basado únicamente en datos fluviométricos – mejora considerablemente el desempeño del modelo, alcanzando una mejora del 20% al promediar los píxeles de la cuenca.

En este caso, se utiliza el producto MOD16A2 V105, que proporciona información sobre la evapotranspiración terrestre global cada 8 días, con una resolución horizontal de 1 km por píxel. La evapotranspiración (ET), que incluye tanto la evaporación como la transpiración de las plantas desde la superficie terrestre a la atmósfera, se emplea para calibrar la variable *scalarTotalET* del modelo SUMMA. Este producto abarca datos desde el año 2000 hasta 2015.

El modelo histórico abarca el período de 1985 a 2014, precedido por un período de calentamiento entre 1981 y 1984. La calibración se realiza desde enero de 2005 hasta diciembre de 2014, mientras que la evaluación se lleva a cabo entre enero de 2000 y diciembre de 2004. Se elige este período de calibración por su diversidad hidroclimática, además de capturar algunas anomalías relacionadas con el cambio climático a partir de 2010 (Toro et al., 2023; Gatica & Toro, 2021).

Finalmente, se analiza el resultado de los flujos generados por SUMMA, enfocándose en el flujo de recarga al acuífero (*scalarAcuiferRecharge*), ya que en la isla Rapa Nui el principal suministro de agua proviene de pozos de extracción, por lo tanto, la recarga al acuífero es clave para la oferta hídrica en la isla.

## 4.2. Determinación de la demanda hídrica

En primer lugar, se identifican los usos de agua en Rapa Nui, que son por agua potable y pecuaria (DGA, 2023). La demanda de agua potable se divide entre los residentes permanentes de la isla, tanto en áreas urbanas como rurales, y las comunidades flotantes que visitan anualmente la zona. Por otro lado, la demanda pecuaria está relacionada con la población de bovinos y equinos.

Una vez definidos los usos, se recopila información histórica sobre la población residente a partir de los Censos de Vivienda y Urbanismo, la población flotante según informes del Servicio Nacional de Turismo (SERNATUR), y la población pecuaria a través de los Censos Agropecuarios. Esta información se utiliza para ajustar un modelo matemático que proyecta estas variables hasta el año 2100.

- Para el caso de la población residente, se recopila la información de población a partir de los Censos de los años 1982, 1992, 2002 y 2017. Del universo de habitantes, el 94,5% son pobladores urbanos y el 5,5% rurales (INE, 2017).
- La población flotante se calcula considerando los Informes Estadísticos del SERNATUR de los años 2012 al 2019, y se descartan los años 2020 al 2022 por COVID-19 y cierre temporal de la isla. También, se deriva que la estadía promedio de los turistas es de 5,5 días (DGA, 2023).
- La población pecuaria se obtiene a partir de los Censos de los años 1997, 2007 y 2011, tanto para la población bovina como equina.

Cabe mencionar que el Censo Agropecuario del año 2007 estimó la superficie regada en explotaciones agropecuarias en 10,23 Ha regadas por tendido y 2 Ha regadas por goteo, sin embargo, las aguas gestionadas por SASIPA son usadas para consumo humano y riego, por lo cual no es posible detallar la demanda agrícola de la isla con la información disponible (DGA, 2023).

Continuando con la determinación de la demanda, luego se recopila información sobre la dotación de agua de la población residente, flotante y pecuaria:

- Según el informe de SASIPA, encargada de la gestión y distribución de agua potable en la isla, la dotación de agua para la población urbana (residentes y flotantes) es de 242,7 litros por habitante al día, con pérdidas de distribución del 45%.

En el sector rural, la dotación se basa en los parámetros del Manual de Criterios de Diseño APR de la DOH 2019, estableciendo 150 litros por habitante al día y pérdidas del 20%.

- Para la población pecuaria se estima una demanda de 45 litros por animal al día para los equinos y de 36,9 (l/animal/día) en promedio para los bovinos (DGA, 2017).

De este modo, con los usos del agua proyectados y sus respectivas dotaciones, se calcula la demanda de agua a partir de la Ec. 4.9.

$$Demanda = Población * Dotación / (1 - Pérdidas) \quad Ec. 4.9$$

### 4.3. Análisis de la sustentabilidad hídrica

Para estudiar la sustentabilidad futura del abastecimiento de agua en la isla, se evalúan cuatro criterios sobre la serie de déficit hídrico de cada usuario (Ec. 2.10): **confiabilidad**, que mide la probabilidad de que la oferta de agua disponible cubra la demanda; **resiliencia**, que se refiere a la capacidad del sistema para recuperarse tras un período de falla; **vulnerabilidad**, que cuantifica la severidad de los fallos y **déficit máximo**, que, de existir, correspondería al peor caso anual de déficit hídrico.

De este modo, para cada uso del agua identificado en la isla Rapa Nui, se aplica la ecuación Ec. 2.99, que integra los criterios de evaluación antes mencionados y calcula índices SI que reflejan el nivel de sustentabilidad de cada usuario. Estas métricas oscilan entre 0 y 1, donde valores más cercanos a 1 indican una mayor sostenibilidad del sistema evaluado en función de los criterios considerados, los cuales también pueden ser analizados de forma individual.

Finalmente, se concluye sobre la sustentabilidad del sistema de abastecimiento completo de la isla mediante el índice SGI (Ec. 2.5), que consiste en una suma ponderada de los índices SI antes calculados. Las ponderaciones corresponden al peso relativo de asignado a cada usuario, entendido como la razón entre la demanda del uso *i* sobre la demanda total del sistema.

# Capítulo 5: Resultados y discusión

## 5.1. Forzantes meteorológicas

### 5.1.1. Período histórico (1985-2014)

En la Figura 3-2 se presentan las Curvas de Variación Estacional y la distribución espacial de la precipitación y temperatura media anual en la isla Rapa Nui, correspondientes al período histórico (DGA, 2022). Estas variables, junto con la velocidad del viento y la humedad específica (ver Figura B-1 del 0), introducen incertidumbre en sus patrones espaciales debido a la combinación de registros locales de la estación Mataveri con productos grillados, como datos satelitales y de reanálisis. Si bien estos productos ofrecen mayor resolución espacial que las mediciones puntuales de la estación meteorológica, presentan limitaciones para capturar dinámicas locales específicas.

Las CVE y distribución espacial de la presión y radiación de onda corta y larga media anual se presentan en la Figura B-1 del 0. En el caso de la presión, esta se mantiene constante temporalmente, variando únicamente en función de la elevación de cada celda. Sin embargo, simplificar la presión atmosférica como una variable estática podría no capturar de manera precisa ciertas dinámicas locales, especialmente en un entorno insular como Rapa Nui, donde la interacción entre el océano y la atmósfera podría influir en micro variaciones de la presión que, aunque sutiles, podrían impactar en el balance energético del sistema (Barros & Lettenmaier, 1994).

La radiación de onda corta y larga se calcularon mediante parametrizaciones simplificadas que, aunque útiles, no capturan completamente las dinámicas locales. Esto genera incertidumbres adicionales, ya que estas aproximaciones se basan en suposiciones generales como la posición geográfica, la variación estacional, la temperatura del aire y la humedad relativa. En un contexto insular como Rapa Nui, donde la interacción entre el océano y la atmósfera puede generar microclimas específicos (Emanuel, 2003), estas simplificaciones podrían afectar la precisión del balance energético del sistema y, en consecuencia, influir en los resultados de la modelación hidrológica.

A pesar de estas limitaciones, las series de datos generadas constituyen una base sólida para la modelación hidrológica. No obstante, es recomendable realizar ajustes locales o validaciones adicionales con datos específicos de la isla para mejorar la precisión de las simulaciones.

## 5.1.2. Período futuro (2015-2099)

La Figura 5-1 muestra 14 modelos seleccionados del conjunto de datos NEX-GDDP-CMIP6 para el período 1985-2014, según su desempeño conjunto en los índices PPI de precipitación y temperatura, evaluado por la distancia euclidiana a los valores óptimos de cada uno, que es igual a 1.

El índice PPI se determina a partir de una suma ponderada de diversos criterios, que incluyen promedios climatológicos ( $Srmm_a$ ), variabilidad interanual ( $Sriav$ ), ciclos estacionales ( $Sbaseas$ ) y distribución probabilística mensual ( $Spss$ ). Las ponderaciones específicas utilizadas en la selección de los 14 GCMs crudos se detallan en el subtítulo de la Figura 5-1. Se destaca que todas las ponderaciones son iguales a 1, excepto para el criterio de promedios climatológicos de temperatura, que tiene una ponderación del 2 por ciento.

El 0 muestra el desempeño de cada criterio evaluado para el índice PPI, tanto para precipitación como para temperatura. En la Figura C-2 se observa que, en general, los criterios para la temperatura son satisfactorios, excepto para los montos anuales. Para considerar este criterio sin afectar negativamente el índice PPI, se asigna la máxima ponderación posible. Esto permite que el mayor número de modelos logre un PPI superior a 0,6, acercándose al valor ideal igual a 1.

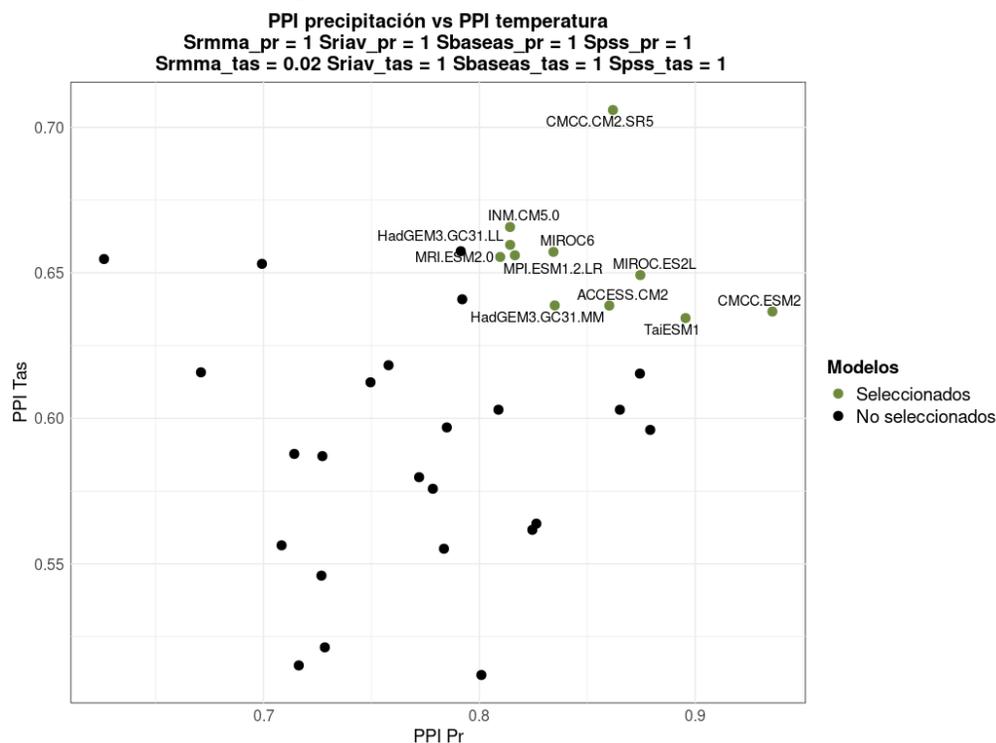


Figura 5-1: Selección de modelos GCMs crudos para la isla Rapa Nui, mediante distancia euclidiana entre los índices PPI de precipitación ( $PPI_{Pr}$ ) y temperatura ( $PPI_{Tas}$ ), con respecto a su valor ideal igual a 1 (Gateño et al., 2023). En el subtítulo se especifican las ponderaciones utilizadas en los criterios del índice PPI.

La Figura 5-2 presenta los tres modelos seleccionados mediante la evaluación conjunta del índice PPI modificado de precipitación y temperatura, resultando los GCMs **TaiESM1**, **MPI.ESM1.2.LR** y **CMCC.CM2.SR5**.

A diferencia del caso anterior, en esta segunda etapa se utiliza el índice PPI para evaluar el desempeño de los modelos **corregidos** de precipitación y temperatura con respecto al período histórico, según los criterios mencionados anteriormente y, además, se incluye la evaluación de la frecuencia de las precipitaciones, es decir, se contemplan los promedios climatológicos anuales ( $Srmm_a_d$ ) y la variabilidad interanual ( $Sriav_d$ ) del número de días con precipitación mayor o igual a 0,05 milímetros. En el 0 se encuentran los gráficos de variación estacional de precipitación y temperatura resultantes de la aplicación del método MBCn para los tres modelos seleccionados, para el período histórico.

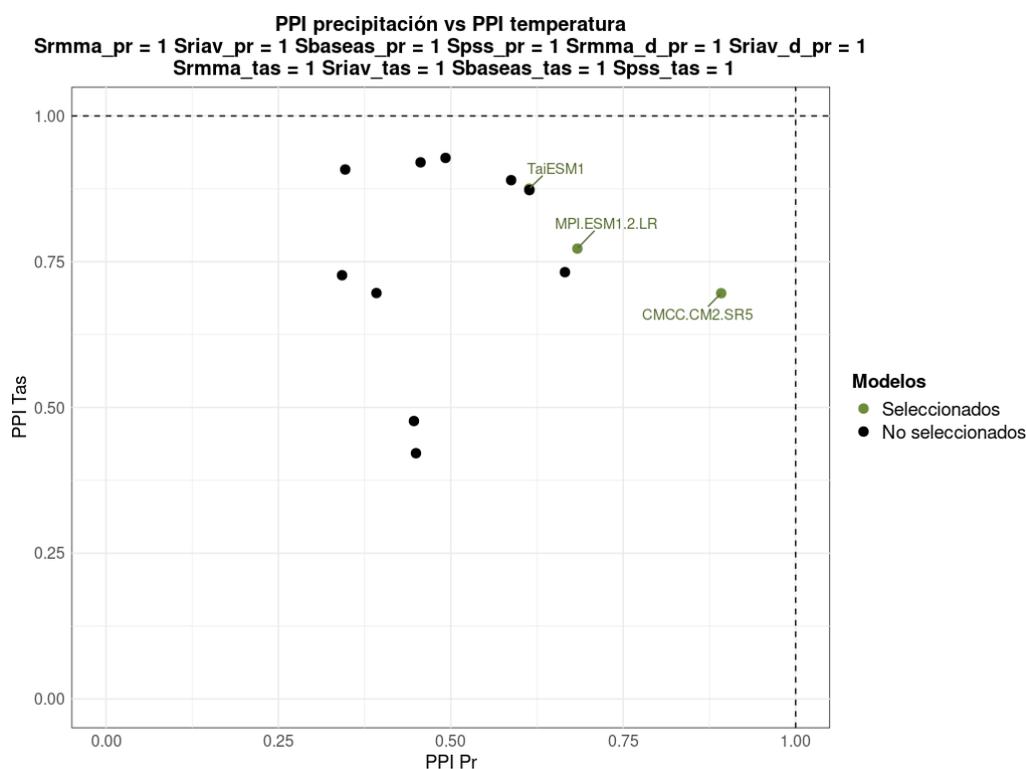


Figura 5-2: Selección de modelos GCMs corregidos con método MBCn para la isla Rapa Nui. La elección se realiza mediante índice modificado PPI (Gateño et al., 2023) para precipitación ( $PPI_{Pr}$ ) y temperatura ( $PPI_{Tas}$ ). En el subtítulo se especifican las ponderaciones utilizadas en los criterios del índice PPI modificado y en líneas punteadas el valor ideal de cada PPI.

La Figura 5-3 muestra la serie anual de precipitación y temperatura de los tres modelos seleccionados y corregidos estadísticamente (MBCn), tanto para el período histórico como futuro, donde se consideran los escenarios de cambio climático SSP2-4.5 y SSP5-8.5. Se observa que, para el caso de la precipitación, tanto en el futuro cercano como lejano los dos escenarios de cambio climático proyectan decrecimiento en la variable. En cuanto a la temperatura, tanto en el futuro cercano como lejano los dos escenarios de cambio climático proyectan aumentos en la variable.

