



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA
Departamento de Obras Civiles

Evaluación de extremos climáticos de precipitación y proyecciones de cambio climático en Chile continental.

Memoria de Título presentada por

Ricardo Corbett Canales

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

Ingeniería Civil

Profesor Guía

Miguel Lagos Zúñiga

Agosto, 2026



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Evaluación de extremos climáticos de precipitación y proyecciones de cambio climático en Chile continental.

Nombre del candidato(a): Ricardo Corbett Canales

Carrera / Grado: Ingeniería Civil

Campus: San Joaquín Departamento: Obras Civiles

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

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

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

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

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

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

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

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

4.- FIRMAS

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

Fecha: 21-09-2026

Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 21-09-2026

Firma: 

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

Resumen

En las últimas décadas, Chile ha experimentado distintos eventos climáticos extremos, especialmente precipitaciones intensas, que han generado impactos sobre la población y daños a la infraestructura. El estudio de estos eventos y la evaluación de sus posibles cambios futuros requieren simulaciones climáticas, para lo cual en este trabajo se emplean los modelos climáticos globales. Aunque existen estudios que analizan el desempeño y las proyecciones de los GCMs, aún persisten incertidumbres respecto de su capacidad para representar eventos extremos. En este contexto, el presente estudio evalúa la representación histórica de los extremos en cinco macrozonas climáticas de Chile continental mediante los índices de precipitación diaria máxima anual (Rx1day), precipitación diaria asociada a un período de retorno de 10 años (R10y) y temperatura media diaria asociada al día de Rx1day (T4Rx1day). Para ello, se evalúa el desempeño histórico de modelos pertenecientes a la quinta y sexta fases del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados, CMIP5 y CMIP6, utilizando estaciones meteorológicas como referencia observacional. La evaluación considera la razón entre las medias ($M\mu$), la razón entre las desviaciones estándar ($M\sigma$), el índice de desempeño pasado (PPI) y la distancia euclidiana (ED). A partir de estas métricas se construyen rankings de desempeño para cada macrozona mediante dos enfoques de cálculo, espacial y temporal. Posteriormente, se selecciona el 60 % de los modelos con menor ED y se aplica un filtro por genealogía de código, conservando solo un modelo por familia en cada macrozona. Finalmente, se comparan las proyecciones obtenidas con el conjunto completo de modelos con aquellos obtenidas mediante los modelos de mejor desempeño por macrozona hacia finales del siglo, considerando dos escenarios futuros SSP2-4.5 y SSP5-8.5. Los resultados muestran que CMIP6 mejora la representación de los extremos climáticos respecto de CMIP5 en la mayoría de las macrozonas. En términos generales, CMIP6 presenta valores de $M\mu$ y $M\sigma$ más cercanos al óptimo, aunque se observan algunas excepciones en el Norte Lejano y la Zona Austral, dependiendo del índice y del enfoque utilizado. Además, los modelos con mejor desempeño cambian según la macrozona y el enfoque de cálculo, lo que muestra que no existe un GCM óptimo para todo Chile. En cuanto a las proyecciones futuras, bajo el escenario SSP5-8.5 y utilizando el conjunto de mejor desempeño espacial, se observan disminuciones de Rx1day desde Chile Central hacia el sur del país. Chile Central presenta la mayor reducción, con un cambio porcentual promedio de -15.08% , donde el 90% de los píxeles varía entre -18.79% y -10.61% , seguido de Chile Sur, con una disminución promedio de -8.85% . En cambio, el Norte Lejano muestra un aumento promedio porcentual de $+9.75\%$, con cambios entre $+0.88\%$ y $+18.60\%$, mientras que la Zona Austral presenta un aumento promedio de $+6.65\%$. Por otro lado, el Norte Cercano mantiene una señal mixta, con un cambio promedio de 0.58% y valores entre -15.99% y $+30.22\%$ siendo considerada como una zona de transición. Para la temperatura asociada a estos eventos de precipitación (T4Rx1day), se observan aumentos en todas las macrozonas, con mayores incrementos en el Norte Cercano y el Norte Lejano, donde alcanzan cambios de $+4.54^{\circ}\text{C}$ y $+4.19^{\circ}\text{C}$, respectivamente, mientras que en Chile Sur y la Zona Austral los aumentos son menores, con valores de $+2.01^{\circ}\text{C}$ y $+2.61^{\circ}\text{C}$ respectivamente en comparación al periodo histórico. Este análisis permite identificar los modelos que representan mejor los eventos extremos en cada macrozona y evaluar su posible evolución futura, proporcionando información relevante para la evaluación de riesgos y la adaptación frente al cambio climático en Chile.

Índice

1	Introducción.....	5
1.1	Objetivos.....	6
2	Marco Teórico.....	7
2.1	Antecedentes de la investigación y conceptos teóricos.....	7
2.1.1	Modelos climáticos globales (CMIP6).....	7
2.1.2	Escenarios socioeconómicos compartidos (SSP).....	7
2.1.3	Evidencia observacional en Chile.....	8
2.2	Evaluación de desempeño en modelos climáticos.....	9
2.2.1	Índice de Desempeño Pasado (PPI) y distancia euclidiana (ED).....	10
2.2.2	Índices extremos.....	10
3	Zona de estudio.....	12
4	Metodología.....	14
4.1	Base de datos.....	14
4.2	Cálculo de los índices extremos.....	16
4.2.1	Cálculo espacial.....	16
4.2.2	Cálculo temporal.....	17
4.2.3	Corrección de la temperatura.....	17
4.3	Evaluación de desempeño de los modelos.....	17
4.4	Cambio Climático.....	19
5	Resultados.....	20
5.1	Representatividad de los resultados.....	20
5.1.1	Métrica $M\mu yr$	20
5.1.2	Métrica $M\sigma yr$	22
5.1.3	Índice de desempeño pasado (PPI).....	24
5.2	Ranking final de los modelos con mejor desempeño.....	26
5.3	Mapas de cambio climático CMIP6.....	28
5.3.1	Rx1day bajo los enfoques espacial y temporal.....	28
5.3.2	T4Rx1day bajo los enfoques espacial y temporal.....	30
5.3.3	R10y bajo los enfoques espacial y temporal.....	32
6	Discusión.....	35
6.1	Conjunto de mejores modelos.....	35
6.1.1	Proyecciones de modelos seleccionados para extremos vs clima medio.....	36
6.2	Diferencias entre conjuntos CMIP.....	37
6.3	Cambio climático.....	37
6.4	Limitaciones.....	38

7 Conclusiones	39
Referencias	40
Anexos.....	42

Índice de tablas

Tabla 2-1. Índices climáticos extremos del estudio de De Medeiros et al. (2022). Fuente: Adaptada de De Medeiros et al. (2022).	10
Tabla 4-1. Modelos climáticos CMIP6 utilizados.....	15
Tabla 5-1. Promedio del PPI de precipitación PPI_{pr} , temperatura PPI_{tas} y global para los 28 GCMs de CMIP5 y CMIP6, según el enfoque de cálculo y la macrozona. Los valores entre paréntesis corresponden a la desviación estándar.....	26
Tabla 5-2. Ranking de los modelos CMIP6 con mejor desempeño para cada macrozona según los enfoques espacial y temporal. Se presentan los valores de PPI para Rx1day, R10y y T4Rx1day, junto con la distancia euclidiana (ED). Los modelos se encuentran ordenados de menor a mayor ED.....	27
Tabla 5-3. Promedio espacial de los cambios proyectados para Rx1day en cada macrozona, según escenario, conjunto de modelos y enfoque de selección.	30
Tabla 5-4. Promedio espacial de los cambios proyectados para T4Rx1day en cada macrozona, según escenario, conjunto de modelos y enfoque de selección.	32
Tabla 5-5. Cambios promedio proyectados de R10y por escenario y macrozona para el conjunto completo de modelos (ALL) y los subconjuntos de mejor desempeño histórico (BEST) obtenidos mediante los enfoques espacial y temporal. Los cambios de ALL y BEST se expresan porcentualmente respecto del período histórico, mientras que las diferencias BEST – ALL se presentan en mm/día.	34

Índice de ilustraciones

Figura 2-1. Desafíos de mitigación y adaptación de los escenarios SSP. Fuente: adaptado de O'Neill et al. (2014).	8
Figura 3-1. Topografía e índices climáticos observados durante el periodo histórico 1985–2014: a) elevación del terreno; b) precipitación diaria máxima anual (Rx1day); c) precipitación diaria asociada a un periodo de retorno de 10 años (R10y); y d) temperatura media diaria asociada a Rx1day (T4Rx1day).	12
Figura 4-1. Esquema general de la metodología: selección y procesamiento de datos, evaluación del desempeño histórico de los GCMs y proyecciones de cambio climático.....	14
Figura 4-2. Cálculo de Rx1day y T4Rx1day espacial, considerando solo los píxeles que contienen estaciones.	16
Figura 4-3. Cálculo espacial de la desviación estándar de R10y.....	18
Figura 5-1. Boxplot comparativo de $M\mu_{yr}$ para Rx1day considerando el enfoque espacial y temporal en CMIP5 y CMIP6.	20
Figura 5-2. Boxplots comparativos de las medias simuladas y observadas ($M\mu$) de T4Rx1day, obtenidas mediante los enfoques espacial y temporal para las temperaturas corregidas y no corregidas por elevación: a) CMIP5 y b) CMIP6.....	21
Figura 5-3. Comparación de las distribuciones de $M\mu_{yr}$ para R10y obtenidas mediante los enfoques espacial y temporal en CMIP5 y CMIP6.	22
Figura 5-4. Boxplot comparativo de $M\sigma_{yr}$ para Rx1day considerando el enfoque espacial y temporal en CMIP5 y CMIP6.	23
Figura 5-5. Comparación de las distribuciones de $M\sigma_{yr}$ para T4Rx1day obtenidas mediante los enfoques espacial y temporal en CMIP5 y CMIP6.....	23