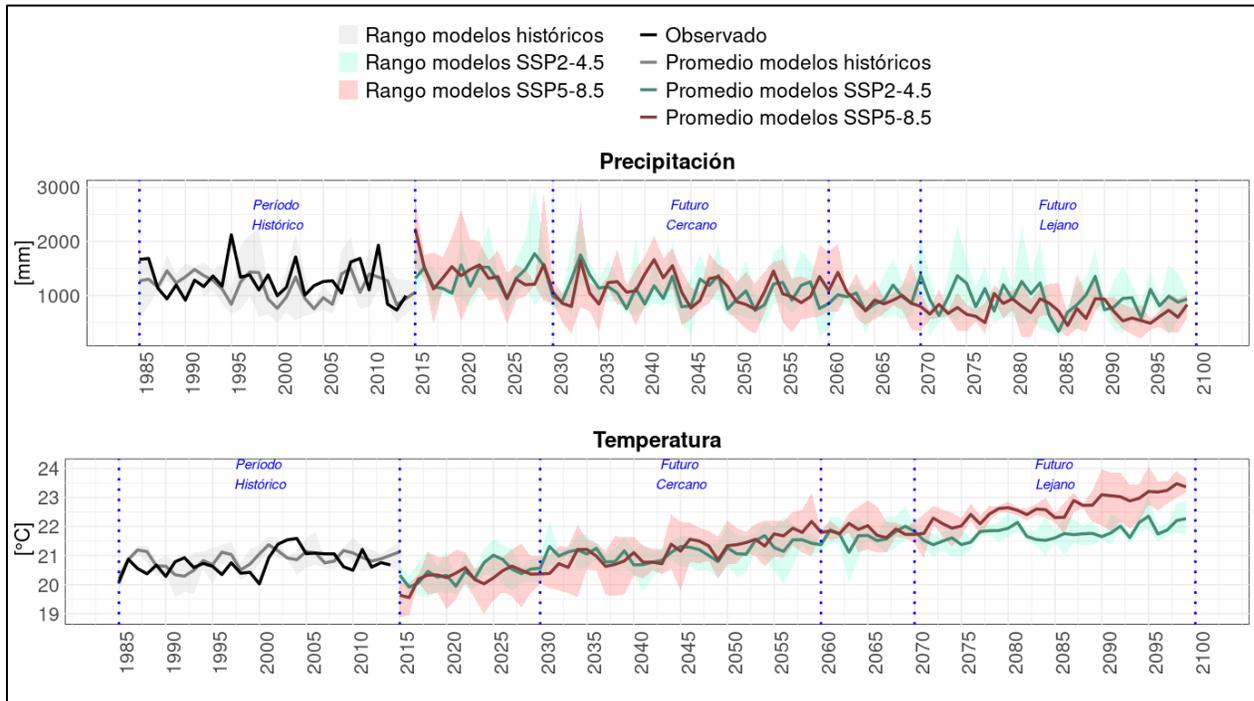


Figura 5-3: Series anuales de precipitación (panel superior) y temperatura (panel inferior) con resultados de downscaling de los modelos TaiESM1, MPI.ESM1.2.LR y CMCC.CM2.SR5, usando el método MBCn. Para el período histórico, el ensamble gris muestra los tres modelos GCMs, con el promedio en gris y las observaciones en negro. Para el futuro, los ensambles rojo y verde corresponden a los modelos para los escenarios SSP5-8.5 y SSP2-4.5, respectivamente, con sus promedios en líneas punteadas de los mismos colores.

Las proyecciones muestran patrones consistentes en la variación estacional para ambas variables (ver Figura 5-4). En el caso de la precipitación, se proyectan reducciones más pronunciadas en el futuro lejano, especialmente entre octubre y marzo para los dos escenarios de cambio climático. En contraste, se espera que la temperatura aumente de forma homogénea durante todo el año, tanto en el escenario SSP 2-4.5 como en el 5-8.5.

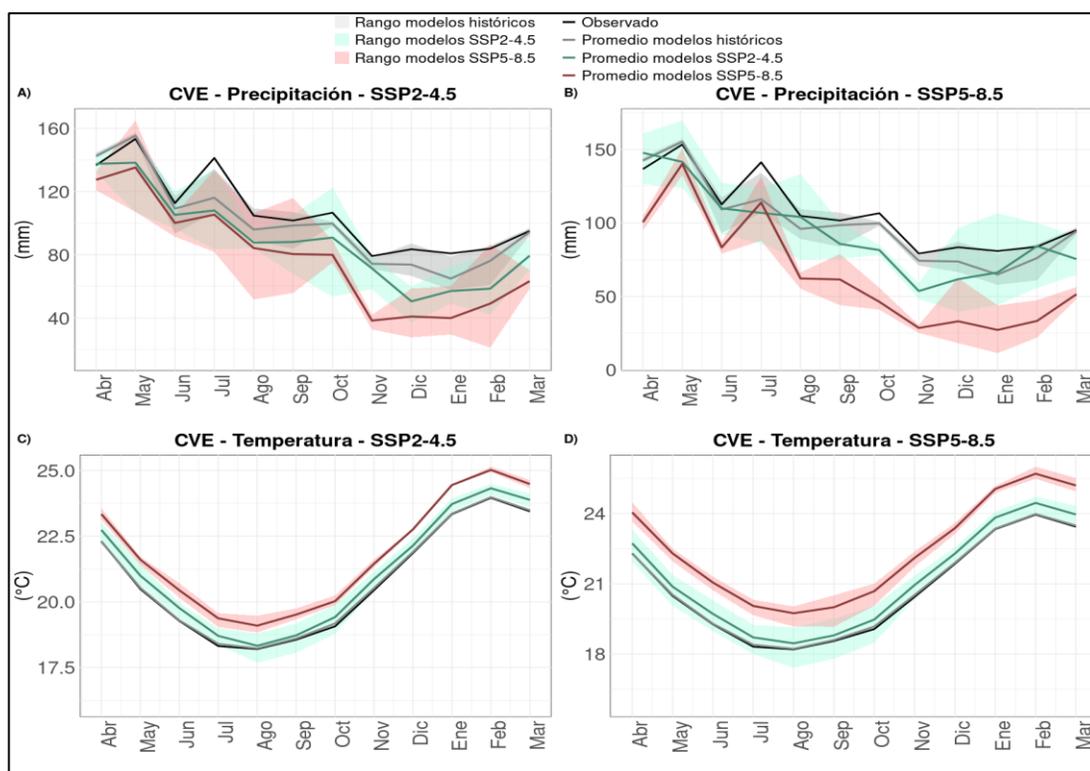


Figura 5-4: Curvas de variación estacional de la precipitación (A y B) y la temperatura (C y D) para el período histórico, futuro cercano y futuro lejano, utilizando los modelos TaiESM1, MPI.ESM1.2.LR y CMCC.CM2.SR5, bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5.

La Tabla 5-1 compara los cambios porcentuales en precipitación y el aumento de temperatura en grados Celsius entre los períodos futuro cercano y lejano con el histórico de cada modelo. En promedio, se prevé que:

- **Futuro Cercano (2030-2059):** Considerando los escenarios de cambio climático SSP2-4.5 y SSP5-8.5, respectivamente, se proyecta una disminución del 2-7% en la precipitación media anual, y un aumento de 0,5-1°C en la temperatura media anual.
- **Futuro Lejano (2070-2099):** En este período las tendencias del futuro cercano se acentúan, con una disminución del 14-25% en las precipitaciones medias anuales, y un aumento de 1-2°C en la temperatura media anual.

Tabla 5-1: Promedios climatológicos de precipitación (mm) y temperatura (°C) para el período histórico, y cambios proyectados en las variables. Se consideran los modelos TaiESM1, MPI.ESM1.2.LR y CMCC.CM2.SR5 y los escenarios de cambio climático SSP2-4.5 y SSP5-8.5.

		Histórico	Cercano		Lejano	
			SSP2-4.5	SSP5-8.5	SSP2-4.5	SSP5-8.5
$\Delta P$ (%)	CMCC.CM2.SR5	1.149 mm	10	8	-10	-10

	MPI.ESM1.2.LR	1.247 mm	-2	-8	-9	-37
	TaiESM1	1.137 mm	-10	-5	-21	-26
$\Delta T$ (°C)	CMCC.CM2.SR5	20,9 °C	1,0	1,1	1,5	2,9
	MPI.ESM1.2.LR	20,9 °C	0,2	0,5	1,1	1,9
	TaiESM1	20,8 °C	0,3	0,2	0,6	1,2

En el 0 se presentan las series de variación estacional de las forzantes meteorológicas restantes: velocidad del viento, humedad relativa, presión y radiación de onda corta y larga, tanto para el período histórico como para los futuros cercano y lejano. Los resultados obtenidos mediante el método KNN revelan que, en ambos escenarios de cambio climático, estas variables tienden a incrementar su valor medio mensual, con aumentos más marcados en el futuro lejano bajo el escenario SSP5-8.5.

## 5.2. Calibración y validación del modelo SUMMA

El modelo SUMMA se calibra y valida en la isla Rapa Nui mediante la comparación de las simulaciones mensuales de evapotranspiración, obteniéndose los parámetros presentados en el 0.

En la Figura 5-5 se muestran los gráficos de dispersión mensual de ET obtenidos en el período de calibración (ene/2005 - dic/2014; panel A) y evaluación (ene/2000 - dic/2004; panel B). Se observa que, en ambos períodos, el desempeño del procedimiento es bueno en términos de la métrica optimizada (KGE), la cual alcanza un valor de 0,71, cercano a su valor óptimo igual a 1. Asimismo, el PBIAS indica un sesgo negativo, con una subestimación de aproximadamente el 8%. El coeficiente de determinación ( $R^2$ ) presenta valores más bajos, con un  $R^2$  de 0,32 en calibración y 0,38 en evaluación, lo que sugiere que el modelo no captura completamente la variabilidad de los datos.

Tabla 5-2 muestra las métricas de desempeño del modelo, tanto para el período de calibración como para el de evaluación. Los resultados revelan valores bajos de NSE (0,3 en calibración y 0,4 en evaluación), lo que indica que el modelo no captura adecuadamente la variabilidad observada en los datos. De este modo, se destacan limitaciones en la capacidad del modelo para representar procesos clave del sistema hidrológico, por lo tanto, es crucial mejorar su estructura o las técnicas de calibración para capturar con mayor precisión la variabilidad del sistema.

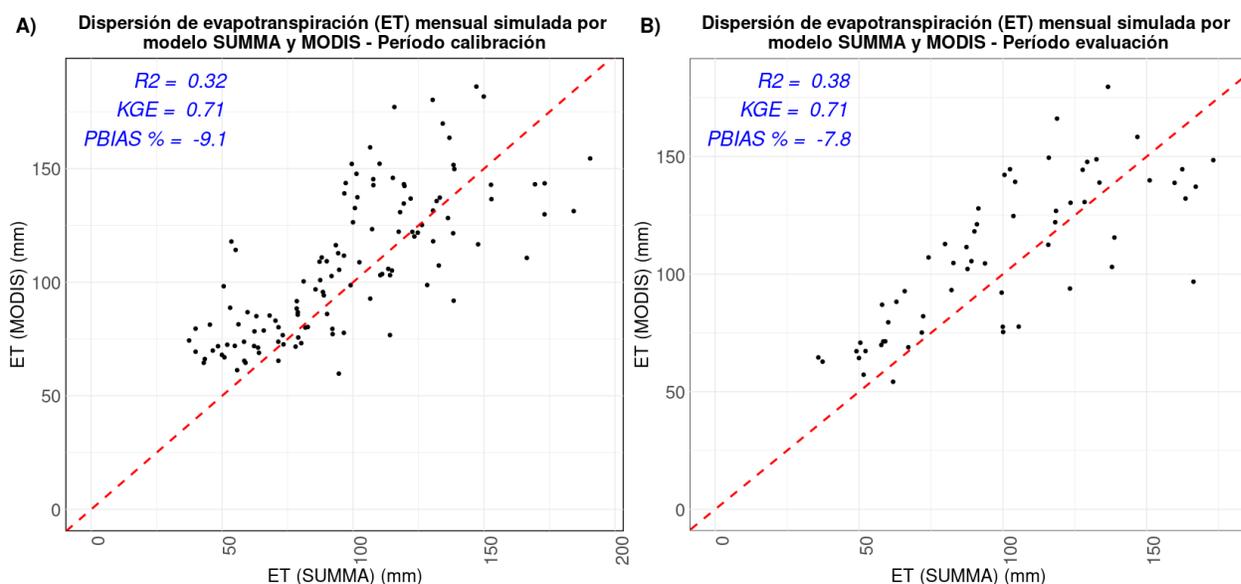


Figura 5-5: Gráficos de dispersión comparan la evapotranspiración mensual simulada por el modelo SUMMA con los datos del producto satelital MODIS. En el panel A se muestran los resultados del período de calibración, y en el panel B los del período de evaluación. La línea punteada roja representa la recta 1:1.

Tabla 5-2: Métricas de desempeño de calibración y evaluación del modelo SUMMA para isla Rapa Nui.

	Período	
	Calibración	Evaluación
KGE	0,7	0,7
R2	0,3	0,4
PBIAS (%)	-9,1	-7,8
NSE	0,3	0,4
RMSE (mm)	25,9	24,9

En la Figura 5-6 se muestran las series de variación estacional de evapotranspiración MODIS, SUMMA y las obtenidas en el Balance Hídrico Nacional (DGA, 2022). Para estas tres series se observa que, en el período abr-sep, la evapotranspiración es menor, con montos mínimos entre junio y julio cercanos a 50 mm. Durante el período oct-mar, la evapotranspiración es mayor en las tres series analizadas. Sin embargo, al compararlas con la serie de referencia (MODIS), tanto SUMMA como los resultados del BH5 subestiman las observaciones. Aun así, la subestimación de SUMMA es considerada buena (PBIAS =

-8%). Cabe destacar que los resultados del BH5 muestran una estacionalidad mucho más corta que la serie de referencia, finalizando su período de mayor actividad en diciembre.

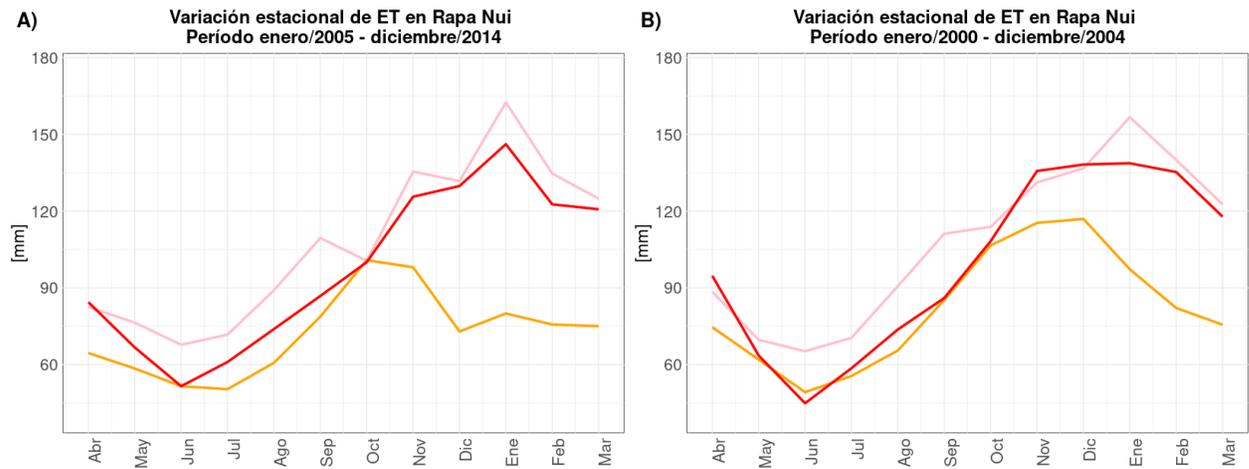


Figura 5-6: Variación estacional de evapotranspiración (ET) en Rapa Nui, para el período de calibración (A) y evaluación (B).

Las principales fuentes de incertidumbre en el proceso de modelación están asociadas a las forzantes utilizadas, la estructura del modelo y la calibración de sus parámetros. Aunque el desempeño del modelo, medido a través del índice de Kling-Gupta, alcanza un valor bueno de 0,71, es importante considerar otras métricas que revelan limitaciones significativas en la capacidad del modelo para capturar la variabilidad de los datos.

En este caso, la estructura modular de SUMMA permite la integración de diferentes representaciones de procesos físicos dentro de un conjunto común de ecuaciones de conservación, lo que facilita la adaptación a diversas condiciones locales. Sin embargo, esta flexibilidad también implica que diferentes configuraciones del modelo podrían producir resultados similares en cuanto a evapotranspiración, en parte debido a que el proceso de calibración puede compensar errores estructurales (Mendoza et al., 2015).

Otro aspecto importante es la elección de la función objetivo para la calibración del modelo. Aunque el KGE es ampliamente utilizado por su capacidad para integrar múltiples componentes del desempeño del modelo (correlación, sesgo y variabilidad), también presenta limitaciones. Su dependencia de la suma de errores al cuadrado lo hace sensible a pocos puntos atípicos, lo que puede distorsionar la percepción de precisión (Clark et al., 2021). En consecuencia, el KGE podría no capturar adecuadamente las variaciones espaciales y temporales en la evapotranspiración, como lo sugieren los valores relativamente bajos de  $R^2$  y los sesgos observados en la precipitación.