Figura 5-6. Boxplot comparativo de $M\sigma_{sp}$ para R10y considerando el enfoque espacial de CMIP5 y CMIP6.	24
Figura 5-7. Valores de $PPIR_{x1day} - R10y$ y PPI_{tas} para los modelos CMIP5 y CMIP6 bajo los enfoques espacial y temporal en las cinco macrozonas analizadas. Los colores indican las familias de modelos y la estrella representa el valor óptimo (1.1).	25
Figura 5-8. Cambios proyectados de R_{x1day} para el periodo 2070–2100 mediante el enfoque espacial, bajo los escenarios a) SSP2-4.5 y b) SSP5-8.5. Las columnas presentan el cambio porcentual obtenido con el conjunto completo de modelos (ALL), el conjunto de modelos con mejor desempeño histórico (BEST) y la diferencia absoluta entre ambos conjuntos (BEST – ALL), expresada en mm/día.	29
Figura 5-9. Cambios proyectados de $T4R_{x1day}$ entre los periodos histórico 1985–2014 y futuro 2070–2100, obtenidos mediante el enfoque espacial bajo los escenarios a) SSP2-4.5 y b) SSP5-8.5. Las columnas presentan los resultados del conjunto completo de modelos (ALL), el conjunto de modelos con mejor desempeño histórico (BEST) y la diferencia entre ambos conjuntos (BEST – ALL), expresados en °C...	31
Figura 5-10. Cambios proyectados de R10y mediante el enfoque espacial para los escenarios a) SSP2-4.5 y b) SSP5-8.5. En cada fila se presenta el cambio porcentual obtenido con el conjunto completo de modelos (ALL), el subconjunto de mejor desempeño histórico (BEST) y la diferencia absoluta entre ambos conjuntos (BEST – ALL), expresada en mm/día.	33
Figura 6-1. Series de tiempo, comparando el conjunto completo de GCMs frente a los modelos de mejor desempeño del estudio de Gateño et al. (2024), junto a los modelos en base al ranking espacial para extremos, para el escenario SSP5-8.5.	36

Índice de Anexos

Anexo A. 1. Frecuencia absoluta del PSS para R_{x1day} espacial en el modelo ACCESS-CM2.	42
Anexo A. 2. Ranking de los mejores modelos por macrozona para el conjunto CMIP5.	43
Anexo A. 3. Cambios proyectados de R_{x1day} para el periodo 2070–2100 mediante el enfoque temporal, bajo los escenarios a) SSP5-8.5 y b) SSP2-4.5. Las columnas presentan el cambio porcentual obtenido con el conjunto completo de modelos (ALL), el conjunto de modelos con mejor desempeño histórico (BEST) y la diferencia absoluta entre ambos conjuntos (BEST – ALL), expresada en mm/día.	44
Anexo A. 4. Cambios proyectados de $T4R_{x1day}$ entre los periodos histórico 1985–2014 y futuro 2070–2100, obtenidos mediante el enfoque temporal bajo los escenarios a) SSP2-4.5 y b) SSP5-8.5. Las columnas presentan los resultados del conjunto completo de modelos (ALL), el conjunto de modelos con mejor desempeño histórico (BEST) y la diferencia entre ambos conjuntos (BEST – ALL), expresados en °C...	45
Anexo A. 5. Cambios proyectados de R10y mediante el enfoque temporal para los escenarios a) SSP2-4.5 y b) SSP5-8.5. En cada fila se presenta el cambio porcentual obtenido con el conjunto completo de modelos (ALL), el subconjunto de mejor desempeño histórico (BEST) y la diferencia absoluta entre ambos conjuntos (BEST – ALL), expresada en mm/día.	46
Anexo A. 6. Ranking modelos, sin seleccionar el 60% de menor ED y sin filtrar por familia.	47

1 Introducción

El cambio climático ha aumentado la frecuencia de eventos extremos a nivel global. Desde 1950 se ha observado un aumento en olas de calor, sequías y precipitaciones intensas en diversas regiones del mundo (IPCC, 2021). En Chile estos eventos también se han manifestado durante la última década, donde se han registrado episodios de precipitación extrema que han generado daños a infraestructura y que han afectado a la población. Entre ellos destacan los ocurridos en el Norte de Chile, donde en los años 2015 y 2020 se registraron intensas lluvias entre las regiones de Antofagasta y Atacama, provocando inundaciones y aluviones que destruyeron parte de las ciudades y dejaron 31 fallecidos para el año 2015 (Barrett et al., 2016; Veloso, 2022; Wilcox et al., 2016). Durante el 2022 se observaron precipitaciones sobre lo normal en la ciudad de La Serena, región de Coquimbo (Aravena et al., 2023), mientras que el 2023 estuvo marcado por fuertes lluvias que provocaron desbordes de ríos e inundaciones en las regiones de O'Higgins, Maule, Ñuble y Biobío, registrando el agosto más lluvioso desde 1961 y un récord histórico en Curicó con 150.2 mm en un solo día (Aravena et al., 2024).

Debido al riesgo que pueden ocasionar los extremos climáticos, surge la necesidad de evaluar que tan intensos serán estos índices en el futuro, bajo distintos escenarios de cambio climático. Diversos estudios han utilizado la última actualización de los modelos climáticos globales, pertenecientes al conjunto CMIP6 para proyectar el clima, tanto a nivel global como en regiones específicas de Chile (Gateño et al., 2024; Vásquez et al., 2025; Zhang et al., 2024). Si bien estos modelos han mejorado en términos de resolución espacial y representación de procesos físicos, en comparación a versiones anteriores como el CMIP5, aún enfrentan desafíos para representar condiciones locales, especialmente en áreas con topografía compleja y zonas de alta montaña (Salazar et al., 2024; Vásquez et al., 2025).

Si bien existen estudios que evalúan y proyectan extremos climáticos con modelos CMIP6 a escala global y continental (Zhang et al., 2024), su desempeño para representar extremos de precipitación y la temperatura asociada a estos eventos no ha sido evaluado específicamente para las distintas macrozonas climáticas de Chile. Los estudios disponibles para el país se han concentrado principalmente en la precipitación y la temperatura bajo condiciones climatológicas medias (Gateño et al., 2024; Salazar et al., 2024).

Bajo este contexto, el presente estudio evalúa la capacidad de los modelos climáticos pertenecientes a CMIP5 y CMIP6 para representar los extremos de precipitación y las temperaturas asociadas a estos eventos, en cinco macrozonas climáticas de Chile continental. Para ello, se analizan los índices Rx1day, correspondiente a la precipitación diaria máxima anual, R10y, correspondiente a la precipitación diaria asociada a un período de retorno de diez años y T4Rx1day, que representa la temperatura media diaria del día en que ocurre Rx1day. La evaluación considera un período histórico, en el cual se evalúa el desempeño de los modelos climáticos globales, en base a métricas, comparando que tan bien representan los índices extremos en comparación a observaciones provenientes de estaciones meteorológicas. Posteriormente, se realiza un ranking de los GCMs mejor evaluados, proyectando a finales de siglo los tres índices, bajo dos escenarios de cambio climático, SSP2-4.5 y SSP5-8.5.

1.1 Objetivos

La presente investigación tiene como objetivo general evaluar la capacidad de los modelos CMIP5 y CMIP6 para representar históricamente los extremos de precipitación y temperatura asociada a estos eventos, en Chile continental, y analizar las proyecciones futuras de estos índices mediante los GCMs seleccionados por su desempeño histórico.

La investigación se realiza bajo tres objetivos específicos, los cuales son:

1. Evaluar el desempeño histórico en cinco macrozonas climáticas de Chile continental, para representar los índices extremos de precipitación diaria máxima anual (R_{x1day}), temperatura media diaria asociada a este evento ($T4R_{x1day}$) y la precipitación diaria para un periodo de retorno de 10 años (R_{10y}), en los GCMs de los conjuntos CMIP5 y CMIP6.
2. Realizar proyecciones de cambio climático a finales de siglo para los escenarios futuros SSP2-4.5 y SSP5-8.5 del CMIP6, considerando todo el conjunto de modelos y los de mejor desempeño histórico, con el fin de cuantificar posibles cambios en la señal de los índices proyectados a finales de siglo.
3. Analizar los cambios proyectados en magnitud de los extremos hacia finales del siglo XXI, en las distintas macrozonas de Chile, evaluando si la selección de modelos modifica los resultados y su distribución espacial.

2 Marco Teórico

2.1 Antecedentes de la investigación y conceptos teóricos

Esta sección presenta los antecedentes que respaldan la investigación, comenzando por las características de los modelos CMIP6 junto a los escenarios futuros de emisiones. Se revisa el comportamiento observado de los extremos de precipitación y temperatura en Chile, junto con los principales desafíos que existen para su representación en un territorio de marcada complejidad topográfica. Finalmente, se describen los criterios empleados para evaluar el desempeño de los modelos y así obtener aquellos que mejor representen las señales observadas.