Finalmente, la subestimación observada en las simulaciones de SUMMA y BH5 durante los meses de mayor evapotranspiración sugiere la necesidad de ajustar los parámetros del modelo o emplear datos complementarios que mejoren su desempeño. Es importante destacar que estas conclusiones se basan en comparaciones con datos estimados

mediante MODIS, los cuales no corresponden a mediciones directas y, por lo tanto, pueden contener sesgos y errores. Las limitaciones en la representación de la evapotranspiración por los modelos SUMMA y VIC podrían estar relacionadas con estas incertidumbres en los datos de referencia, lo que dificultaría una simulación precisa.

Por otro lado, la discrepancia en la duración del periodo estacional, especialmente en el caso de BH5, donde se observa una disminución abrupta en diciembre, podría deberse a limitaciones en la resolución o calidad de las forzantes meteorológicas utilizadas. Esto afecta la capacidad del modelo para reproducir patrones estacionales clave, lo que pone de manifiesto la importancia de mejorar tanto las parametrizaciones internas del modelo como la calidad de los datos climáticos empleados.

## 5.3. Resultados modelación hidrológica

### Resultados período histórico

En la Figura 5-7 se muestran los resultados de las simulaciones para el período histórico. Las series anuales, tanto de las observaciones como de los modelos, evidencian niveles elevados de evapotranspiración en comparación con la recarga al acuífero y la escorrentía. La evapotranspiración media anual obtenida de forzantes observadas es de 1.164 mm, lo que representa el 91% de la precipitación, mientras que la media anual obtenida de los modelos es de 1.007 mm (85% de la precipitación).

La distribución espacial de ET, tanto para las observaciones como para los modelos, revelan valores menores únicamente en la zona urbana, mientras que en el resto de la isla se mantiene homogénea (ver 0). Esta distribución es coherente con la cobertura de suelos en Rapa Nui, porque en la zona homogénea predominan praderas y matorrales (77%), seguidos de terrenos agrícolas y áreas boscosas. En cambio, en la zona urbana, la menor evapotranspiración está asociada a la reducción de la vegetación y la presencia de superficies impermeables que limitan los procesos de evaporación y transpiración. Cabe destacar que la celda asociada al humedal Rano Kau, ubicado al oeste de la isla, muestra una evapotranspiración particularmente mayor.

La escorrentía media anual en la isla, obtenida tanto de las forzantes observadas como de los modelos, es de 4 mm, equivalente a un 0,02% de la precipitación. Esto concuerda con estudios que indican la ausencia de escorrentía superficial permanente en la isla (CIREN, 2021). Sin embargo, estos valores contrastan notablemente con las estimaciones de la Dirección General de Agua (DGA, 2022), que sugieren que la escorrentía representa el 50% de la precipitación anual. Las bajas tasas de escorrentía observadas en este estudio pueden explicarse por las altas tasas de evapotranspiración y la naturaleza volcánica del suelo, que favorece la rápida infiltración del agua en lugar de generar flujos superficiales.

Finalmente, la recarga media anual obtenida de forzantes observadas es de 112 mm, lo que representa un 9% de la precipitación, mientras que la recarga calculada a partir de los modelos es de 162 mm (14% de la precipitación). Su distribución espacial muestra valores ligeramente más altos en las zonas urbanas y menores en el resto de la isla, con una distribución casi homogénea. Esto es coherente, ya que el suelo limo de la zona urbana es más permeable, lo que facilita una mayor infiltración y, por tanto, una mayor recarga. Por otro lado, en el resto de la isla, el suelo limo arcilloso arenoso tiene menor permeabilidad, y la presencia de praderas y matorrales incrementa la evapotranspiración, lo que reduce la cantidad de agua disponible para la recarga al acuífero, resultando en una recarga homogénea pero ligeramente menor.

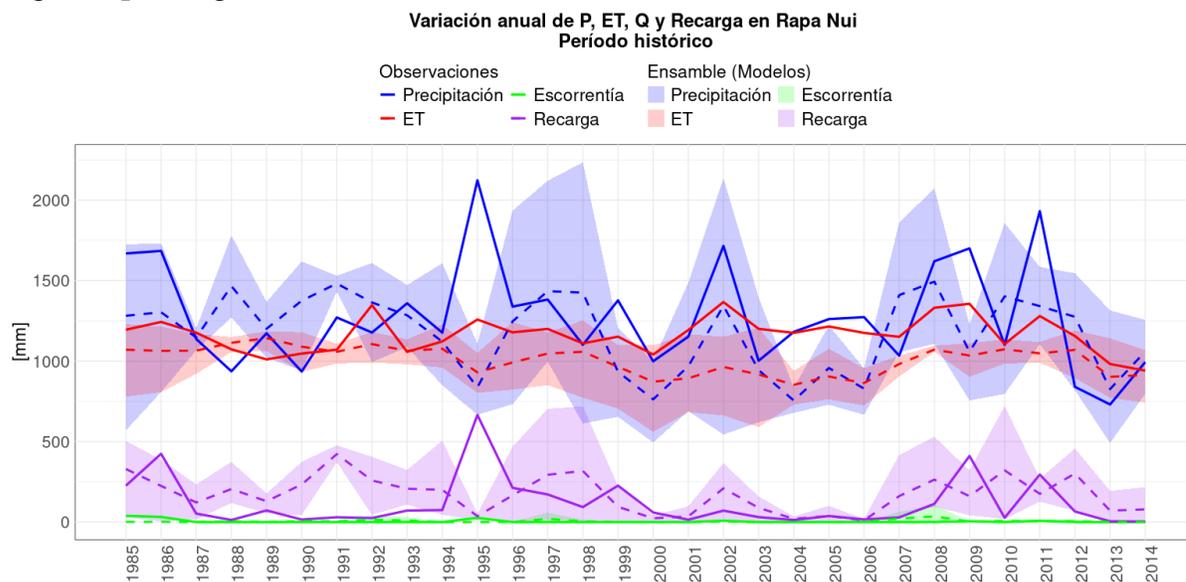


Figura 5-7: Serie anual de precipitación, evapotranspiración y recarga en Rapa Nui, durante el período histórico (1985-2014), obtenida de forzantes observadas y simuladas por los modelos TaiESM1, MPI.ESM1.2.LR y CMCC.CM2.SR5.

Por otro lado, los resultados de la modelación hidrológica para los períodos futuros muestran una disminución en la precipitación, evapotranspiración (ET) y recarga del acuífero hacia los intervalos 2030-2059 y 2070-2099, en comparación con el período histórico (1985-2014).

### **Resultados futuro cercano**

En los paneles A y B de la Figura 5-8 se muestran las variaciones porcentuales de la evapotranspiración (ET), precipitación (P) y recarga en el período cercano en comparación con el histórico de cada modelo, para los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5, respectivamente.

Bajo el escenario SSP2-4.5, los cambios en las variables hidrológicas son menos pronunciados en comparación con el escenario SSP5-8.5, lo que coincide con análisis previos. En este contexto, la precipitación media anual experimenta una disminución promedio del 7%, mientras que la evapotranspiración (ET) se reduce hasta un 30% y la recarga del acuífero puede disminuir en un 65%. En contraste, el escenario SSP5-8.5 muestra una

reducción más drástica, con una disminución de hasta el 10% en la precipitación y una reducción de la ET también del 10%, pero con el riesgo de que la recarga del acuífero desaparezca por completo en algunos modelos.

La reducción en la evapotranspiración, a pesar de la disminución en la precipitación, se debe a la relación entre la disponibilidad de agua y la demanda de evaporación. Con menos precipitaciones, hay menos agua en el suelo, lo que limita la cantidad que las plantas pueden evaporar y transpirar. Aunque temperaturas más altas incrementan la demanda atmosférica de agua, este efecto se ve atenuado por la menor humedad en el suelo. Otra explicación puede ser que las respuestas de los sistemas hidrológicos son altamente no lineales, lo que significa que los cambios en la precipitación y temperatura no siempre se traducen de manera predecible en la evapotranspiración.

### Resultados futuro lejano

En los paneles C y D de la Figura 5-8 se muestran las variaciones porcentuales de la ET, P y recarga en el período lejano en comparación con el histórico de cada modelo. Los resultados muestran que, bajo ambos escenarios (SSP2-4.5 y SSP5-8.5), las variaciones proyectadas se intensifican en el período lejano en comparación con el futuro cercano, acentuando las tendencias previamente observadas. Además, las proyecciones indican que los impactos son más severos bajo el escenario SSP5-8.5 que en SSP2-4.5, reflejando un mayor decremento en la ET y una mayor reducción en la recarga y la precipitación.

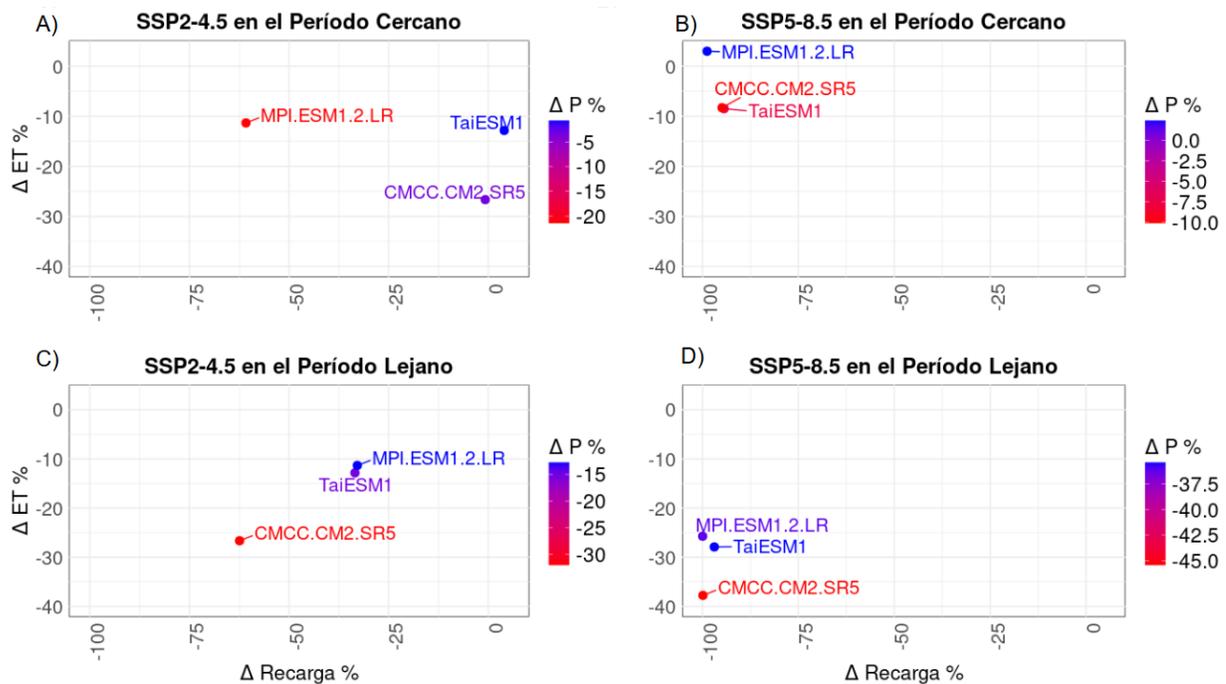


Figura 5-8: Variación porcentual en el futuro cercano (A y B) y lejano (C y D) de ET, P y Recarga con respecto al período histórico de cada modelo y escenario de cambio climático.

### 5.3.1. Balance hídrico en Rapa Nui

A continuación, se presenta la variación del almacenamiento adimensional, el cual se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\Delta = 100 \cdot \frac{1}{P} \cdot \frac{dS}{dt} = \frac{100}{P} \cdot (P - ET - Q - g_{out}) \quad \text{Ec. 5.1}$$

donde  $S$  corresponde al almacenamiento (en mm),  $g_{out}$  son los flujos subterráneos de salida (en mm), y  $dt$  la variación temporal, que abarca desde el año 1985 hasta el año 2014. Valores negativos de  $\Delta$  indican que la cuenca está perdiendo agua en términos totales, mientras que valores positivos sugieren un aumento en el almacenamiento de agua en la cuenca.

En el balance hídrico de la isla, el parámetro  $S$  representa el almacenamiento total de agua en la cuenca, medido en milímetros (mm), e incluye agua en el suelo y en el acuífero, así como también consideraciones sobre el almacenamiento atmosférico. El término  $g_{out}$  refleja el agua que se pierde del acuífero hacia el entorno a través de flujos base, y se relaciona con la variable *scalarAquiferBaseflow* de SUMMA, medida en metros por segundo ( $\text{m s}^{-1}$ ). Es importante destacar que no se consideran flujos subterráneos de agua desde el océano hacia la isla, ya que esta variable no es proporcionada por el modelo.

La variación en el almacenamiento ( $\Delta S$ , Tabla 5-3) refleja pérdidas netas a lo largo de todos los escenarios, con valores que oscilan entre -10% en las observaciones históricas y -15% en los modelos históricos. En los escenarios cercanos, la disminución del almacenamiento se mantiene alta (-14%), indicando que las condiciones futuras inmediatas no aliviarán las presiones hídricas. Sin embargo, hacia el futuro lejano, especialmente bajo el escenario más severo (SSP5-8.5), la pérdida disminuye a -3%, no porque el sistema mejore, sino porque la drástica reducción en precipitación y escorrentía limita el agua disponible para movilizar y almacenar, evidenciando un estado crítico de estrés hídrico.

También, podrían existir problemas en la modelación hidrológica, dado que debilidades estructurales del modelo SUMMA pueden comprometer la precisión de las simulaciones. Además, la sobreestimación de los valores simulados de evapotranspiración (ET) puede contribuir a una mayor pérdida de agua del sistema. Es importante destacar que este análisis no considera flujos de entrada desde el océano hacia la isla, lo que podría representar un aporte relevante al balance hídrico de la cuenca y limita la comprensión completa de la variación observada.

Este resultado destaca la necesidad de mejorar la precisión de los modelos hidrológicos y las estimaciones de precipitación para asegurar proyecciones precisas de oferta y demanda hídrica. Además, plantea la necesidad de desarrollar medidas de adaptación que aborden las limitaciones actuales en modelación y gestión, asegurando la sostenibilidad del recurso hídrico en la isla a largo plazo.

Tabla 5-3: Principales flujos hidrológicos para el balance hídrico de la isla Rapa Nui, para período histórico y futuro cercano y lejano, bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5.

	P (mm)	ET (mm)	Q (mm)	$g_{out}$ (mm)	$\Delta S$ (%)
Observaciones - Histórico	1.279	1.163	123	119	-10%
Prom. Modelos - Histórico	1.178	1.007	178	174	-15%
Prom. Modelos - Cercano - SSP2-4.5	1.073	938	145	139	-14%
Prom. Modelos - Cercano - SSP5-8.5	1.119	963	162	154	-14%
Prom. Modelos - Lejano - SSP2-4.5	944	837	107	100	-11%
Prom. Modelos - Lejano - SSP5-8.5	719	701	21	19	-3%

### 5.3.2. Determinación de la oferta hídrica

A continuación, se muestra la serie anual de recarga al acuífero en  $Mm^3$ . En la Figura 5-9 se observa que la recarga se proyecta a disminuir en la medida que avanza el tiempo, lo que refuerza la preocupación sobre la sostenibilidad del recurso hídrico en la isla. Este descenso en la recarga, combinado con las variaciones en los demás componentes del balance hídrico, subraya la importancia de gestionar cuidadosamente la oferta y la demanda de agua en los próximos años para evitar posibles déficits que afecten a la población local.

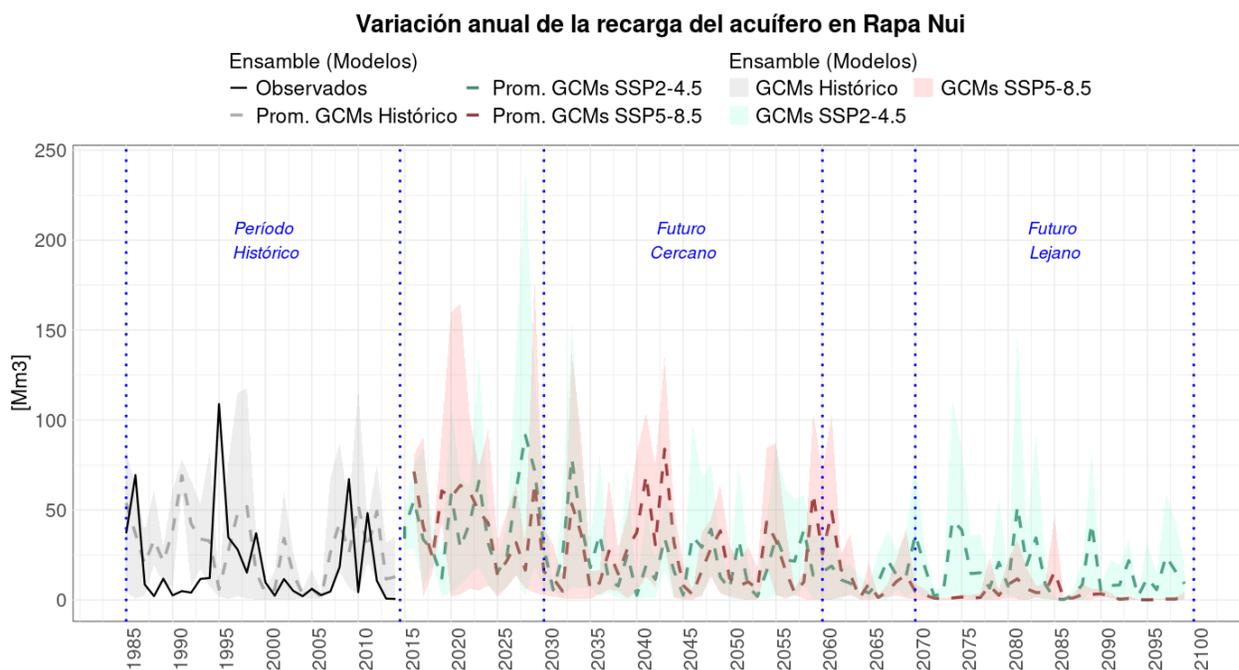


Figura 5-9: Oferta hídrica en la isla Rapa Nui para los períodos histórico y futuro cercano y lejano, según los escenarios de cambio climático SSP2-4.5 y SSP5-8.5.

Es importante señalar que estas aproximaciones en la recarga conllevan una incertidumbre significativa, que también ha quedado en evidencia en estudios anteriores (revisar Capítulo 3.3). Esta incertidumbre se debe, en parte, a la variabilidad inherente en los modelos climáticos y a las diferentes metodologías utilizadas para estimar la recarga en condiciones tan específicas como las de la isla Rapa Nui. Por este motivo, en la Tabla 5-4 se resumen los límites de recarga que se han evidenciado tanto en este informe como en la literatura (Álamos & Peralta, 1992; Matus, 1994; Pincheira, 2003; Herrera & Custodio, 2008; DGA, 2010, 2023; Montgomery & Associates, 2011; Schlumberger Water Services, 2013). Estos límites reflejan el rango de posibles escenarios futuros, desde condiciones más optimistas con recargas cercanas a las del período histórico, hasta escenarios más pesimistas donde la recarga disminuye drásticamente. Considerar estos rangos es crucial para la planificación hídrica, ya que permiten anticipar posibles riesgos y desarrollar estrategias de gestión que se adapten a diferentes niveles de disponibilidad de agua subterránea.

En particular, la Tabla 5-4 muestra una notable variabilidad en los rangos de recarga, con diferencias significativas entre los datos históricos del modelo SUMMA y los reportados en la literatura. El modelo SUMMA presenta una recarga histórica del 9%-14% de la precipitación, lo que representa entre 112-162 mm/año, mientras que la literatura histórica indica un rango amplio, del 10% al 80% de las precipitaciones, significando recargas que van desde los 200-900 mm/año. Estas diferencias pueden reflejar variaciones en las metodologías de estimación, la escala de los modelos o las condiciones consideradas.

Además, los escenarios futuros muestran una disminución en la recarga, con reducciones de 69 mm/año a 181 mm/año en el futuro cercano y de 6 mm/año a 116 mm/año en el futuro lejano. Esta tendencia a la baja podría estar relacionada con los efectos esperados del cambio climático y los cambios en las precipitaciones y las condiciones del suelo, o por cambios en el clima. La amplia variabilidad en las proyecciones sugiere la necesidad de explorar cómo otros modelos hidrológicos proyectan la recarga en escenarios similares para determinar si las proyecciones de SUMMA son consistentes o si requieren ajustes en los parámetros o enfoques de modelación.

Finalmente, sería útil comparar las estimaciones de recarga del modelo SUMMA con datos observacionales, si están disponibles. Esta comparación permitiría evaluar la precisión del modelo y mejorar la confianza en sus proyecciones, ayudando a identificar posibles áreas de mejora en las simulaciones y a ajustar las proyecciones futuras de manera menos incierta.

*Tabla 5-4: Rangos de recarga del acuífero en Rapa Nui, expresados en porcentaje de la precipitación, milímetros y caudal (L/s), según estimaciones del modelo SUMMA, literatura histórica y proyecciones para el futuro cercano y lejano.*

	Porcentaje		Milímetros		Caudal L/s	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Histórico Observado SUMMA	9%		112		584	
Histórico Modelos SUMMA	14%		162		840	
Histórico literatura	10%	80%	270	900	1.404	4.680
Cercano	7%	16%	69	181	356	939
Lejano	1%	12%	6	116	33	602

## 5.4. Determinación de la demanda hídrica

La Figura 5-10 ilustra los ajustes matemáticos y los resultados de las proyecciones de demanda hídrica para cada tipo de usuario identificado.

Para la población flotante, la proyección muestra un aumento parabólico en la demanda de agua, alcanzando aproximadamente 22 Mm<sup>3</sup> para el año 2100. Este patrón puede reflejar el crecimiento esperado en el turismo y otras actividades que atraen a visitantes temporales a la isla. La proyección parabólica sugiere que la demanda crecerá a un

ritmo acelerado, lo que podría implicar una presión creciente sobre los recursos hídricos a medida que la isla se vuelve más popular.

La población residente también presenta una proyección de crecimiento parabólico, con una demanda estimada de 12 Mm<sup>3</sup> al 2100. Este aumento puede ser atribuido al crecimiento poblacional y a la expansión de las infraestructuras y servicios en la isla. La tendencia parabólica indica que, aunque el crecimiento en la demanda será significativo, la tasa de incremento podría no ser tan pronunciada como la de la población flotante.

En contraste, la demanda de agua para la actividad pecuaria, tanto para bovinos como para equinos, se proyecta con un crecimiento exponencial. Esta proyección sugiere que la demanda para la actividad pecuaria podría experimentar un incremento mucho más rápido en comparación con la población humana. Se estima que la demanda pecuaria alcanzará 25 Mm<sup>3</sup> al 2100, reflejando posiblemente un aumento en la producción ganadera o en la cantidad de animales.

Cabe mencionar que los resultados presentados están sujetos a un alto grado de incertidumbre debido a la limitación en los datos utilizados para las proyecciones. Los ajustes parabólicos, por ejemplo, pueden sobreestimar el crecimiento, especialmente si no se consideran factores externos, como políticas de control poblacional o limitaciones en la capacidad turística de la isla.

Además, es importante destacar que la pérdida de agua en la infraestructura actual de distribución es considerablemente alta (20-45%), lo que puede afectar las proyecciones de demanda. Esta situación sugiere la necesidad urgente de mejorar la infraestructura de distribución de agua para reducir las pérdidas y asegurar una gestión más eficiente del recurso hídrico.

Considerando lo anterior, es fundamental discutir estos resultados para planificar una gestión sostenible de los recursos hídricos en la isla. La creciente demanda, especialmente la proyectada para la población flotante y la actividad pecuaria, podría plantear desafíos significativos para el abastecimiento de agua. Por ello, resulta crucial incorporar estas proyecciones en la formulación de políticas y en el desarrollo de estrategias de gestión que garanticen la disponibilidad de agua para satisfacer las necesidades futuras de manera equitativa y sostenible.

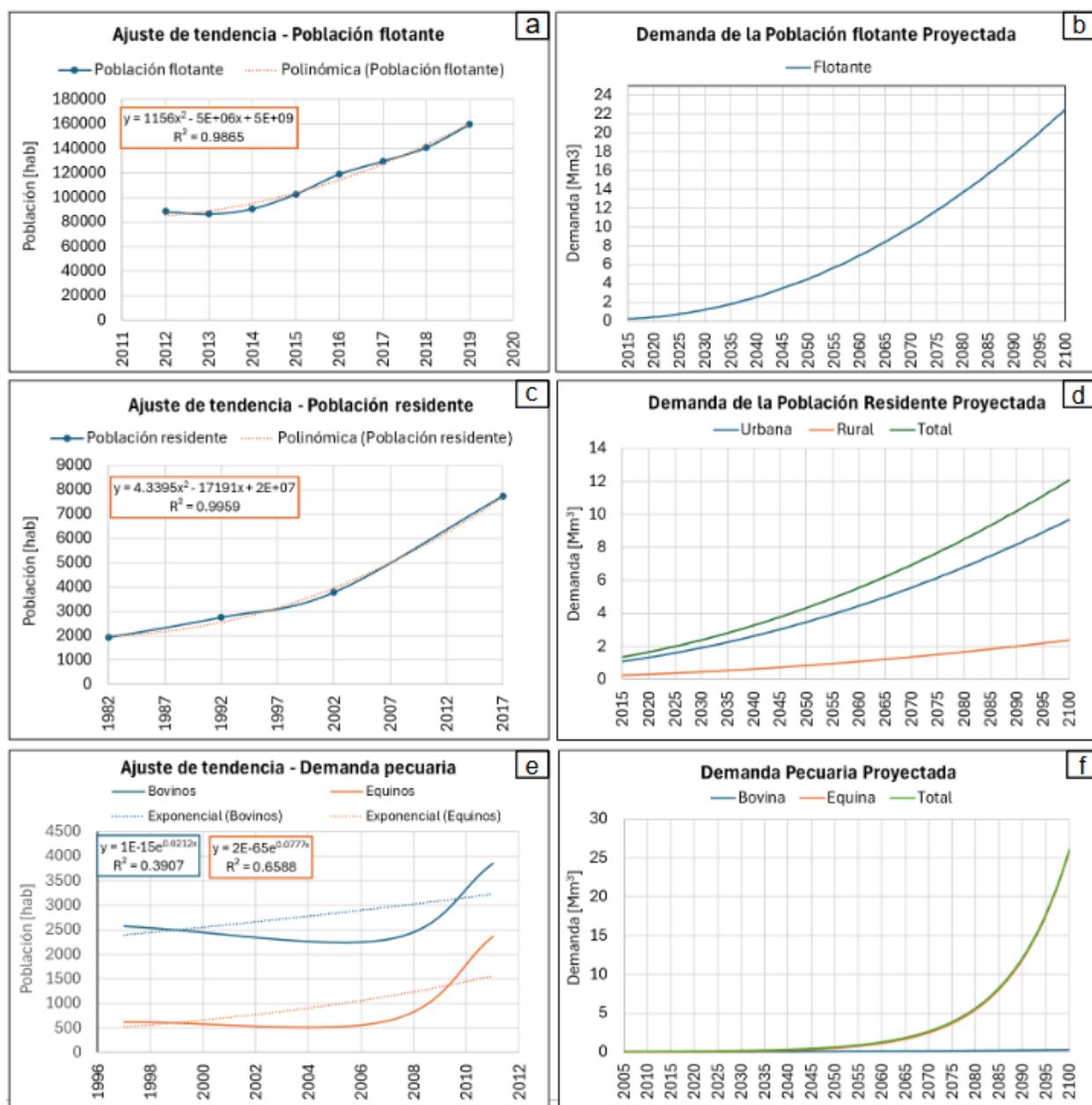


Figura 5-10: En el panel izquierdo se muestran los ajustes matemáticos para los datos históricos de población flotante (a), residente (c) y pecuaria (e). En el panel derecho se muestra la proyección de la demanda hídrica de la población flotante (b), residente (d) y pecuaria (f).

## 5.5. Índices de sustentabilidad hídrica

En la Tabla 5-5 se realiza una comparación de la oferta natural de agua y la demanda proyectada en Rapa Nui para distintos períodos y escenarios climáticos (SSP2-4.5 y SSP5-8.5). Se observa que la oferta disminuye progresivamente hacia el futuro, especialmente

bajo escenarios más extremos, mientras que la demanda aumenta significativamente, generando una mayor presión sobre los recursos hídricos.

Tabla 5-5: Comparación de la oferta natural de agua y la demanda proyectada en Rapa Nui (Mm<sup>3</sup>) para distintos periodos y escenarios climáticos (SSP2-4.5 y SSP5-8.5)

		Oferta natural (Mm <sup>3</sup> )	Demanda (Mm <sup>3</sup> )
Histórico	Observado	18	2
	Prom. Modelos	28	
Cercano	Prom. Modelos SSP2-4.5	23	7
	Prom. Modelos SSP5-8.5	26	
Lejano	Prom. Modelos SSP2-4.5	16	33
	Prom. Modelos SSP5-8.5	3	

En el panel superior de la Figura 5-11 se presenta el déficit de agua en la isla Rapa Nui que, para efectos de enriquecer el análisis, se calcula directamente como la diferencia entre la demanda y la oferta. Para el futuro cercano, se observa que la demanda hídrica generalmente será cubierta por la oferta natural; sin embargo, en el futuro lejano, se prevé un déficit significativo bajo ambos escenarios de cambio climático, con déficits anuales que podrían alcanzar hasta 50 Mm<sup>3</sup> (aproximadamente 250 mm).

El panel inferior de la Figura 5-11 muestra que la sustentabilidad del sistema hídrico total (SGI) en el período 2030-2059 es superior a la del período 2070-2099, según ambos escenarios de cambio climático.

En el futuro cercano, la sustentabilidad del sistema alcanza cerca del 50% para ambos escenarios SSP, sugiriendo que el sistema es deficiente en términos de sostenibilidad. Se observa también que el usuario menos sustentable es la población flotante, con un índice de sostenibilidad (SI) cercano al 60% para ambos escenarios. La población residente sigue con un índice promedio de aproximadamente 75%, mientras que la población pecuaria tiene un índice cercano al 80%.

Para el futuro lejano, el desempeño del índice de sostenibilidad es considerablemente deficiente para todos los usuarios y, por lo tanto, para el sistema de abastecimiento de la isla, con un SGI que varía entre el 12% y el 38%. En este caso, la población flotante

sigue siendo el usuario menos sostenible, con un SI que, en el mejor de los casos (SSP2-4.5), llega aproximadamente al 45%. La población residente presenta un SI cercano al 50% en el mejor escenario, y la población pecuaria, con un SI de aproximadamente 60% en el escenario SSP2-4.5, muestra un desempeño relativamente mejor, aunque también deficiente.

La variabilidad en los índices de sostenibilidad entre los distintos usuarios de agua en Rapa Nui evidencia la necesidad de enfoques de gestión específicos y adaptados a cada sector. La baja sostenibilidad observada en la población flotante refleja una presión considerable sobre el sistema hídrico, posiblemente exacerbada por demandas estacionales. Además, las proyecciones de déficits más acentuados en el futuro lejano, bajo ambos escenarios de cambio climático, ponen de manifiesto la insuficiencia de las estrategias actuales para enfrentar los desafíos futuros. Estos resultados resaltan la urgencia de desarrollar e implementar medidas de adaptación más robustas, que incluyan la diversificación de fuentes de agua y una gestión eficiente de la demanda. Incorporar estos hallazgos en la planificación a largo plazo es esencial para garantizar una gestión hídrica más resiliente y sostenible en la isla.

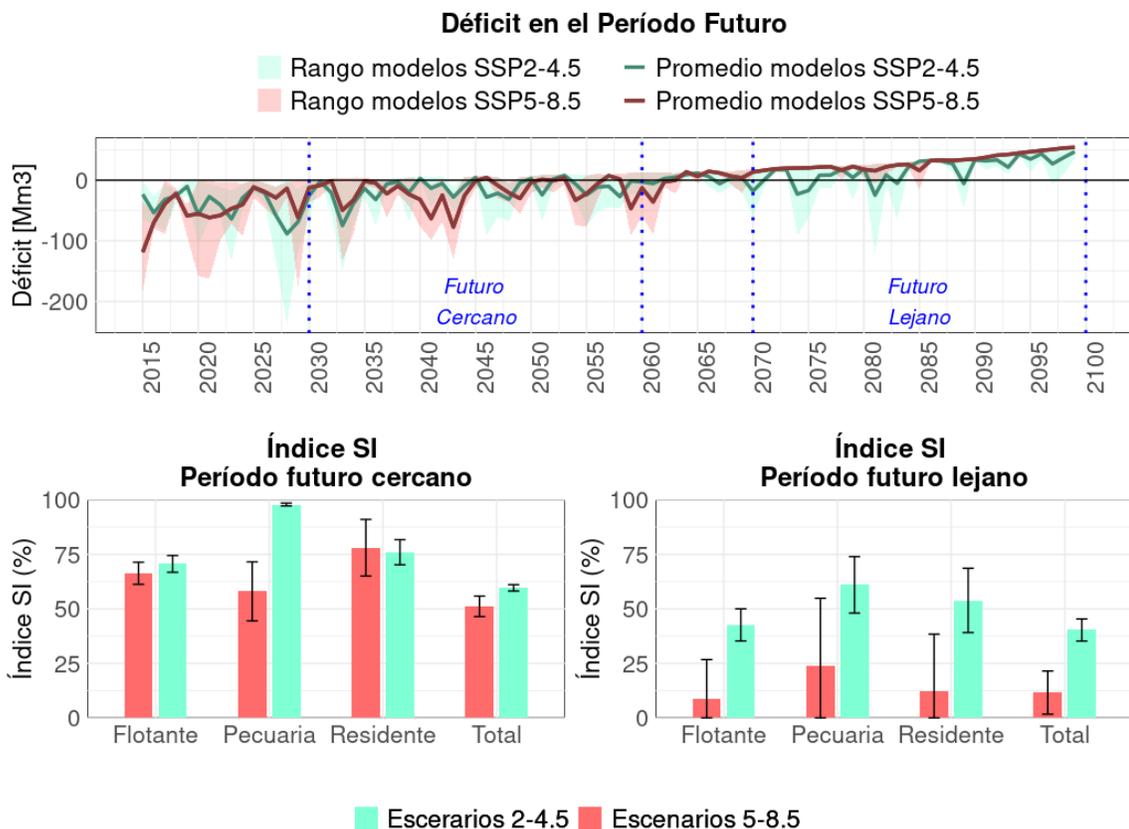


Figura 5-11: El panel superior muestra la serie anual de déficit en la isla Rapa Nui, para ambos escenarios de cambio climático. El panel inferior muestra los índices de sustentabilidad (SI) de cada usuario de agua y del sistema hídrico total, tanto para el período futuro cercano como lejano. Las barras de error representan la dispersión proveniente de los modelos climáticos.