2.1.1 Modelos climáticos globales (CMIP6)

El Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP) fue diseñado para lograr comprender mejor los efectos del cambio climático, que surgen tanto de la variabilidad natural del planeta como de forzamientos externos (Eyring et al., 2016). CMIP6, corresponde a la última actualización de este proyecto, que contempla más de 30 modelos climáticos e introduce mejoras respecto a versiones anteriores, entre las que destacan una mejor representación de los patrones climáticos a gran escala para variables específicas, mayor resolución horizontal que permite incorporar nuevos mecanismos y procesos terrestres, con resoluciones que varían entre 40 y 300 km (Rivera & Arnould, 2020; Salazar et al., 2024) y la corrección del sesgo húmedo en el Oeste de Sudamérica, África occidental, el clima australiano, la precipitación en América del Norte, el patrón espacio-temporal del monzón sobre India, China y el este Asiático, entre otras (Rivera & Arnould, 2020; Salazar et al., 2024). No obstante, siguen existiendo limitaciones en la representación de algunos procesos climáticos a escala local, especialmente en zonas con topografía compleja como la cordillera de los Andes, reforzando la necesidad de implementar técnicas de reducción de escala y corrección de sesgos (Vásquez et al., 2025).

A escala global, las evaluaciones bajo condiciones de climatología media muestran que los resultados de los modelos climáticos globales varían entre regiones, por lo que un modelo puede representar adecuadamente el clima de una zona, pero no el de otra (Li et al., 2022). Este comportamiento también se observa en Chile continental, donde los modelos que mejor representan la precipitación y la temperatura varían entre macrozonas (Gateño et al., 2024). El estudio de Gateño et al. (2024) elabora un ranking por macrozona en Chile continental, permitiendo evaluar los GCMs con mejor desempeño histórico, y con esto, se logra reducir la dispersión de proyecciones futuras en comparación a utilizar todos los modelos climáticos. Además, existen GCMs en las diferentes generaciones CMIP que comparten genealogía de códigos, por lo que no pueden considerarse completamente independientes. Esto puede conducir a falsos acuerdos en las proyecciones cuando varios modelos, pertenecientes a una misma familia, entregan resultados similares (Kuma et al., 2023). Para abordar este problema, se han desarrollado estudios como el de Kuma et al. (2023), que permite filtrar y agrupar estos conjuntos, donde a partir de 167 GCMs de los proyectos CMIP3, CMIP5 y CMIP6 se realizó un análisis de herencia entre componentes atmosféricas y físicas del clima, identificado así 14 familias principales. Este filtro no deriva directamente de un análisis en la configuración de los códigos de los modelos, sino que se construye a partir de literatura, publicaciones y metadatos del CMIP. A pesar de que se ignore la información útil que la codificación podría brindar, el estudio de Kuma et al. (2023) proporciona antecedentes clave para identificar las familias de los GCMs (Gateño et al., 2024; Kuma et al., 2023).

2.1.2 Escenarios socioeconómicos compartidos (SSP)

Los Escenarios Socioeconómicos Compartidos (SSP) corresponden a trayectorias de desarrollo socioeconómico combinadas con distintos niveles de forzamiento radiativo (W/m^2), proyectados hacia finales de siglo (IPCC, 2021). Su principal diferencia radica en los niveles estimados de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), junto al dióxido de carbono, lo que a su vez determina distintos desafíos en términos de mitigación y adaptación, como muestra la Figura 2-1.



Figura 2-1. Desafíos de mitigación y adaptación de los escenarios SSP. Fuente: adaptado de O’Neill et al. (2014).

Los escenarios SSP3-7.0 y SSP5-8.5 corresponden a trayectorias de altas emisiones. En el caso del SSP5-8.5, se proyecta que las concentraciones de CO₂ se duplicarán con respecto a los niveles actuales hacia el año 2050 (IPCC, 2021). Por otro lado, el escenario SSP3-7.0 proyecta que las concentraciones de CO₂ se duplicarán hacia el año 2100 (IPCC, 2021), implicando desafíos muy elevados tanto en mitigación como en adaptación (O’Neill et al., 2014).

El SSP2-4.5 representa una trayectoria intermedia, donde las emisiones se mantienen relativamente estables hasta mediados de siglo (IPCC, 2021). Este escenario plantea desafíos moderados, tanto en mitigación como de adaptación hacia el futuro (O’Neill et al., 2014).

Finalmente, los escenarios SSP1-2.6 y SSP1-1.9 corresponden a trayectorias de bajas emisiones, con una reducción progresiva de CO₂ alcanzando la neutralidad total para el año 2050, y se vuelven negativas hacia finales de siglo (IPCC, 2021). Estos escenarios son los más optimistas, ya que representan un futuro donde la sociedad logra un desarrollo sostenible, con bajas desigualdades y tecnologías avanzadas, lo que hace que sea fácil reducir las emisiones y adaptarse a los efectos del cambio climático (O’Neill et al., 2014).

2.1.3 Evidencia observacional en Chile

Los registros observacionales en Chile, analizados por Boisier et al. (2018) muestran una tendencia sostenida hacia condiciones más secas entre los 30°S y 48°S, durante el periodo 1960–2016, acompañada por una disminución de los caudales en Chile Central. Esta reducción de las precipitaciones se intensifica durante la megasequía de 2010–2018, periodo en que Chile Central registró déficits medios de entre 20 % y 40 % (Garreaud et al., 2020). Respecto de la temperatura, Falvey & Garreaud (2009) identificaron durante 1979–2006 un contraste entre los 17°S y 37°S, con un enfriamiento aproximado de –0.2 °C por década en las estaciones costeras y un calentamiento de hasta +0.25 °C por década en sectores andinos. Al sur de este dominio, las tendencias fueron cercanas a cero y no presentaron un patrón espacial claro.

Esta variación territorial también se observa al analizar los extremos de precipitación. Lagos-Zúñiga, Mendoza et al. (2024) evaluaron las tendencias estacionales de Rx1day durante el periodo 1979–2017 mediante estaciones meteorológicas y el producto grillado AgERA5. Los principales aumentos se registraron durante el otoño en el Norte de Chile, entre los 15°S y 30°S, y durante el invierno entre los 38°S y 45°S, con magnitudes superiores a 4 mm por década. También se observaron tendencias positivas al sur de los 40°S durante el verano, otoño e invierno, junto con aumentos cercanos a 4 mm por década en el

altiplano y en sectores costeros de Chile Central durante el verano. En contraste, Rx1day disminuyó en Chile Central y la Zona Sur durante gran parte del año, con las reducciones más intensas entre los 32°S y 37°S durante el otoño y la primavera, donde alcanzaron valores inferiores a -10 mm por década.

A pesar de estas tendencias negativas, se han evidenciado durante los últimos años eventos extremos de precipitación. En agosto del año 2023, un sistema frontal generó lluvias de gran intensidad que ocasionaron desbordes e inundaciones en las regiones de O'Higgins, Maule, Ñuble y Biobío en donde las provincias de Linares y Talca fueron las más afectadas. Además, en Curicó, se registró un récord histórico de precipitación máxima diaria (150.2 mm), el más alto desde 1961 (Aravena et al., 2024). Asimismo, durante 2024, en el sur de Chile, entre las regiones de Aysén y Magallanes se observó un aumento en la precipitación extrema, con incrementos entre 3 y 6 mm por década en estaciones como Puerto Aysén, Coyhaique, Porvenir y Puerto Williams (Aravena et al., 2025).

Además de las tendencias de Rx1day, Lagos-Zúñiga, Mendoza, et al. (2024) analizaron los cambios en la temperatura registrada durante estos eventos. En la costa del Pacífico, desde los 33°S hacia el norte, las temperaturas máxima y mínima presentaron tendencias de enfriamiento durante el invierno y la primavera, con disminuciones inferiores a -2 °C por década. En cambio, desde los 38°S hacia el sur se observaron aumentos cercanos a 1 °C por década en la temperatura mínima, mientras que las laderas occidentales de los Andes próximas a los 30°S concentraron las mayores tendencias positivas. En las zonas Sur y Austral, el calentamiento asociado a Rx1day podría elevar el nivel de congelación hasta 334 m por década, disminuyendo la acumulación de nieve y aumentando las áreas de escurrimiento por lluvias. Sin embargo, en algunos sectores de estas macrozonas la temperatura máxima presentó tendencias de enfriamiento.

2.2 Evaluación de desempeño en modelos climáticos

La evaluación del desempeño de los GCMs es fundamental para la investigación del cambio climático. Este proceso busca determinar la capacidad de los modelos para reproducir variables históricas observadas, por ejemplo, de precipitación y temperatura (Guo et al., 2021), considerando factores como la variabilidad interanual y las teleconexiones presentes (Gateño et al., 2024). De esta forma, se cuantifica el desempeño y las limitaciones de los modelos, estableciendo un filtro que permite obtener un conjunto que representan de mejor forma las condiciones pasadas (Gateño et al., 2024; Rivera & Arnould, 2020).

Estudios chilenos como el de Salazar et al. (2024) evalúan el desempeño de los modelos climáticos del proyecto CMIP6 comparando las simulaciones de precipitación y temperatura con los datos observados para el periodo histórico, considerando regiones desde el Norte hasta la Patagonia. Los autores analizan la capacidad de los modelos para reproducir el ciclo anual, la distribución espacial del clima y las variaciones estacionales observadas (Salazar et al., 2024). Los resultados muestran que los modelos reproducen adecuadamente estos patrones, aunque presentan en general sesgos húmedos y cálidos. Este último es más pronunciado sobre la cordillera de los Andes debido a las limitaciones de los GCMs para representar su compleja topografía. Además, ningún modelo obtiene el mejor desempeño para la precipitación y la temperatura de manera simultánea en todas las regiones (Salazar et al., 2024).

Gateño et al. (2024) proponen otro enfoque, combinando la evaluación de desempeño histórico con un análisis de independencia. En una primera etapa, aplica el índice de desempeño pasado (PPI) que evalúa varios aspectos, como la climatología media, la variabilidad temporal, la estacionalidad y la capacidad de reproducir las teleconexiones asociadas a El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) y al Modo Anular del Sur (SAM). Luego en una segunda etapa, los autores implementan un filtro basado en la genealogía de código, con el fin de evitar proyecciones similares a partir de modelos pertenecientes a una misma familia. Finalmente se realiza un ranking de los modelos con mejor desempeño por macrozona, entregando una base de referencia para la selección de GCMs en futuras investigaciones basadas en climatología media (Gateño et al., 2024).

A continuación, se describen los dos filtros utilizados en el estudio de Gateño et al. (2024) para la selección de mejores modelos en base a proyecciones de climatología media para Chile continental.

2.2.1 Índice de Desempeño Pasado (PPI) y distancia euclidiana (ED)

Este índice se basa en la eficiencia de Kling-Gupta. Entrega en un único valor relacionado a la capacidad de los modelos climáticos para reproducir patrones climáticos a gran escala, variabilidad temporal y teleconexiones como ENSO y SAM (Gateño et al., 2024). Este índice se obtiene a partir de la Ec. 2-1

$$PPI = 1 - \sqrt{\sum_{k=1}^{N=7} S_k \cdot (1 - M_{i,j,k})^2} \quad \text{Ec. 2-1}$$

Donde S_k es un factor de ponderación, $M_{i,j,k}$ representa el valor de una métrica de desempeño específica k , como por ejemplo el sesgo medio anual M_{μ}^{yr} , obtenido a partir de las simulaciones de un modelo climático particular j , para una variable climática determinada i , como precipitación o temperatura.

Además, para evaluar de manera integrada el desempeño de los modelos en proyecciones de temperatura y precipitación, se utiliza la distancia euclidiana (Ec. 2-2).

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

Donde un valor de PPI cercano a 1 indica un mejor ajuste del modelo, mientras que valores bajos reflejan peor desempeño (Gateño et al., 2024).

2.2.2 Índices extremos

A escala global, los estudios sobre extremos climáticos utilizan ampliamente los índices recomendados por el Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI). En América del Sur, estos índices también han sido empleados para evaluar las proyecciones de precipitación extrema, como en el estudio realizado por De Medeiros et al. (2022) en Brasil. Los índices considerados se presentan en la Tabla 2-1.

Tabla 2-1. Índices climáticos extremos del estudio de De Medeiros et al. (2022). Fuente: Adaptada de De Medeiros et al. (2022).

Índice	Nombre del índice	Definición del índice	Unidades
PRCPTOT	Precipitación anual en días húmedos	Total anual de precipitación en los días húmedos	mm
R95p	Días muy húmedos	Total anual de precipitación proveniente de días mayores al percentil 95	mm
RX1day	Precipitación máxima en 1 día	Precipitación máxima anual registrada en un solo día	mm
RX5day	Precipitación máxima en 5 días	Precipitación máxima anual en 5 días consecutivos	mm
SDII	Índice simple de intensidad diaria	Relación entre la precipitación total anual y el número de días húmedos	mm/día
R20mm	Número de días con lluvia muy intensa	Cantidad anual de días con precipitación diaria igual o superior a 20 mm	días
CDD	Días secos consecutivos	Número máximo anual de días secos consecutivos	días
CWD	Días húmedos consecutivos	Número máximo anual de días húmedos consecutivos	días

De Medeiros et al. (2022) evaluaron 40 modelos climáticos globales pertenecientes a las familias CNRM, FGOALS, GFDL, IPSL, MIROC, MPI y MRI, con el objetivo de analizar su capacidad para representar índices de precipitación extrema en cinco regiones de Brasil. El conjunto incluyó nueve modelos de CMIP3, 16 de CMIP5 y 15 de CMIP6. Los resultados muestran que el desempeño depende del índice y de la región

analizada. En la región Norte de Brasil, Rx1day presenta subestimaciones de entre -20% y -40% , mientras que en el Noreste de Brasil se observan sobreestimaciones de hasta $+50\%$. En cambio, PRCPTOT y SDII presentan sesgos cercanos a cero en gran parte del territorio brasileño. La comparación entre generaciones tampoco muestra una mejora uniforme, ya que CMIP3 obtiene el mejor desempeño general en el Noreste de Brasil y CMIP5 en el Centro-Oeste de Brasil, mientras que CMIP6 presenta mejoras más claras en el Sudeste y Sur de Brasil.

Otro estudio es el realizado por Lagos-Zúñiga, Balmaceda-Huarte, et al. (2024), donde evalúan la capacidad de un conjunto de nueve RCMs de reproducir los índices extremos de precipitación y temperatura en Sudamérica, entre ellos RX5day, CDD, TXx y TNn. Se utilizan dos productos grillados (CPC y AgERA5) junto con observaciones de estaciones meteorológica, donde en una primera etapa los autores comparan estas fuentes de datos cuantificando su comportamiento y proporcionando una idea de las incertidumbres presentes. Posteriormente evalúan la capacidad de los modelos regionales para reproducir la variabilidad espacial, la variabilidad interanual y las tendencias históricas de los índices extremos en el periodo histórico (1981-2005). Además, el estudio emplea modelos regionales forzados con los GCMs del conjunto CMIP5, entre ellos están REMO2015, RegCM4-7 y Eta. Los resultados muestran que RX5day presenta un buen desempeño en las regiones SWS y SSA, con altos niveles de concordancia en la representación de la climatología entre los modelos y los productos observacionales y en la variabilidad espacial para todas las regiones (Lagos-Zúñiga, Balmaceda-Huarte, et al., 2024). No obstante, se identifican sesgos importantes en la magnitud del índice RX5day, donde los modelos REMO y RegCM tienden a sobreestimar el extremo de precipitación en la mayoría de las regiones, mientras que Eta lo subestima. En el Norte de Chile se alcanzan los valores más bajos de este índice y en general, la región SWS, no logra representar adecuadamente la variabilidad temporal de RX5day. Por otro lado, en el Sur de Chile, AgERA5 reproduce adecuadamente la precipitación orográfica (Lagos-Zúñiga, Balmaceda-Huarte, et al., 2024).

3 Zona de estudio

Chile continental presenta una marcada diversidad climática en su extensión latitudinal, donde la influencia del océano Pacífico, la circulación atmosférica y la presencia de la cordillera de los Andes, generan importantes gradientes de precipitación y temperatura a lo largo de Chile, además de variaciones longitudinales asociadas a la altitud y a la distancia respecto de la costa (Gateño et al., 2024; Salazar et al., 2024; Vásquez et al., 2025).

El área de estudio es Chile continental entre las latitudes 17°S y 57°S. Debido a su heterogeneidad climática, el territorio se divide en cinco macrozonas, siguiendo la clasificación utilizada por Gateño et al. (2024), donde el Norte Lejano (17°S–26°S), se caracteriza por condiciones áridas y precipitaciones escasas, aunque durante el verano pueden registrarse eventos asociados a fenómenos atmosféricos provenientes del Altiplano, el Norte Cercano (26°S–32°S) correspondiente a una zona de transición entre los climas áridos del extremo norte y las condiciones mediterráneas de Chile Central (32°S–37°S) donde gran parte de las precipitaciones se concentra durante el invierno, Chile Sur (37°S–44°S) con precipitaciones más abundantes y distribuidas de manera más regular durante el año y la Zona Austral (44°S–56°S), caracterizada por condiciones frías y húmedas.

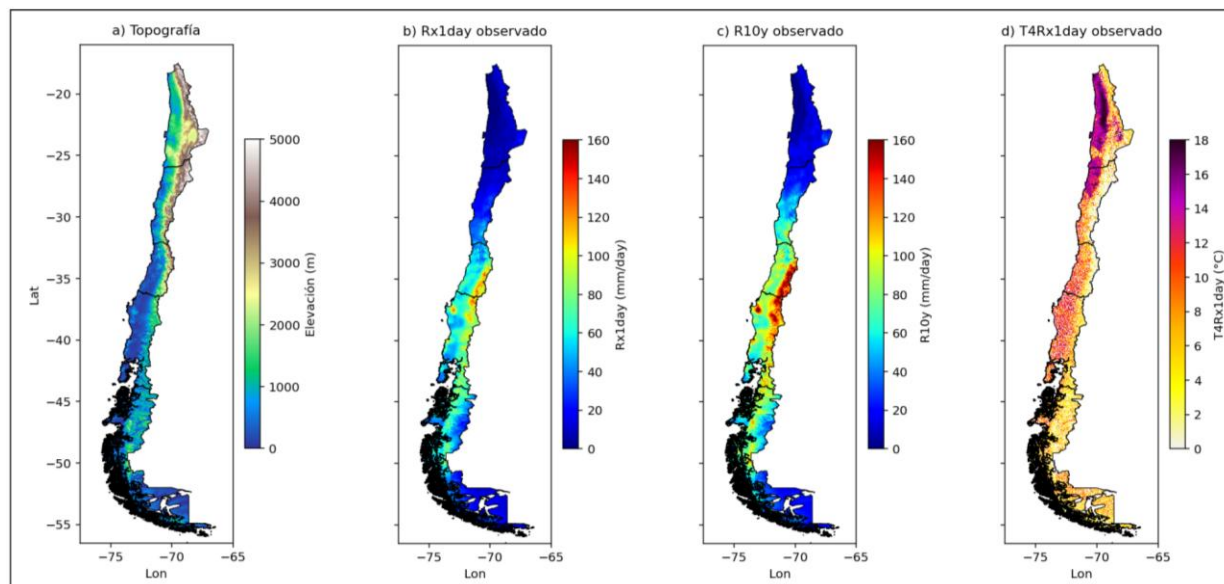


Figura 3-1. Topografía e índices climáticos observados durante el periodo histórico 1985–2014: a) elevación del terreno; b) precipitación diaria máxima anual (Rx1day); c) precipitación diaria asociada a un periodo de retorno de 10 años (R10y); y d) temperatura media diaria asociada a Rx1day (T4Rx1day).