En la Figura 5-12, se descompone el índice SI de cada usuario, con el fin de estudiar la confiabilidad (*Rel*), resiliencia (*Res*), vulnerabilidad (*Vul*) y máximo déficit (*MaxDef*). Se observa que, tanto en el período futuro cercano como lejano, el principal problema del sistema de abastecimiento de Rapa Nui es la vulnerabilidad y el máximo déficit.

La alta vulnerabilidad sugiere que, aunque los déficits pueden no ocurrir con frecuencia, cuando lo hacen, su impacto es considerable. En este caso, suceden con frecuencia, puesto que la confiabilidad es menor sobre todo en el futuro lejano. Esto indica que el sistema no es lo suficientemente robusto para enfrentar períodos prolongados de escasez de agua, lo que podría tener consecuencias graves para los usuarios.

Por otro lado, el déficit máximo alto indica que, en el peor de los casos, el sistema puede fallar gravemente en satisfacer la demanda, lo que podría provocar crisis significativas de abastecimiento. Esta situación representa un riesgo considerable para la confiabilidad y resiliencia del suministro de agua para los usuarios, lo que puede resultar en pérdidas económicas, una reducción en la productividad agrícola e incluso problemas de salud.

Estos resultados sugieren que la infraestructura hídrica y las prácticas de gestión en Rapa Nui pueden ser inadecuadas para enfrentar el cambio climático proyectado. La alta vulnerabilidad y el déficit máximo indican la necesidad de acciones inmediatas, como mejorar la infraestructura, gestionar mejor la demanda, y diversificar las fuentes de agua, por ejemplo, mediante desalinizadoras o reutilización, para reducir la dependencia de una fuente única y poco confiable.

Suponiendo que la sustentabilidad en el período futuro cercano es aceptable ( $SGI \geq 0,5$ ), aunque aún deficiente, se propone una estrategia para el futuro lejano que consiste en analizar cómo los índices de sostenibilidad (SI) varían a medida que se reduce la demanda en porcentajes. El objetivo es identificar el nivel de reducción que maximiza la métrica de sostenibilidad total del sistema (SGI). En este enfoque, la demanda total se considera como la suma de las demandas de la población flotante y pecuaria, de modo que los habitantes locales no se vean afectados.

En la Figura 5-13 se muestra el índice SI para distintos escenarios de reducción de la demanda en el futuro lejano, considerando ambos escenarios de cambio climático. Se observa que a medida que reduce porcentualmente la demanda total, la sustentabilidad del sistema aumenta. El rango de índice SGI más favorable se encuentra cuando la demanda se reduce en un 90%. Asumiendo esta postura conservadora, el rango máximo de SGI posible de alcanzar en el futuro lejano va entre un 50% y 75% aproximadamente.

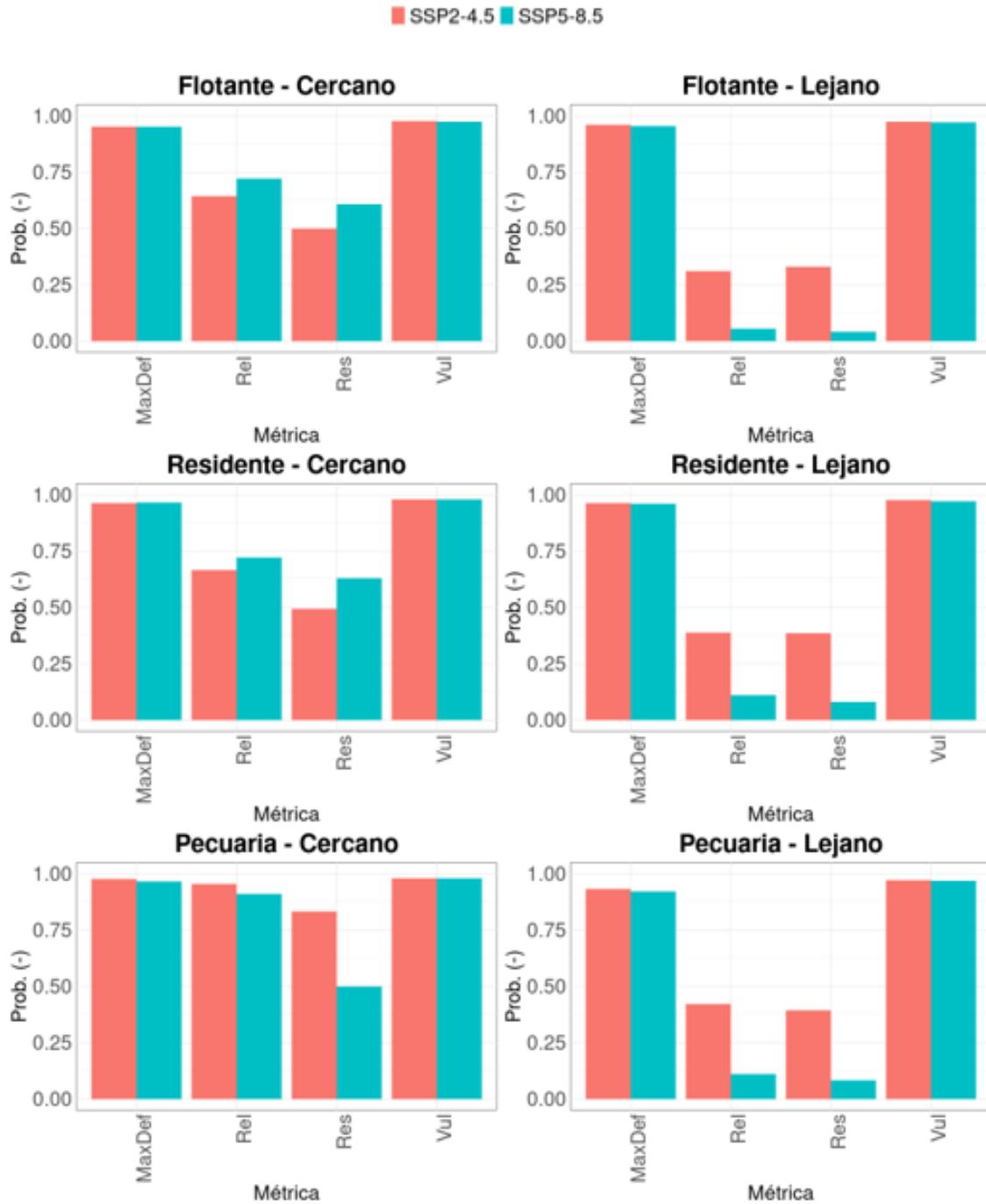


Figura 5-12: Evaluación de desempeño futuro de índice SI según usuario de agua. En el panel izquierdo se encuentra el desempeño del futuro cercano, y en el panel derecho el desempeño del futuro lejano. Las abreviaturas MaxDef, Rel, Res y Vul se refieren a la descomposición del índice SI, máximo déficit, confiabilidad, resiliencia, vulnerabilidad y sustentabilidad, respectivamente.

### Índice SI para distintos escenarios de reducción de la demanda en el futuro lejano

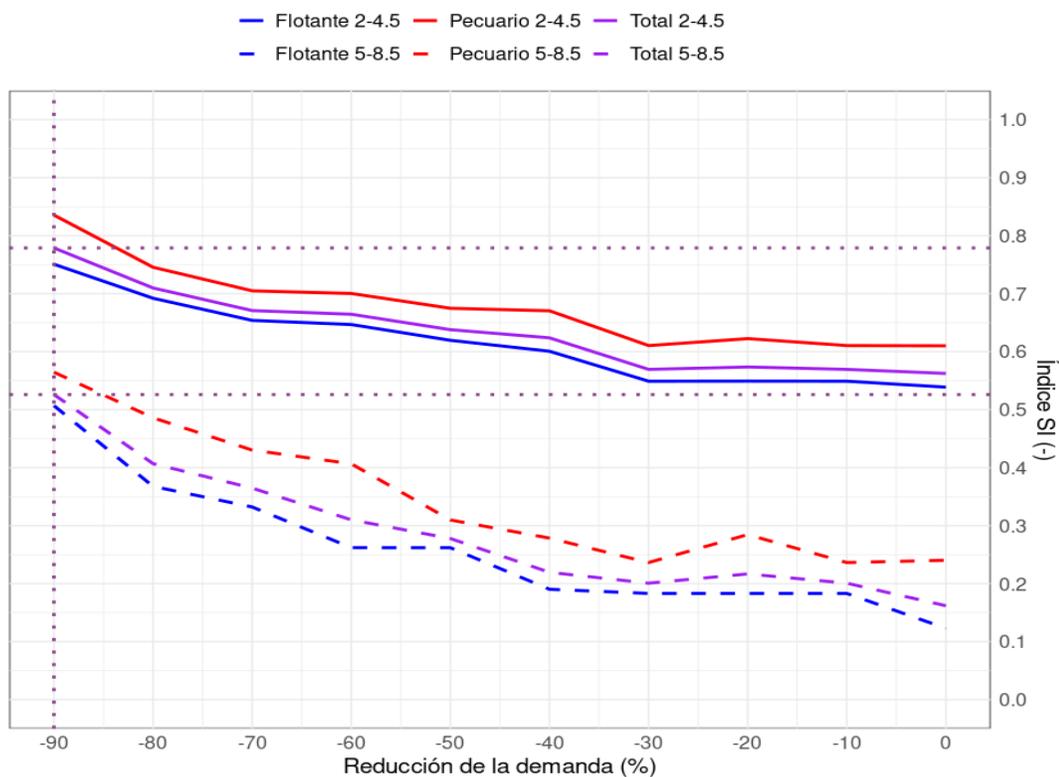


Figura 5-13: Índice SI y SGI para distintos escenarios de reducción de la demanda total (flotante + pecuaria) en el futuro lejano. En líneas punteadas se muestra el valor SGI en el escenario más conservador de reducción de la demanda.

Cuando el sistema total (SGI) alcanza valores críticos, los índices de sustentabilidad (SI) para cada grupo de usuarios muestran variaciones significativas: la población flotante presenta índices entre un 50% y 75%, mientras que la población pecuaria oscila entre un 60% y 84%. Estos valores reflejan un aumento notable en comparación con estimaciones anteriores, aunque siguen siendo insuficientes en términos de sustentabilidad. La Figura 5-14 ilustra cómo la implementación de esta política, aunque conservadora, reduciría el déficit, mejorando las proyecciones para el futuro lejano bajo el escenario SSP2-4.5. Sin embargo, en el escenario más desfavorable (SSP5-8.5), aún se proyectan déficits, lo que sugiere que la política necesitaría ajustes adicionales para ser efectiva.



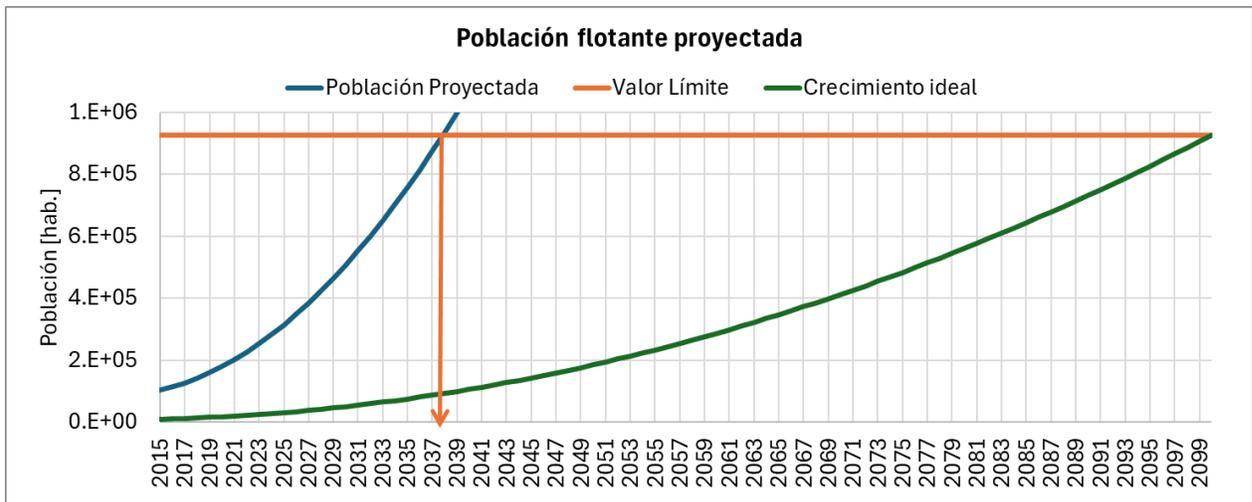


Figura 5-15: Población flotante anual proyectada y crecimiento ideal de la población junto a valor límite al año 2100 que se esperaría tras aplicación de política de reducción del 90% de la demanda.

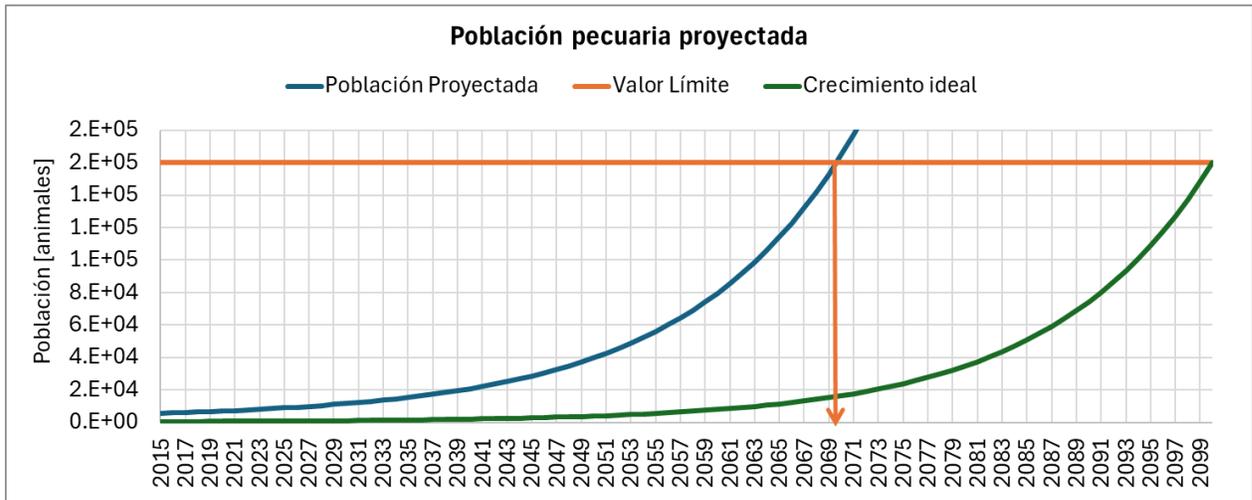


Figura 5-16: Población pecuaria anual proyectada y crecimiento ideal de la población junto a valor límite al año 2100 que se esperaría tras aplicación de política de reducción del 90% de la demanda.

También, es fundamental evaluar la viabilidad de una reducción de demanda tan significativa. Alcanzar un objetivo del 90% requeriría cambios sustanciales en la infraestructura hídrica, los hábitos de consumo de la población y la eficiencia de las actividades productivas. Junto con las políticas de reducción de demanda, sería crucial explorar inversiones en fuentes alternativas de agua, como la desalinización, la recolección de agua de lluvia o la reutilización de aguas residuales tratadas. Estas alternativas no solo aliviarían la presión sobre los recursos existentes, sino que también ofrecerían una mayor flexibilidad para gestionar las necesidades futuras sin depender exclusivamente de la reducción del consumo.