Esta división permite agrupar territorios con características climáticas relativamente similares y evaluar el desempeño de los modelos según las condiciones particulares de cada región. En la Figura 3-1 se muestra el promedio de las observaciones obtenidas de CR2MET, de los índices extremos para el periodo histórico y para cada macrozona. Se observa un marcado gradiente espacial en los índices de precipitación extrema, donde Rx1day presenta un valor promedio para el Norte Lejano de 6.54 mm/día, que aumenta hacia el Centro y Sur, alcanzando una media de 69.33 mm/día y 69.96 mm/día respectivamente. Además, en estas regiones se puede observar que Rx1day aumenta para la cordillera de los Andes. La macrozona Austral, presenta una media de 39.05 mm/día, sin embargo, para la zona norte de esta macrozona, se alcanzan valores promedios máximos de hasta 106 mm/día. Asimismo, R10y presenta un comportamiento similar, con un promedio de 11.55 mm/día en el Norte Lejano, que aumenta hasta 41.63 mm/día en el Norte Cercano y alcanza sus mayores valores en Chile Central y Chile Sur, con 100.05 y 94.56 mm/día, respectivamente. En la macrozona Austral, este índice disminuye hasta 51.39 mm/día, pero alcanza valores máximos promedios

de hasta 91.77 mm/día para el norte de esta región. Por último, T4Rx1day presenta una distribución espacial menos uniforme. Su mayor valor promedio se registra en el Norte Lejano, con 11.43°C, mientras que en el Norte Cercano y Chile Central alcanza medias de 7.02 y 7.40°C, respectivamente. En Chile Sur aumenta hasta 9.16°C y posteriormente disminuye a 6.23 °C en la macrozona Austral. Para este último índice se puede observar cómo T4Rx1day disminuye de sectores costeros a zonas de gran altitud.

4 Metodología

La metodología se divide en tres etapas, como se muestra en la Figura 4-1. En la primera, se seleccionan los índices extremos Rx1day, R10y y T4Rx1day, se establece Chile continental como dominio de estudio y se regrillan los modelos CMIP5 y CMIP6 a una resolución espacial de 0.2°. En la segunda etapa, se evalúa el desempeño histórico de los modelos mediante los enfoques espacial y temporal, considerando únicamente los píxeles que contienen estaciones meteorológicas y comparando los resultados simulados con los observados. En el caso de T4Rx1day, el índice se calcula mediante ambos enfoques utilizando tanto la temperatura original como la temperatura corregida a partir de la diferencia entre la elevación de cada GCM y el modelo digital de elevación (DEM) de CR2MET. El desempeño se cuantifica mediante la razón entre las medias (M_u), la razón entre las desviaciones estándar (M_σ) y el Perkins Skill Score (PSS). Estas métricas se integran mediante el índice de desempeño pasado (PPI) y la distancia euclidiana (ED) para construir un ranking de los modelos con mejor desempeño en cada macrozona y comparar la capacidad de CMIP5 y CMIP6 en la representación histórica de extremos. Finalmente, se analizan las proyecciones de cambio climático de CMIP6 bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5, considerando todos los píxeles de cada macrozona y comparando el conjunto completo de GCMs con los modelos seleccionados a partir de su desempeño histórico.

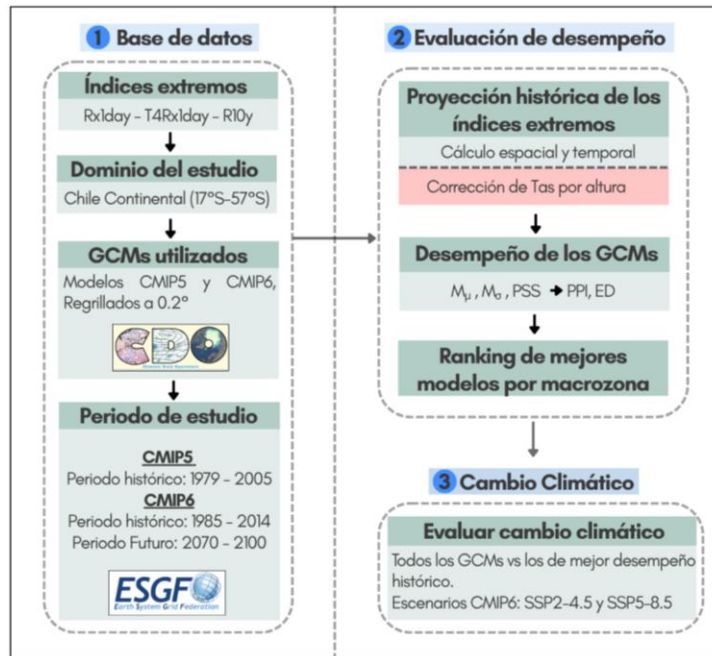


Figura 4-1. Esquema general de la metodología: selección y procesamiento de datos, evaluación del desempeño histórico de los GCMs y proyecciones de cambio climático.

4.1 Base de datos

Los modelos climáticos se descargan del portal *Earth System Grid Federation*, donde se obtienen variables de precipitación diaria (Pr) y temperatura media diaria (tas) dentro del periodo histórico y futuro, considerando solo la primera realización de cada modelo. Dado que, los GCMs vienen en varios archivos con distintos periodos, se deben unir para obtener una serie continua y posteriormente recortar al intervalo y zona de interés. En la Tabla 4-1 se observan los modelos climáticos utilizados en este estudio, que existen tanto en el periodo histórico como el futuro, junto a la familia e instituto a los que pertenecen y su resolución espacial original.

Además, se recopilan series de precipitación diaria (Pr), temperatura diaria máxima (Tx) y temperatura diaria mínima (Tn) provenientes de estaciones meteorológicas distribuidas a lo largo de Chile continental como base observacional. Estas series forman parte del conjunto de datos elaborado por Lagos-Zúñiga, Mendoza, et al. (2024), que reúnen registros de 405 estaciones de precipitación y 129 de temperatura, administradas por la Dirección General de Aguas (DGA) y la Dirección Meteorológica de Chile (DMC), durante el periodo 1979–2017. Para elaborar este conjunto, los autores aplicaron la prueba de homogeneidad de Buishand, excluyeron las estaciones con más de dos años sin información y eliminaron los registros en que Tn era mayor que Tx. Finalmente, completaron los datos faltantes mediante mapeo cuantílico a partir de estaciones cercanas.

El periodo histórico de este estudio es 1985–2014 para CMIP6 y 1979-2005 para CMIP5. Esto debido a que la quinta generación de modelos climáticos presenta valores históricos hasta el año 2005 y el archivo de estaciones meteorológicas contiene datos que parten desde el año 1979, por esta razón este conjunto CMIP5 muestra un periodo más acotado (27 años).

Debido a que los GCMs presentan diferentes resoluciones espaciales, las variables de precipitación y temperatura se regrillan a una resolución común de 0.2° mediante el método conservativo de primer orden remapcon1, implementado en CDO.

Tabla 4-1. Modelos climáticos CMIP6 utilizados.

Familia	Instituto	Modelo	Resolución (lat/lon)
ECMWF	EC-Earth consortium (Europe)	EC-Earth3	0.7 x 0.7
		EC-Earth3-CC	0.7 x 0.7
		EC-Earth3-Veg-LR	1.1 x 1.1
	MPI-M (Germany)	MPI-ESM1-2-HR	0.9 x 0.9
		MPI-ESM1-2-LR	1.9 x 1.9
	NUIST (China)	NESM3	1.9 x 1.9
CCM	CAS (China)	FGOALS-g3	2.0 x 2.0
	BCC (China)	BCC-CSM2-MR	1.1 x 1.1
	NCAR (U.S.A.)	CESM2-WACCM	0.9 x 1.3
	AS-RCEC (Taiwan)	TaiESM1	0.9 x 1.3
	CMCC (Italy)	CMCC-CM2-SR5	0.9 x 1.3
		CMCC-ESM2	0.9 x 1.3
	NCC (Norway)	NorESM2-LM	1.9 x 2.5
		NorESM2-MM	0.9 x 1.3
CanAM	CCCma (Canada)	CanESM5	2.8 x 2.8
IPSL	IPSL (France)	IPSL-CM6A-LR	1.3 x 2.5
GFDL	NOAA-GFDL (U.S.A.)	GFDL-ESM4-gr1	1.0 x 1.3
		GFDL-CM4-gr1	1.0 x 1.3
		GFDL-CM4-gr2	2.0 x 2.5
	KIOST (Korea)	KIOST-ESM	1.9 x 1.9
GFS	CCCR-IITM (India)	IITM-ESM	1.9 x 1.9
INM	INM (Russia)	INM-CM4-8	1.5 x 2.0
		INM-CM5-0	1.5 x 3.0
MIROC	JAMSTEC, AORI, NIES, RCCS (Japan)	MIROC6	1.4 x 1.4
UCLA GCM	MRI (Japan)	MRI-ESM2-0	1.1 x 1.1
HadAM	NIMS/KMA	KACE-1-0-G	1.3x1.9
	CSIRO-ARCCSS (Australia)	ACCESS-CM2	1.3 x 1.9
		ACCESS-ESM1-5	1.2 x 1.9

4.2 Cálculo de los índices extremos

En este estudio se analizan tres índices climáticos. Rx1day que corresponde al valor máximo de precipitación diaria registrada durante cada año hidrológico, R10y que representa la precipitación diaria asociada a un periodo de retorno de 10 años, y T4Rx1day correspondiente a la temperatura media diaria registrada en la fecha de ocurrencia de Rx1day.

4.2.1 Cálculo espacial

El cálculo de los índices extremos se realiza por macrozona, a partir de las simulaciones diarias de precipitación (Pr) y temperatura media (tas) de los GCMs, considerando únicamente las celdas de la grilla que contienen al menos una estación meteorológica. Al igual que el estudio de (Lv et al., 2020) que evalúa el desempeño del modelo WRF con estaciones meteorológicas en la Meseta Tibetana, cuando dos o más estaciones se ubican dentro de un mismo píxel, los datos diarios de precipitación y temperatura media observada se promedian previamente para obtener un solo valor representativo observado de dicha celda y evitar que la macrozona sea castigada por la redundancia del cálculo que provocaría considerar todas las estaciones dentro de una misma grilla.

Una vez seleccionados los píxeles que contienen estaciones, se utilizan para calcular el promedio espacial de la precipitación y la temperatura media en cada macrozona, obteniendo un valor representativo diario para ambas variables. Este procedimiento se expresa mediante las Ec. 4-1 y Ec. 4-2.

$$\overline{Pr_Z(d)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Pr_i(d) \quad \text{Ec. 4-1}$$

$$\overline{T_Z(d)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n tas_i(d) \quad \text{Ec. 4-2}$$

Donde Z corresponde a la macrozona, d al día analizado, n a la cantidad de píxeles y Pr y tas precipitación diaria y temperatura media diaria en el píxel i.

El índice Rx1day se obtiene seleccionando, para cada año hidrológico, el valor máximo de la serie de precipitación diaria promediada espacialmente en cada macrozona. Luego, a partir de la fecha de ocurrencia de Rx1day, se extrae la temperatura media diaria promediada espacialmente para obtener T4Rx1day (Figura 4-2). El índice R10y se estima a partir de la serie anual de Rx1day mediante la distribución empírica de Weibull, considerando un periodo de retorno de 10 años.

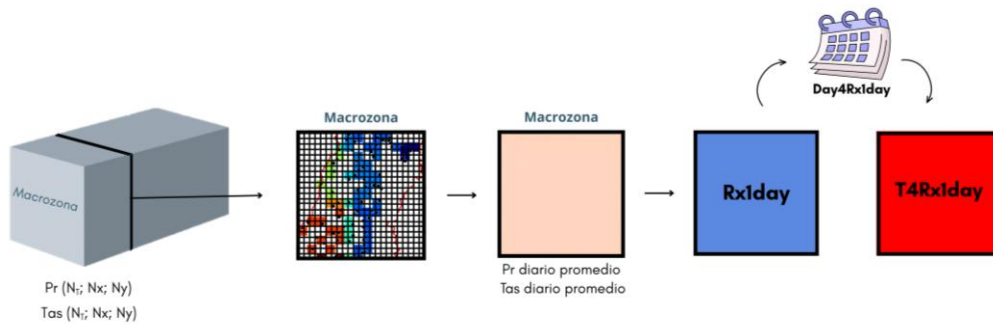


Figura 4-2. Cálculo de Rx1day y T4Rx1day espacial, considerando solo los píxeles que contienen estaciones.

Para obtener los índices observados se sigue el mismo procedimiento aplicado a los GCMs, utilizando los datos de las estaciones meteorológicas. En el caso de T4Rx1day, la temperatura media diaria (tas) se calcula previamente como el promedio entre la temperatura máxima (Tx) y mínima (Tn).

4.2.2 Cálculo temporal

Algunas dificultades del enfoque espacial es que, considera que el valor máximo ocurre el mismo día para todos los píxeles de la macrozona y además que el resultado puede verse influenciado por las diferencias topográficas dentro de cada región, donde al promediar diariamente los píxeles que contienen estaciones, previo al cálculo de los índices, sectores con registros de mayor precipitación, pueden tener una gran influencia en el valor final. Por esta razón, se incorpora un enfoque temporal, que permite considerar variaciones en la fecha de ocurrencia de la precipitación diaria máxima anual entre los píxeles de cada macrozona.

El cálculo temporal se realiza de manera independiente en cada píxel que contiene estaciones meteorológicas. Para cada año hidrológico, se identifica la precipitación máxima diaria Rx1day, y la fecha en que ocurre, con el objetivo de obtener la temperatura asociada a dicho evento. Posteriormente, los valores de Rx1day y T4Rx1day calculados en cada píxel se promedian a nivel de macrozona para cada año hidrológico, obteniendo un solo valor anual para cada región. Esto se presenta en las Ec. 4-3 y Ec. 4-4.

$$Rx1day_{Z,y}^{temporal} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Rx1day_{i,y} \quad \text{Ec. 4-3}$$

$$T4Rx1day_{Z,y}^{temporal} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T4Rx1day_{i,y} \quad \text{Ec. 4-4}$$

Donde Z corresponde a la macrozona, y al año hidrológico, i al píxel analizado y n al número de píxeles considerados.

En el caso de la precipitación asociada a un período de retorno de 10 años, el índice R10y se calcula de manera independiente en cada píxel a partir de la serie de valores de Rx1day, mediante la distribución empírica de Weibull. Posteriormente, los valores obtenidos se promedian a nivel de macrozona, obteniendo así un solo valor representativo por región.

4.2.3 Corrección de la temperatura

Se aplica una corrección altimétrica a la temperatura para ajustar las diferencias entre la elevación usada por los modelos y la topografía real. Para ello, se utilizan los archivos de altura de cada modelo, descargados del *Earth System Grid Federation* y un DEM de CR2MET, ambos previamente regrillados a 0.2°. La corrección se obtiene a partir de la Ec. 4-5.

$$T_M^{C,Z} = T_M^Z - \gamma \cdot (Z_{modelo} - Z_{DEM}) \quad \text{Ec. 4-5}$$

Donde $T_M^{C,Z}$ corresponde a la temperatura corregida, T_M^Z la temperatura corregida por el modelo, Z_{modelo} la altura utilizada por el modelo, Z_{DEM} la altura del DEM y γ un gradiente estándar (Ec. 4-6).

$$\gamma = 6.5 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{Km}} \quad \text{Ec. 4-6}$$

Una vez ajustados los modelos de temperatura, se repite el cálculo del índice T4Rx1day, tanto espacial como temporal.

4.3 Evaluación de desempeño de los modelos

Para evaluar el desempeño de los modelos climáticos, se utilizan tres métricas previamente utilizadas en el estudio de Gateño et al. (2024), pero ajustadas a los índices extremos. La razón entre los valores medios simulados y observados, la razón entre sus desviaciones estándar y el Perkins Skill Score (PSS).

Para Rx1day y R10y, el sesgo se cuantifica mediante la razón entre los valores medios simulados y observados, utilizando la expresión propuesta por Gateño et al. (2024), adaptada a los índices extremos (Ec. 4-7).

$$M_{\mu}^{yr} = \frac{\mu_s^{Rx1day, R10y}}{\mu_o^{Rx1day, R10y}} \quad \text{Ec. 4-7}$$

Donde $\mu_s^{Rx1day, R10y}$ corresponde a la media anual simulada de Rx1day o R10y, mientras que μ_o^{Rx1day} a la media anual observada de Rx1day o R10y. El valor óptimo corresponde a $M_{\mu}^{yr} = 1$ (Gateño et al., 2024).

Gateño et al. (2024) proponen evaluar el sesgo de la temperatura mediante una normalización basada en el rango de los valores anuales observados, en lugar de la desviación estándar empleada en estudios como (Tang et al., 2021). Esto se debe a que, en sus pruebas preliminares, la normalización mediante la desviación estándar produjo valores muy altos de M_{μ}^{yr} , otorgando un gran peso a esta métrica en el cálculo del PPI. Por esta razón para evaluar el sesgo de T4Rx1day, se utiliza la expresión propuesta por Gateño et al. (2024), pero adaptada a extremos (Ec. 4-8).

$$M_{\mu}^{yr} = 1 - \frac{\mu_o^{T4Rx1day} - \mu_s^{T4Rx1day}}{\max(T4Rx1day_o) - \min(T4Rx1day_o)} \quad \text{Ec. 4-8}$$

Donde, $\mu_s^{T4Rx1day}$ corresponde a la media anual simulada de T4Rx1day, $\mu_o^{T4Rx1day}$ representa la media anual observada del mismo índice, $\max(T4Rx1day_o)$ corresponde a T4Rx1day media anual máxima observada y $\min(T4Rx1day_o)$ a T4Rx1day media anual mínima observada.