# Capítulo 6: Conclusiones

En este trabajo de investigación, se evaluó la sustentabilidad futura del abastecimiento de agua en la isla Rapa Nui mediante proyecciones de oferta y demanda hídrica. La oferta fue estimada implementando el modelo hidrológico de base física SUMMA, mientras que la demanda hídrica se proyectó considerando el crecimiento de la población flotante, residente y la actividad pecuaria. A partir de los resultados obtenidos, se puede concluir lo siguiente:

1. **Modelo Hidrológico:** La calibración del modelo arrojó un buen desempeño en términos del índice Kling-Gupta ( $KGE = 0,7$ ) y sesgo porcentual ( $PBIAS = -8\%$ ), pero otras métricas como el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y el NSE indican que el modelo no logra capturar plenamente la variabilidad observada en los datos de referencia. En este sentido, es recomendable revisar la metodología de construcción y calibración, así como realizar ajustes locales o validaciones adicionales para mejorar la precisión de las simulaciones. Un desafío importante es la falta de registros directos de ET, necesarios para validar o corregir las estimaciones derivadas de MODIS, que son fundamentales para la calibración del modelo. La ausencia de estos registros implica que cualquier error o sesgo en dichas estimaciones podría afectar considerablemente el desempeño del modelo SUMMA.

## 2. Balance hidrológico histórico y futuro:

o **Período Histórico (1985-2014):** En el período histórico (1985-2014), el modelo estimó una evapotranspiración anual de 987-1,164 mm, que representa el 85-91% de la precipitación, y una recarga de 112-162 mm, equivalente al 9-14% de la precipitación.

o **Futuro Cercano (2030-2059):** Considerando los escenarios de cambio climático SSP2-4.5 y SSP5-8.5, respectivamente, se proyecta una disminución del 2-7% en la precipitación media anual con respecto al período histórico, un aumento de 0,5-1°C en la temperatura media anual, y una reducción en la recarga media anual de 20-98% en promedio.

o **Futuro Lejano (2070-2099):** Las tendencias del futuro cercano se acentúan, con una disminución del 14-25% en la precipitación media anual con respecto al período histórico, un aumento de 1-2°C en la temperatura media anual, y una reducción del 42-100% en la recarga media anual del acuífero, considerando los ambos escenarios de cambio climático.

Estas proyecciones resaltan la urgencia de diseñar políticas de adaptación que aborden los efectos del cambio climático, en específico, del decrecimiento de la recarga del acuífero. La marcada reducción de la recarga en el futuro lejano, que podría alcanzar hasta un 100%, plantea un riesgo considerable para la disponibilidad de agua en la isla, lo que afectaría tanto al suministro urbano como a la agricultura y otros sectores dependientes del agua. La alta variabilidad en los valores de recarga estimados indica que, además de mejorar la precisión de los modelos hidrológicos y el monitoreo, será fundamental la

diversificación de las fuentes de agua, como la desalinización y la recolección de agua de lluvia, para compensar las posibles pérdidas de disponibilidad de agua subterránea.

**3. Oferta Hídrica:** Los resultados del modelo SUMMA-Rapa Nui proyectan disminuciones de la recarga al acuífero, llegando a valores menores a 25 Mm<sup>3</sup> al 2100. De este modo, se refuerza la preocupación sobre la sostenibilidad del recurso hídrico en la isla, puesto que la oferta hídrica tiene un decrecimiento importante. Además, esta recarga al acuífero presenta una incertidumbre significativa, variando entre un 10% y 80% de la precipitación, con un valor promedio recurrente del 30%, según la literatura, mientras que en este estudio se estima igual a un 9% de la precipitación en el período histórico; entre 7-16% de la precipitación en el futuro cercano; y entre 1-12% en el lejano. Esta variabilidad destaca la necesidad de una mayor precisión en los estudios y modelos hidrológicos aplicados a la isla.

**4. Demanda Hídrica:** Se proyecta un crecimiento parabólico en la demanda de la población flotante y residente, y un crecimiento exponencial en la actividad pecuaria, alcanzando al año 2100 demandas de 22 Mm<sup>3</sup>, 12 Mm<sup>3</sup> y 25 Mm<sup>3</sup> respectivamente. Estos resultados sugieren que los crecimientos rápidos en la actividad pecuaria y flotante son preocupantes para los recursos hídricos de la isla, lo que lleva a la recomendación de controlar y reducir estas poblaciones para evitar una sobreexplotación de los recursos.

**5. Sustentabilidad del Sistema Hídrico:** El sistema de abastecimiento de agua en Rapa Nui, bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5, no es sustentable ni en el futuro cercano (2030-2059) ni en el futuro lejano (2070-2099). El rendimiento del índice de sustentabilidad del sistema total (SGI) indica una baja confiabilidad y alta vulnerabilidad, especialmente en la demanda flotante, lo que sugiere la necesidad de enfoques de gestión diferenciados para distintos usuarios de agua.

Finalmente, los resultados obtenidos están en línea con estudios previos sobre proyecciones de cambio climático (DGA, 2019; 2023), confirmando tendencias hacia una disminución de las precipitaciones y la recarga del acuífero, así como un aumento en la temperatura media anual. Estos hallazgos subrayan la urgencia de incorporar medidas de adaptación y planificación estratégica para asegurar un suministro de agua sostenible en el futuro.

Se recomienda realizar estudios adicionales para mejorar la precisión de las forzantes meteorológicas, explorar técnicas alternativas de downscaling y validar los métodos de derivación de forzantes futuras. Además, se sugiere investigar soluciones complementarias, como la desalinización y la recolección de agua de lluvia, para diversificar las fuentes de agua y fortalecer la resiliencia del sistema hídrico ante los desafíos futuros.

# Bibliografía

- Álamos, & Peralta. (1992). Recursos Hídricos de Isla de Pascua: estudio del regadío de Isla de Pascua, I etapa: estudio hidrogeológico. *Comisión Nacional de Riego, Santiago, Chile*, 130pp.
- Barros, A. P., & Lettenmaier, D. P. (1994). Dynamic modeling of orographically induced precipitation. *Rev. Geophys*, 32, 265–284. doi:10.1029/94RG00625.
- Cannon, A. (2018). Multivariate quantile mapping bias correction: an N-dimensional probability density function transform for climate model simulations of multiple variables. *Clim Dyn* 50, 31-49. doi: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? *J. Climate*, 28, 6938–6959. doi:https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00754.1
- Chauvin, F., Planton, S., Douville, H., & et al. (2002). Sensitivity of the hydrological cycle to increasing amounts of greenhouse gases and aerosols. *Climate Dynamics* 20, 45–68. doi:https://doi.org/10.1007/s00382-002-0259-3
- CIREN. (2021). Recursos Naturales Comuna de Isla de Pascua. Obtenido de [https://www.sitrural.cl/wp-content/uploads/2022/05/I\\_Pascua\\_rec\\_nat.pdf](https://www.sitrural.cl/wp-content/uploads/2022/05/I_Pascua_rec_nat.pdf)
- Clark, M. P., Vogel, R. M., Lamontagne, J. R., Mizukami, N., Knoben, W. J., Tang, G., & Papalexiou, S. M. (2021). The abuse of popular performance metrics in hydrologic modeling. *Water Resources Research*, 57(9). doi:e2020WR029001
- Clark, M., Nijssen, B., Lundquist, J., Kavetski, D., Rupp, D., Woods, R., . . . Rasmussen, R. (2015a). A unified approach for process-based hydrologic modeling: 1. Modeling concept. *Water Resour. Res.*, 51, 2498–2514. doi:10.1002/2015WR017198
- Clark, M., Nijssen, B., Lundquist, J., Kavetski, D., Rupp, D., Woods, R., . . . Rasmussen, R. (2015b). A unified approach for process-based hydrologic modeling: 2. Model implementation and case studies. *Water Resour. Res.*, 51, 2515–2542. doi:10.1002/2015WR017200
- Clark, M., Nijssen, B., Lundquist, J., Kavetski, D., Rupp, D., Woods, R., . . . Rasmussen, R. (2015c). The structure for unifying multiple modeling alternatives (SUMMA), Version 1.0: Technical Description. *NCAR Technical Note NCAR/TN-514+STR*, 50. doi:10.5065/D6WQ01TD
- Copernicus Climate Change Service, C. D. (2021). doi:10.24381/cds.c866074c

- Dembélé, M., Ceperley, N., Zwart, S., Salvadore, E., Mariethoz, G., & Schaeffli, B. (2020). Potential of satellite and reanalysis evaporation datasets for hydrological modelling under various model calibration strategies. *Advances in Water Resources*, 143(103667), ISSN 0309-1708. doi:<https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2020.103667>
- DGA. (2010). Caracterización Hidrogeológica de la isla de Pascua. *S.I.T. N° 213*. Obtenido de <https://snia.mop.gob.cl/sad/SUB5214.pdf>
- DGA. (2017). Estimación de la demanda actual, proyecciones futuras y caracterización de la calidad de los recursos hídricos en Chile. Obtenido de <https://snia.mop.gob.cl/repositoriodga/>
- DGA. (2017). ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA ACTUAL, PROYECCIONES FUTURAS Y CARACTERIZACIÓN DE LA CALIDAD DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN CHILE .
- DGA. (2019). *Aplicación de la Metodología de Actualización del Balance Hídrico Nacional, SIT N° 444*. Santiago, Chile, Chile: Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación. Elaborado por: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- DGA. (2022). *Homologación del cálculo hidrológico para la estimación de la oferta natural de agua histórica y futura en Chile. SIT N° 524*. Santiago, Chile: Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación. Elaborado por: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- DGA. (2023). *Índice Hídrico para la Capacidad de Carga en Rapa Nui, SDT-455*. Obtenido de <https://snia.mop.gob.cl/PIA/handle/20.500.13000/126320>
- Duan, Q., Gupta, V., & Sorooshian, S. (1993). Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization. *J Optim Theory Appl*, 76, 501-521. doi: <https://doi.org/10.1007/BF00939380>
- ECCC. (03 de 2019). *Environment and Climate Change Canada*. Recuperado el 03 de 2024, de <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/climate-change/causes.html>
- ECCC. (2023). *Environment and Climate Change Canada*. Recuperado el 2023, de <https://climate-scenarios.canada.ca/?page=cmip6-overview-notes>
- Emanuel, K. A. (2003). Tropical cyclones. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 75-104. doi:<https://doi.org/10.1146/annurev.earth.31.100901.141259>
- Gateño, F., Mendoza, P., Vásquez, N., Jiménez, H., Jerez, C., Lagos-Zúñiga, M., . . . Montserrat, S. (2023). Evaluating CMIP6 Models for climate impact assessments in Chile. doi:10.22541/essoar.169081521.10708502/v1.

- Gatica, C., & Toro, I. (2021). Poyección de la frecuencia de eventos de sequía para Rapa Nui Escenarios de Cambio Climático RCP 4,5 y 8,5. *SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA. XXIV CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA.*
- Greene, A., Hellmuth, M., & Lumsden, T. (2012). Stochastic decadal climate simulations for the Berg and Breede Water Management Areas, Western Cape province, South Africa. *Water Resour.* doi:10.1029/2011WR011152
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377, 80-91. doi:https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003
- Hrachowitz, M., & Clark, M. (2017). HESS Opinions: The complementary merits of competing modelling philosophies in hydrology. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* doi:https://doi.org/10.5194/hess-21-3953-2017
- INE. (2017). Censo de población y vivienda 2017: Resultados generales. Obtenido de <https://www.ine.gob.cl/estadisticas/sociales/censos-de-poblacion-y-vivienda/censo-de-poblacion-y-vivienda>
- IPCC. (2001). *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K.
- IPCC. (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller.
- IPCC. (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley.
- IPCC. (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. Geneva, Switzerland: Core Writing Team, H. Lee and J. Romero. doi:10.59327/IPCC/AR6-9789291691647

- Iziomon, M., Mayer, H., & Matzarakis, A. (2003). Downward atmospheric longwave irradiance under clear and cloudy skies: Measurement and parameterization. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 65(10), 1107-1116. doi:https://doi.org/10.1016/j.jastp.2003.07.007
- Juwana, I., Muttill, N., & Perera, B. (2012). Indicator-based water sustainability assessment – A review. *Science of The Total Environment*, 438, 357-371. doi:https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.08.093
- Karamouz, M., Mohammadpour, P., & Mahmoodzadeh, D. (2017). Assessment of Sustainability in Water Supply-Demand Considering Uncertainties. *Water Resources Management* 31, 3761–3778. doi:https://doi.org/10.1007/s11269-017-1703-9
- Knoben, W. J., Freer, J. E., & Woods, R. A. (2019). Technical note: Inherent benchmark or not? Comparing Nash–Sutcliffe and Kling–Gupta efficiency scores. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 23, 4323–4331. doi:https://doi.org/10.5194/hess-23-4323-2019, 2019
- Lall, U., & Sharma, A. (1996). A Nearest Neighbor Bootstrap For Resampling Hydrologic Time Series. *Water Resour. Res.* doi:10.1029/95WR02966
- Lente, G., & Ósz, K. (2020). Barometric formulas: various derivations and comparisons to environmentally relevant observations. *ChemTexts*, 6(13). doi:https://doi.org/10.1007/s40828-020-0111-6
- Loucks, D. (1997). Quantifying trends in system sustainability. *Hydrological Sciences Journal*, 42:4, 513-530. doi:10.1080/02626669709492051
- Markham, A., Osipova, E., Lafrenz Samuels, K., & Calda, A. (2016). *World Heritage and Tourism in a Changing Climate*. Paris, France: United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya and United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.
- Mendoza, P. A., Clark, M. P., Mizukami, N., Newman, A. J., Barlage, M., Gutmann, E., & Arnold, J. R. (2015). Effects of hydrologic model choice and calibration on the. *Journal of Hydrometeorology*, 16(2), 762-780. doi:10.1175/JHM-D-14-0104.1
- Milad, C. (2010). Diagnóstico de los Recursos Hídricos Subterráneos de Isla de Pascua. *MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL. Facultad de Ciencias Físicas y Matemática. Universidad de Chile*.
- Mitchell, J. F. (1989). *The "Greenhouse" effect and climate change*. *Rev. Geophys.* doi:10.1029/RG027i001p00115
- Modelo Hidrogeológico de la Isla de Pascua, Región V. (2013). *Schlumberger Water Services*.
- Montgomery, E., & Associates, I. (2011). Condiciones hidrogeológicas Isla de Pascua, Chile. *S.I.T. N° 229*.

- Moriasi, D., Arnold, J., Van Liew, M., Bingner, R., Harmel, R., & Veith, T. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900. doi:10.13031/2013.23153
- Muñoz, C. (2004). Geomorfología de Isla de Pascua. *Universidad de Chile*.
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. *J. Hydrol.*(10), 282-290. doi:https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6
- NOAA. (2014). *Climate Models. Science & Information for a Climate-Smart Nation*. Recuperado el 2023, de <https://www.climate.gov/maps-data/climate-data-primer/predicting-climate/climate-models>
- O'Neill, B. C., Tebaldi, C., van Vuuren, D. P., Eyring, V. F., Friedlingstein, P., Hurtt, G., . . . Sanderson, B. M. (2016). The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geosci. Model Dev.*, 3461-3482. doi:https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016, 2016
- Quilliam, L., Cox, R., Campbell, P., & Wright, M. (2014). Coastal climate change impacts for Easter Island in 2100. In *Coasts and Ports 2011: Diverse and Developing: Proceedings of the 20th Australasian Coastal and Ocean Engineering Conference and the 13th Australasian Port and Harbour Conference*. Engineers Australia. doi:https://search.informit.org/doi/10.3316/informit.720234165972688
- Rajagopalan, B., & Lall, U. (1999). A k-nearest-neighbor simulator for daily precipitation and other weather variables. *Water Resour*, 35(10), 3089-3101. doi:10.1029/1999WR900028
- Rummukainen, M. (1997). Methods for statistical downscaling of GCM simulations. *RMK, Rapport Meteorologi och Klimatologi*. Obtenido de <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:smhi:diva-2602>
- Sandoval-Solis, S., McKinney, D. C., & Loucks, D. (2011). Sustainability Index for Water Resources Planning and Management. *Sandoval-Solis, S., McKinney, D. C., & Loucks, D. P. (2011). Sustainability Index for Water Resources Planning and Management. Journal of Water Resources Planning and Management*, 137(5), 381-390. doi:10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000134
- SERNATUR. (s.f.). Recuperado el 2024, de <https://www.sernatur.cl/informes-estadisticos/>
- Spak, S., Holloway, T., Lynn, B., & Goldberg, R. (2007). A comparison of statistical and dynamical downscaling for surface temperature in North America. *J. Geophys. Res.*, 112, D08101. doi:https://doi.org/10.1029/2005JD006712

- Toro, I., Morales, H., Loyola, C., & Chadwick, C. (2023). Proyección de precipitaciones máximas y precipitación máxima probable para Rapa Nui, Escenarios SSP 2-4,5 Y 5-8,5. *SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA. XXVI CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA.*
- Towner, J., Cloke, H., Zsoter, E., Flamig, Z., Hoch, J., Bazo, J., . . . M. Stephens, E. (2019). Assessing the performance of global hydrological models for capturing peak river flows in the Amazon basin. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* doi:<https://doi.org/10.5194/hess-23-3057-2019>
- Último informe del IPCC: Evidencias del calentamiento global. (2014). *Revista Beauchef Magazine (1er semestre 2014).* Obtenido de <https://ingenieria.uchile.cl/noticias/102126/ultimo-informe-del-ipcc-evidencias-del-calentamiento-global>
- Zillman, J. (1972). Study of Some Aspects of the Radiation and Heat Budgets of the Southern. *Meteorol. Stud. Rep. 26, Bur. of Meteorol., Dep. of Inter., Canberra, ACT.*

# Anexos

# Anexo A: Parámetros de calibración

En la Tabla A-1 se presentan los parámetros utilizados para la calibración del modelo SUMMA, además de su descripción, rango y valor óptimo.