Para evaluar la capacidad de reproducir la variabilidad interanual, se utiliza la Ec. 4-9.

$$M_{\sigma}^{yr} = \frac{\sigma_s^{Rx1day, T4Rx1day}}{\sigma_o^{Rx1day, T4Rx1day}} \quad \text{Ec. 4-9}$$

Donde $\sigma_s^{Rx1day, T4Rx1day}$ corresponde a la desviación estándar simulada y $\sigma_o^{Rx1day, T4Rx1day}$ a la desviación estándar observada. El valor óptimo corresponde a $M_{\sigma}^{yr} = 1$.

Para el caso de la precipitación con un periodo de retorno de 10 años (R10y), el análisis de la desviación estándar se realiza de manera espacial. Para cada píxel del modelo y para cada estación meteorológica, se construye una serie anual de valores extremos Rx1day. A partir de esta serie, se aplica la distribución empírica de Weibull, obteniendo así un valor de R10y en cada píxel (Figura 4-3).

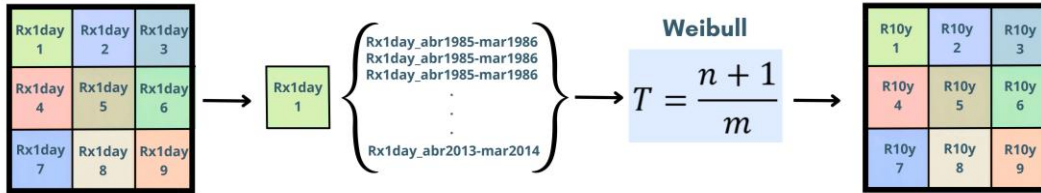


Figura 4-3. Cálculo espacial de la desviación estándar de R10y.

Una vez obtenidos los valores de R10y, se calcula su desviación estándar espacial de manera separada para las simulaciones de los GCMs y las observaciones, considerando únicamente los píxeles que contienen estaciones meteorológicas dentro de cada macrozona. Posteriormente, la desviación estándar espacial simulada se divide por la desviación estándar espacial observada para obtener M_{σ}^{yr} .

Otra métrica utilizada es la del Perkins Skill Score (PSS), la cual evalúa la capacidad de los modelos climáticos, para reproducir la función de densidad de probabilidad (PDF) de las series observadas. El cálculo consiste en dividir el rango de valores de los índices extremos de precipitación y temperatura en un número fijo de intervalos y determinar la frecuencia de datos que cae dentro de cada bin, tanto para las observaciones como para las simulaciones. Luego, para cada intervalo, se toma el valor mínimo entre ambas frecuencias (simulada y observada) y, finalmente, se suman todos esos valores (Ec. 4-10). Se debe considerar que, para esta métrica, se realiza previamente un nuevo cálculo de los índices extremos Rx1day y T4Rx1day de manera mensual, de este modo se dispone de una mayor cantidad de información permitiendo una evaluación más detallada. Para el cálculo de esta métrica se utiliza la Ec. 4-10.

$$M_{month}^{PSS} = \sum_{i=1}^n \min(Z_{mi}, Z_{oi}) \quad \text{Ec. 4-10}$$

Donde n es el número de intervalos utilizados para el cálculo del PSS, Z_{mi} es la frecuencia de los valores simulados por bin i y Z_{oi} es la frecuencia de los valores observados por bin i (Perkins et al., 2007). El rango de valores es de 0 a 1, donde resultados cercanos a 1 indican una mayor concordancia, mientras que cercanos a 0 una peor concordancia entre los valores simulados y observados.

Como criterio, se selecciona un valor n que permita construir al menos cinco bins, procurando que cada uno contenga un mínimo de cinco valores observacionales. En el Anexo A. 1 se presenta, a modo de ejemplo, el cálculo del PSS para el índice Rx1day del modelo ACCESS-CM2 mediante el enfoque espacial, donde se cumple el criterio mencionado.

Luego, se calcula el índice de desempeño pasado (PPI) mediante la Ec. 2-1. Para evitar la combinación de resultados obtenidos con enfoques distintos, las métricas correspondientes al cálculo espacial y al cálculo temporal se analizan por separado. De este modo, se obtienen tres valores de PPI para el enfoque espacial, asociados a Rx1day, T4Rx1day y R10y, y otros tres valores equivalentes para el enfoque temporal.

Finalmente, se calcula la distancia euclidiana (ED) mediante la Ec. 4-11, adaptando la formulación utilizada por Gateño et al. (2024). En este caso, el cálculo considera en conjunto los tres valores de PPI asociados a Rx1day, T4Rx1day y R10y, tanto para el enfoque espacial como para el temporal. A partir de estos resultados, los modelos se ordenan según su desempeño, priorizando valores de PPI cercanos a 1 y valores de ED a 0. Posteriormente, se selecciona el 60 % de los modelos con menor distancia euclidiana y se filtran por familias, con el propósito de reducir la dependencia entre modelos relacionados y evitar un falso acuerdo para la señal de cambio climático.

$$ED = \sqrt{(1 - PPI_{Rx1day})^2 + (1 - PPI_{R10y})^2 + (1 - PPI_{T4Rx1day})^2} \quad \text{Ec. 4-11}$$

Así se obtienen dos rankings, uno considerando el cálculo espacial y otro temporal.

4.4 Cambio Climático

Se descargan los GCMs futuros del conjunto CMIP6 (Tabla 4-1) para los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 considerando el periodo 2070-2100. Posteriormente, estos se regrillan a una resolución de 0.2°, utilizando el mismo método aplicado para los GCMs históricos, correspondiente al regrillado conservativo de primer orden (remapcon1).

Para el índice Rx1day, se determina en cada píxel la precipitación máxima diaria de cada año y la fecha en que ocurre dicho evento, a partir de la cual se obtiene el valor de T4Rx1day. Posteriormente, para cada periodo de referencia, se calcula en cada píxel el promedio de los datos obtenidos y estos resultados se promedian entre modelos. Con el objetivo de evaluar cómo afecta la selección de modelos sobre las proyecciones, primero se calcula la diferencia entre el promedio futuro e histórico utilizando el conjunto completo de modelos. Luego, se repite el procedimiento considerando únicamente los modelos con mejor desempeño.

5 Resultados

5.1 Representatividad de los resultados

5.1.1 Métrica M_{μ}^{yr}

A continuación, se comparan los resultados de M_{μ}^{yr} obtenidos para Rx1day, T4Rx1day y R10y mediante los enfoques espacial y temporal en CMIP5 y CMIP6. La Figura 5-1 presenta las distribuciones obtenidas para Rx1day en las cinco macrozonas analizadas.

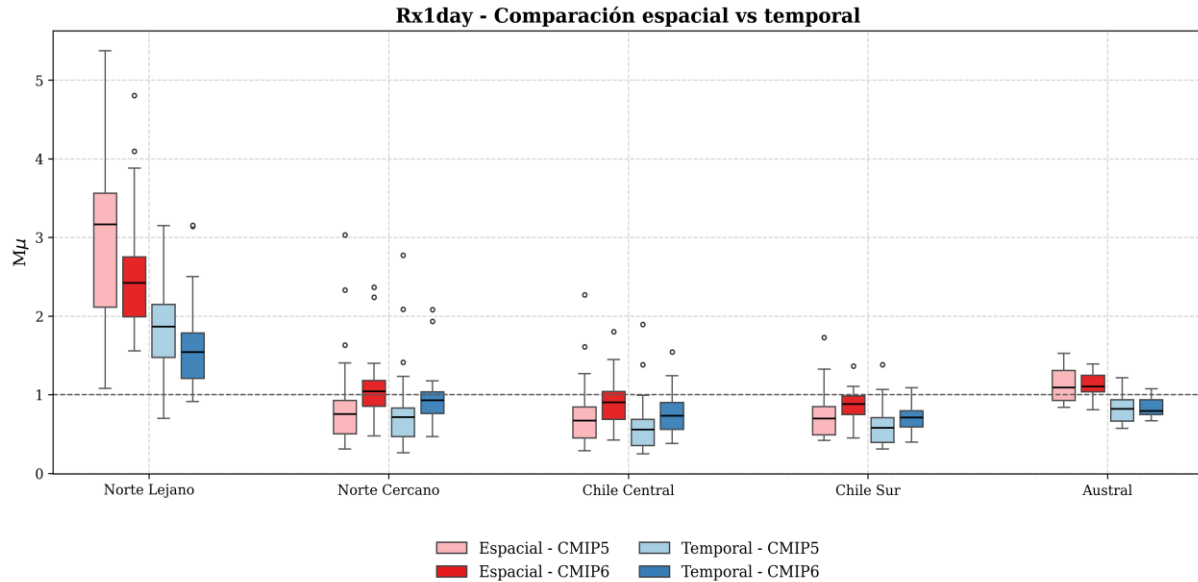


Figura 5-1. Boxplot comparativo de M_{μ}^{yr} para Rx1day considerando el enfoque espacial y temporal en CMIP5 y CMIP6.