Tabla A-1: Nombre, descripción, rango y valor óptimo de parámetros utilizados para la calibración del modelo hidrológico SUMMA para la isla Rapa Nui.

	Parámetro	Descripción	Unidad	Rango de calibración		Valor óptimo
				Mín.	Máx.	
1	frozenPrecipMultip	Multiplicador de precipitación congelada	-	5.000	1.5	7.96E-01
2	rootingDepth	Profundidad de las raíces	m	0.01	10	3.99E+00
3	rootDistExp	Exponente que controla la distribución vertical de la densidad de raíces	-	0.01	1	9.62E-01
4	theta_sat	Porosidad	-	384	0.6	5.95E-01
5	theta_res	Contenido volumétrico de agua residual	-	1	0.1	1.26E-02
6	vGn_alpha	Parámetro Van Genuchten "alpha"	1/m	-1	-0.01	-1.14E-01
7	vGn_n	Parámetro Van Genuchten "n"	-	1	2	1.26E+00
8	k_soil	Conductividad hidráulica del suelo	m/s	1,00E-07	1,00E-04	6.97E-06
9	critSoilWilting	Contenido volumétrico crítico de agua líquida cuando las plantas se marchitan	-	0	1	2.23E-02
10	critSoilTranspire	Volumen crítico de contenido de agua líquida cuando la transpiración está limitada	-	0	1	8.42E-01
11	winterSAI	Índice de área del tallo antes del inicio de la temporada de crecimiento	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	100	3	1.46E-01
12	summerLAI	Índice máximo de área foliar en el peak de la temporada de crecimiento	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	0.01	10	1.26E+00
13	heightCanopyTop	Altura de la parte superior del dosel de la vegetación por encima de la superficie del suelo	m	5	100	9.96E+01
14	heightCanopyBottom	Altura de la parte inferior del dosel de la vegetación por encima de la superficie del suelo	m	0	5	4.95E+00
15	albedoDecayRate	Tasa de decaimiento del albedo	s	0.1E+06	5,00E+06	3.65E+06
16	tempCritRain	Temperatura crítica donde la precipitación es líquida	K	272.16	274.16	2.74E+02

# Anexo B: Series estacionales y distribución media anual de forzantes históricas

A continuación, se presentan las Curvas de Variación Estacional de las variables de velocidad del viento, humedad relativa, radiación de onda corta (SWR), onda larga (LWR) y presión utilizadas para ejecutar el modelo SUMMA en la isla Rapa Nui. Además, al lado de cada CVE se adjunta un mapa de distribución media anual de la variable.

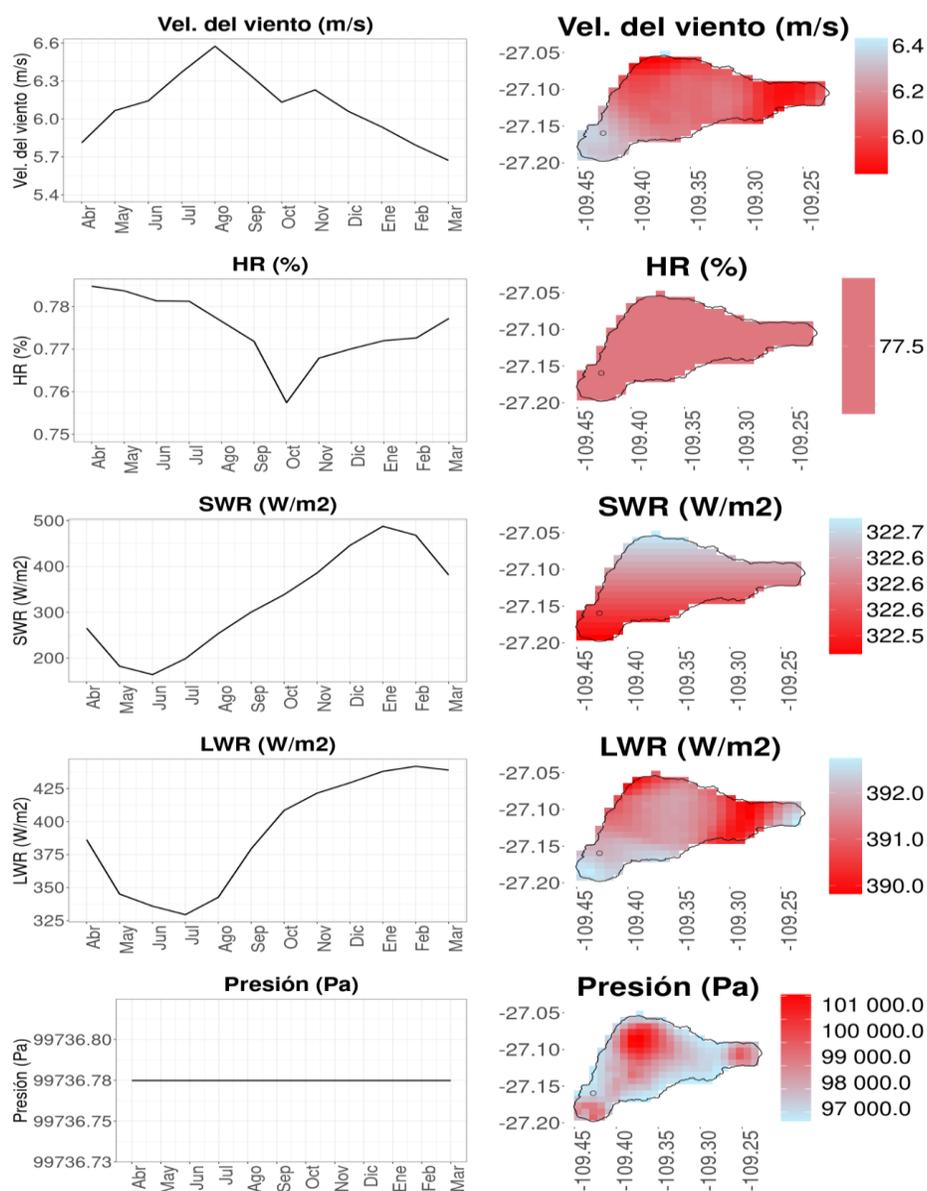


Figura B-1: En el panel izquierdo, se presentan las curvas de variación estacional de las forzantes meteorológicas utilizadas para la ejecución del modelo hidrológico SUMMA para la isla Rapa Nui.

En el panel derecho se presentan los mapas de distribución media anual de aquellas variables.

# Anexo C: Evaluación de desempeño histórico de GCMs crudos

A continuación, se presentan bloxplots con los resultados del índice PPI y sus criterios individuales, que incluyen, montos anuales, variabilidad interanual, amplitud estacional y distribución probabilística mensual, tanto para precipitación (Figura C-1) y temperatura (Figura C-2). En cada panel se muestra con una línea punteada negra el valor óptimo de cada criterio y se muestra la etiqueta de los mejores cinco modelos.

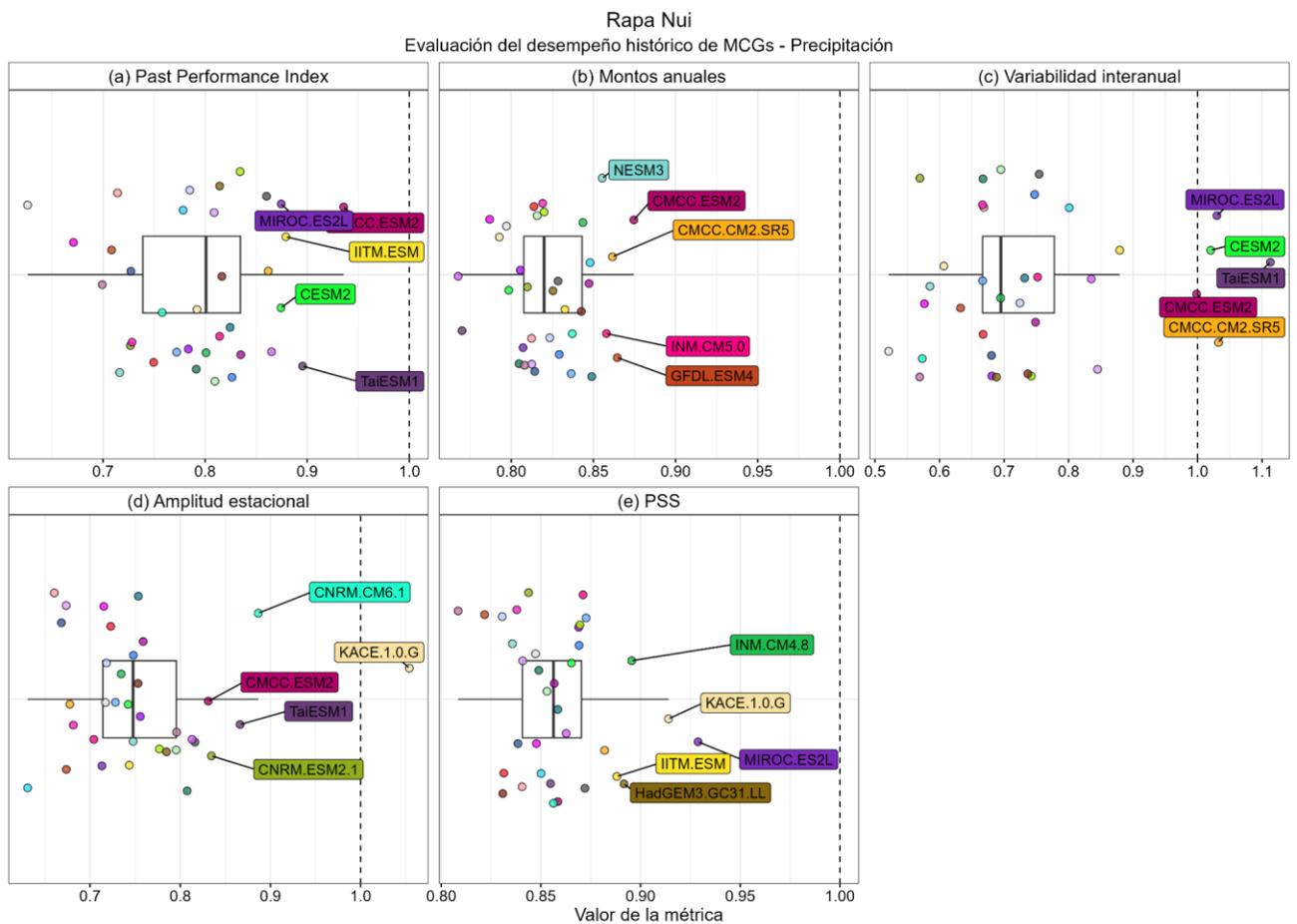


Figura C-1: Desempeño de las componentes del índice PPI de precipitación (a), que incluye montos anuales (b), Variabilidad interanual (c), Amplitud estacional (c) y distribución probabilística mensual o PSS (d). Las etiquetas muestran los cinco mejores modelos según cada criterio.

Rapa Nui  
Evaluación del desempeño histórico de MCGs - Temperatura

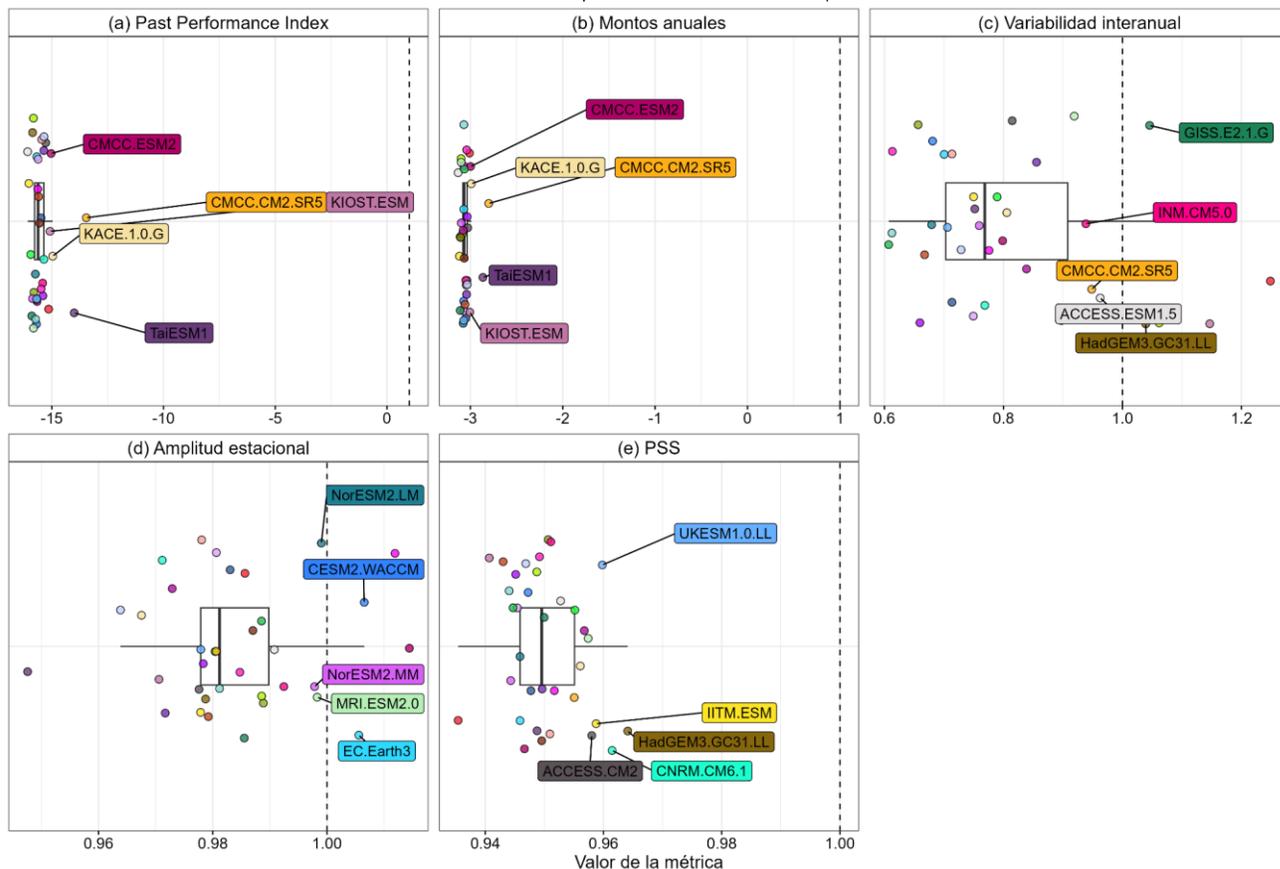


Figura C-2: Desempeño de las componentes del índice PPI de temperatura (a), que incluye montos anuales (b), Variabilidad interanual (c), Amplitud estacional (c) y distribución probabilística mensual o PSS (d). Las etiquetas muestran los cinco mejores modelos según cada criterio.

# Anexo D: Resultados downscaling

En la Figura D-1 se presentan las curvas de variación estacional de precipitación y temperatura obtenidas mediante la aplicación del método MBCn para reescalar estadísticamente los datos. El ajuste de las precipitaciones muestra un buen desempeño con el modelo MPI.ESM1.2.LR, indicando que este modelo reproduce de manera efectiva los patrones mensuales de precipitación observados. Sin embargo, los modelos TaiESM1 y CMCC.CM2.SR5 tienden a subestimar los montos mensuales de precipitación, lo que podría estar vinculado a la función utilizada para calcular el valor traza en el método MBCn. Esta función es crucial para el proceso de reescalado, ya que determina cómo se ajustan las proyecciones de precipitación a las condiciones históricas observadas. La subestimación sugiere que la función puede no estar capturando adecuadamente la variabilidad estacional de estos modelos, lo que afecta la precisión de las estimaciones. En contraste, el ajuste de la temperatura es adecuado durante todos los meses de la curva, lo que sugiere que los modelos han logrado representar correctamente los patrones térmicos a lo largo del año.

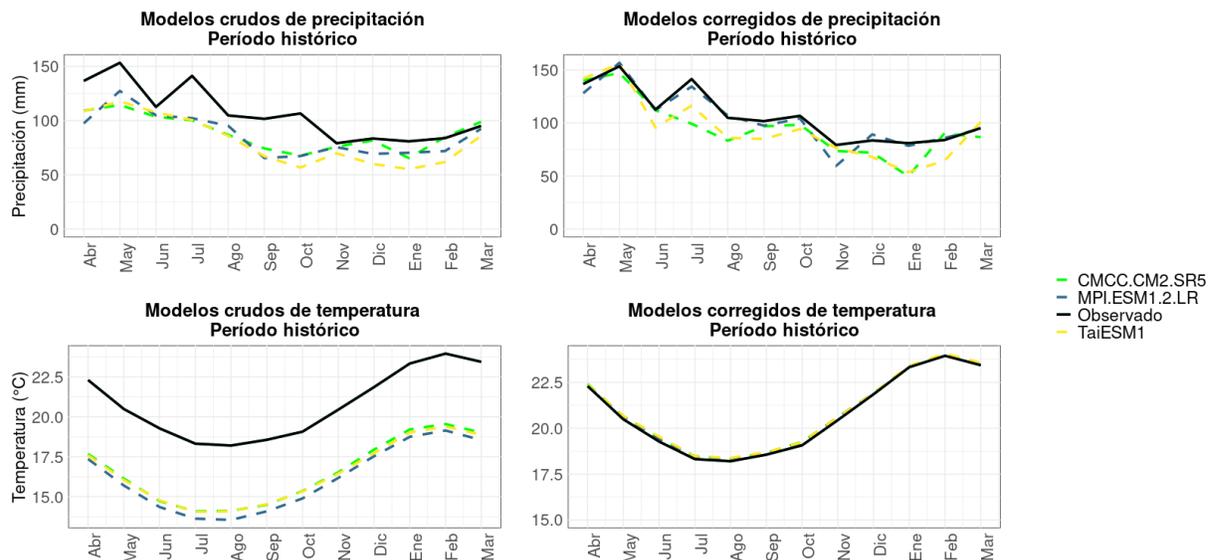


Figura D-1: Curvas de variación estacional de modelos GCMs crudos (panel izquierdo) y corregidos con método MBCn (panel derecho), tanto para precipitación (panel superior) como temperatura (panel inferior). En línea sólida de color negro se muestran las observaciones y en líneas punteadas de colores los tres modelos seleccionados.

También, se estudia la serie anual del número de días con precipitación (P) mayor o igual a 0,05 mm. En la Figura D-2 se muestran los días observados y modelados con  $P > 0,5$  mm, tanto sin corregir (panel izquierdo) como corregidos (panel derecho). En este caso, la corrección con el método MBCn es deficiente, pues la representación de la frecuencia de precipitaciones es, en general, subestimada. El mejor ajuste lo realiza el modelo MPI.ESM1.2.LR, sin embargo, TaiESM1 subestima de manera importante este criterio.

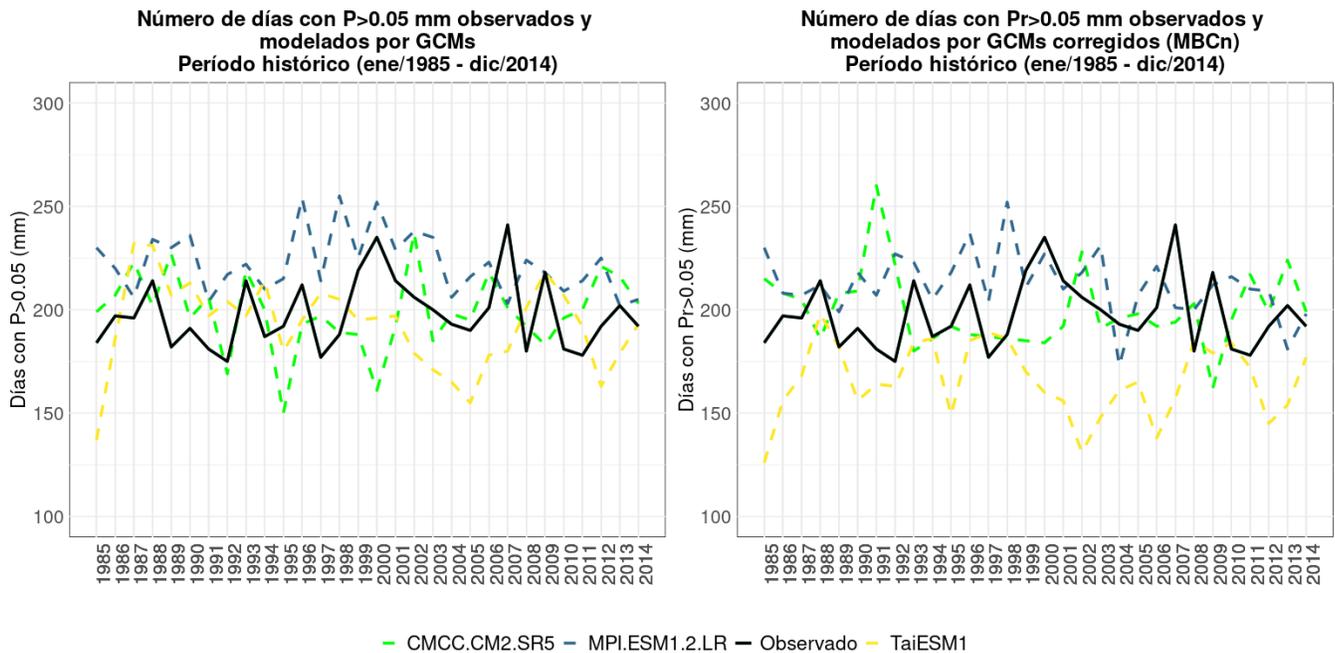


Figura D-2: Serie anual de número de días con precipitación (P) mayor a 0,05 mm. Las observaciones se representan con una línea sólida negra (Mataverí) y los modelos seleccionados se representan con líneas punteadas de colores.

# Anexo E: Resultados método KNN

En este Anexo se muestran los resultados de la aplicación del método KNN para obtener forzantes históricas y futuras mediante la búsqueda aleatoria en el período histórico.

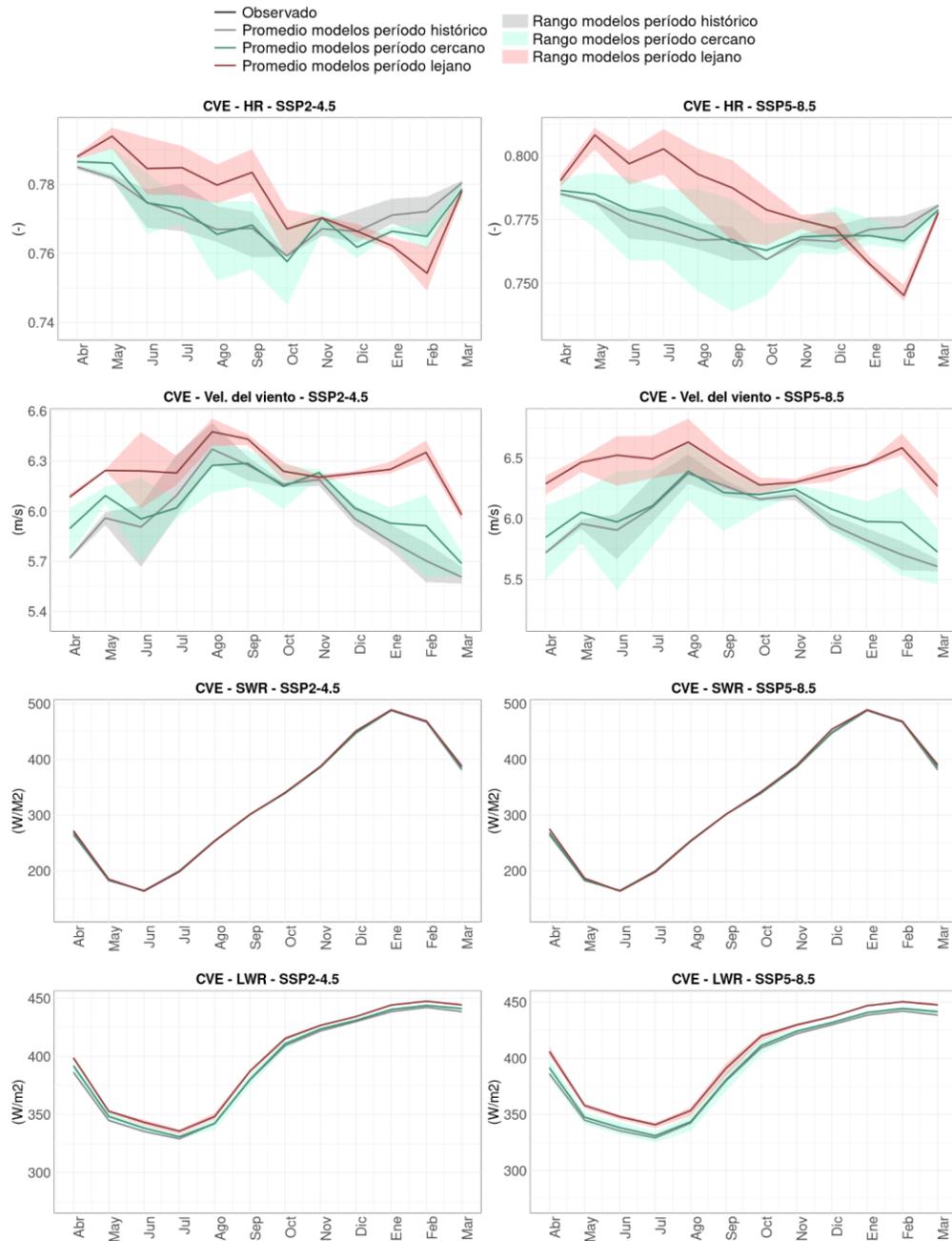


Figura E-1: Curvas de variación estacional de las forzantes Humedad Relativa (HR), Velocidad del viento, Radiación de onda corta (SWR) y larga (LWR), para los escenarios de cambio climático SSP2-4.5 y SSP5-8.5, para los períodos histórico, futuro cercano y futuro lejano.

# Anexo F: Distribución espacial de variables meteorológicas históricas

En este Anexo se muestra la distribución espacial de la evapotranspiración (ET), escurrentía (Q) y recarga simuladas por el modelo SUMMA-Rapa Nui para el período histórico, utilizando forzantes observadas (Figura F-1) y datos de los modelos CMCC.CM2.SR5 (Figura F-2), MPI.ESM1.2.LR (Figura F-3) y TaiESM1 (Figura F-4).

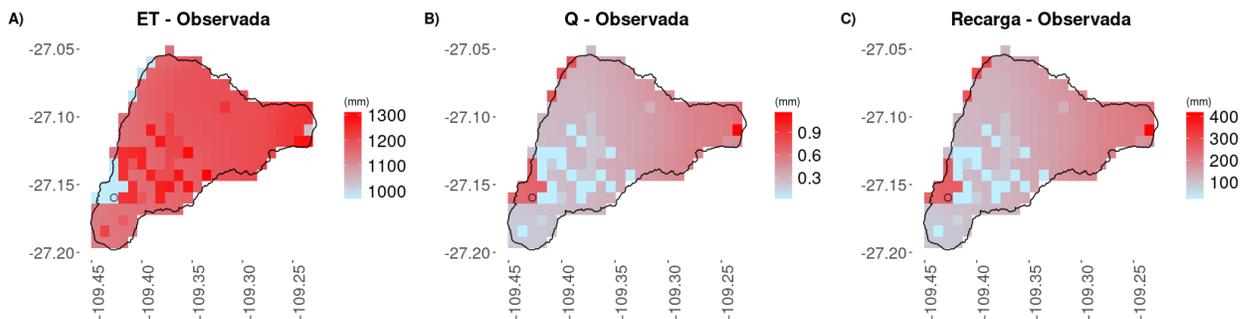


Figura F-1: Distribución espacial de ET (A), Q (B), y Recarga (C) simuladas por el modelo SUMMA-Rapa Nui para el período 1985-2014, a partir de forzantes meteorológicas observadas.

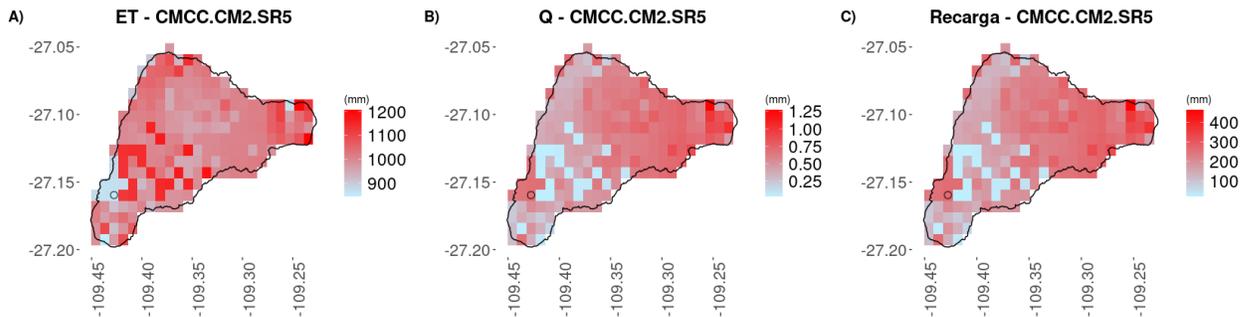


Figura F-2: Distribución espacial de ET (A), Q (B), y Recarga (C) simuladas por el modelo SUMMA-Rapa Nui para el período 1985-2014, a partir de datos del modelo CMCC.CM2.SR5.

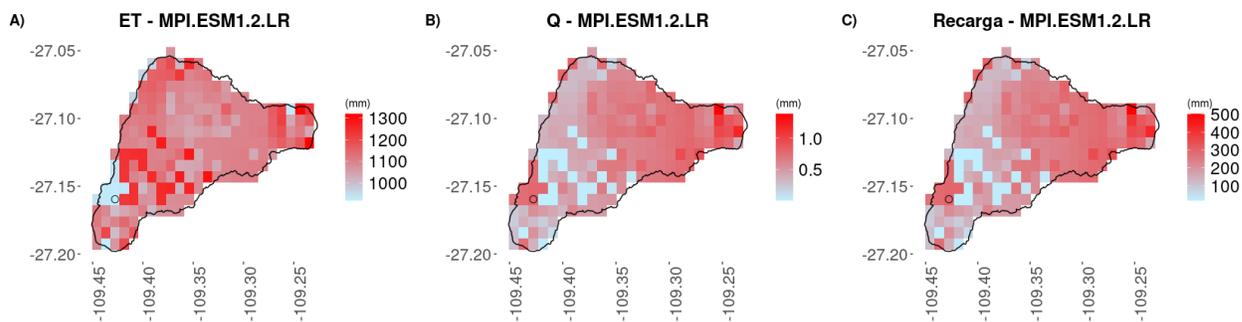


Figura F-3: Distribución espacial de ET (A), Q (B), y Recarga (C) simuladas por el modelo SUMMA-Rapa Nui para el período 1985-2014, a partir de datos del modelo MPI.ESM1.2.LR.

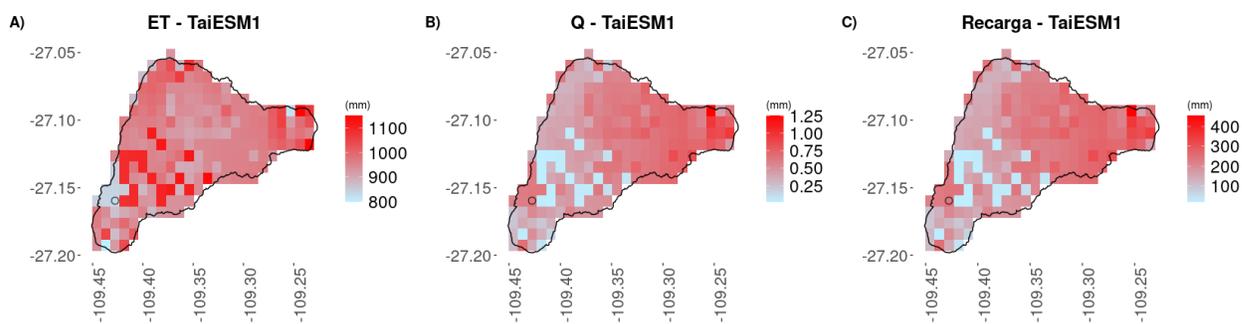


Figura F-4: Distribución espacial de ET (A), Q (B), y Recarga (C) simuladas por el modelo SUMMA-Rapa Nui para el período 1985-2014, a partir de datos del modelo TaiESM1.