En el Norte Lejano, ambos enfoques sobreestiman la magnitud de Rx1day, aunque el enfoque temporal reduce esta sobreestimación en las dos generaciones, donde las medianas disminuyen de 3.17 a 1.87 en CMIP5 y de 2.42 a 1.54 en CMIP6 al pasar del enfoque espacial al temporal. En las demás macrozonas, el enfoque espacial presenta medianas más próximas al valor óptimo. Al comparar ambas generaciones, CMIP6 muestra un mejor desempeño que CMIP5 desde el Norte Lejano hasta Chile Sur. La única excepción corresponde a la macrozona Austral, donde CMIP5 presenta medianas levemente más cercanas al valor óptimo, con diferencias entre generaciones de 0.02 bajo el enfoque espacial y 0.03 en el temporal.

Respecto de la variabilidad de los resultados, el enfoque temporal presenta una desviación estándar menor en todas las macrozonas y en ambas generaciones de modelos. La mayor reducción se observa en el Norte Lejano, donde disminuye de 1.09 a 0.63 en CMIP5 y de 0.76 a 0.56 en CMIP6. En las demás macrozonas, las diferencias entre ambos enfoques son mínimas.

Para T4Rx1day, la Figura 5-2 compara los resultados obtenidos mediante los enfoques espacial y temporal, considerando las temperaturas corregidas y no corregidas por elevación para CMIP5 y CMIP6.

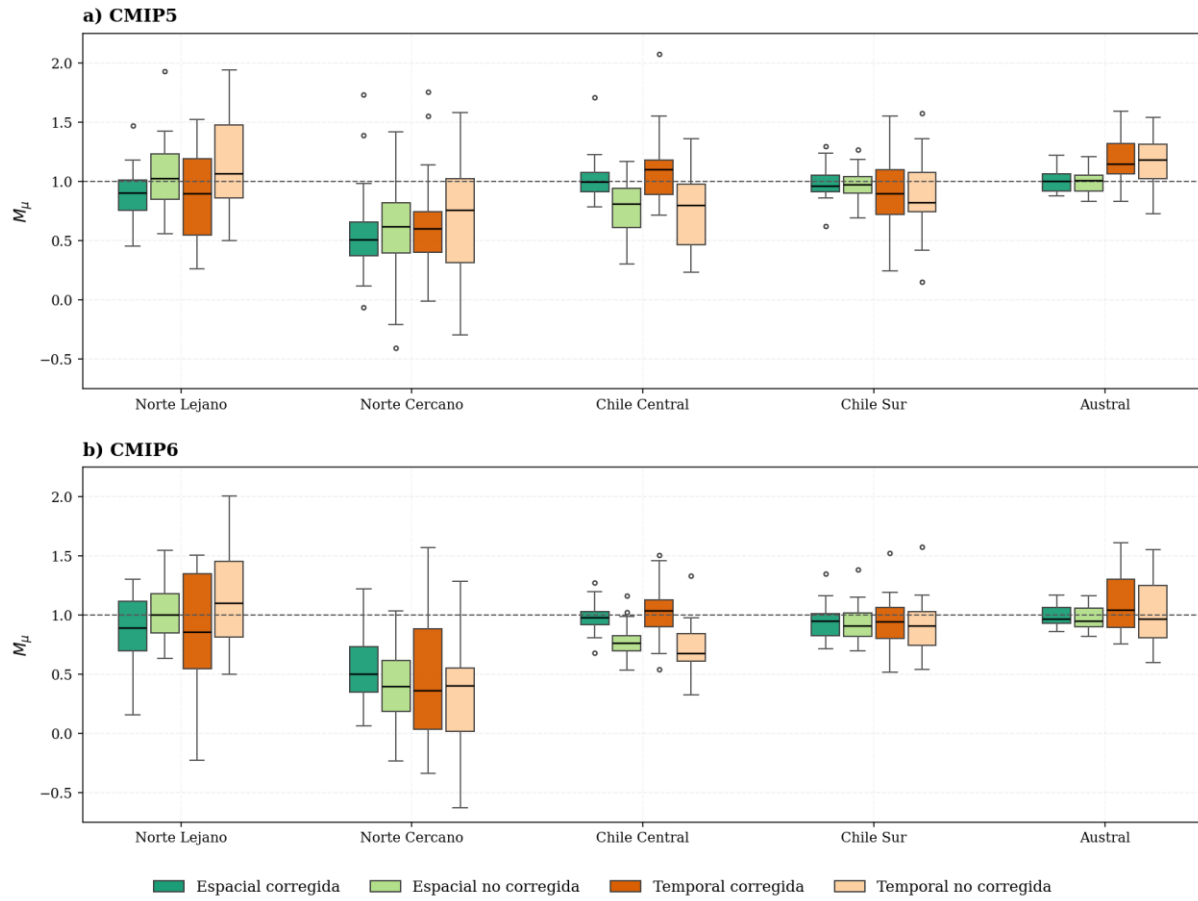


Figura 5-2. Boxplots comparativos de las medias simuladas y observadas (M_{μ}) de T4Rx1day, obtenidas mediante los enfoques espacial y temporal para las temperaturas corregidas y no corregidas por elevación: a) CMIP5 y b) CMIP6.

En ambas generaciones, la corrección de temperatura por elevación mejora generalmente la representación de T4Rx1day en Chile Central, Chile Sur y Austral, aunque en algunos casos las diferencias respecto de las temperaturas no corregidas son mínimas. El mayor efecto se observa en Chile Central bajo el enfoque temporal, donde la mediana aumenta de 0.80 a 1.10 en CMIP5 y de 0.67 a 1.04 en CMIP6 al aplicar la corrección. En contraste, en el Norte Lejano, las temperaturas no corregidas presentan mejores resultados en ambas generaciones. Mientras que, en el Norte Cercano, el efecto depende del enfoque y de la generación de modelos, sin embargo, se mantiene una subestimación generalizada del índice. Respecto de la dispersión entre modelos, el enfoque espacial presenta una desviación estándar menor en todas las macrozonas y en ambas generaciones, tanto para las temperaturas corregidas como no corregidas.

Finalmente, la Figura 5-3 presenta las distribuciones de M_{μ}^{yr} obtenidas para R10y mediante los enfoques espacial y temporal en CMIP5 y CMIP6.

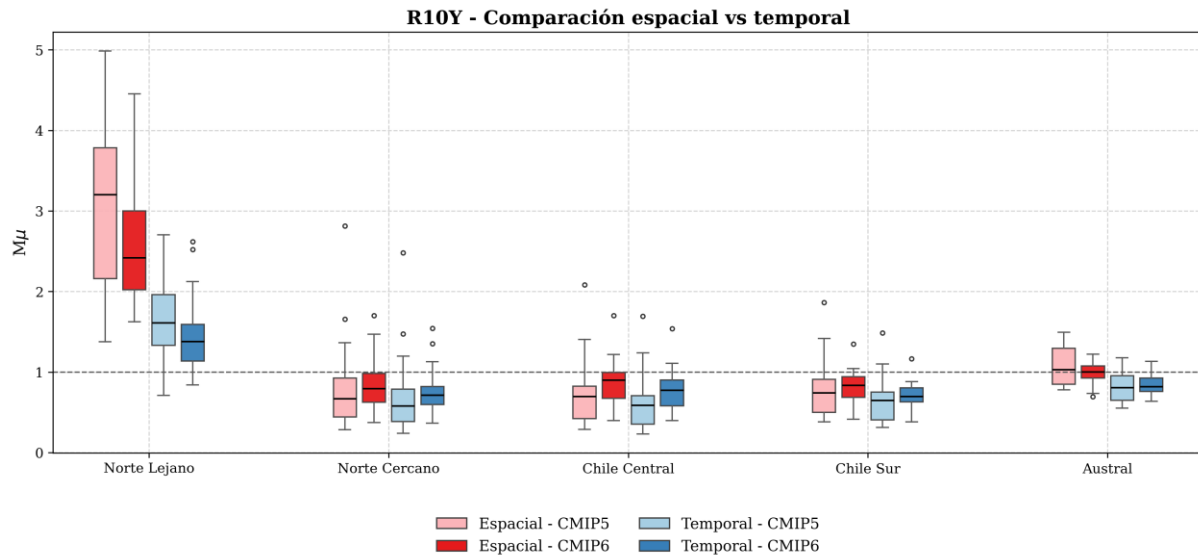


Figura 5-3. Comparación de las distribuciones de M_{μ}^{yr} para R10y obtenidas mediante los enfoques espacial y temporal en CMIP5 y CMIP6.

Para R10y, el enfoque espacial presenta medianas más próximas al valor óptimo en el Norte Cercano, Chile Central, Chile Sur y Austral, tanto en CMIP5 como en CMIP6. En estas macrozonas se observa, en general, una subestimación del índice. El Norte Lejano constituye la única excepción, ya que el enfoque temporal entrega mejores resultados, sin embargo, todos sus valores son sobreestimados.

Respecto de la dispersión entre modelos, el enfoque temporal presenta una desviación estándar menor en todas las macrozonas y en ambas generaciones. La principal diferencia se observa en el Norte Lejano para CMIP6, donde disminuye de 0.69 en el enfoque espacial a 0.44 en el temporal.

5.1.2 Métrica M_{σ}^{yr}

A continuación, se comparan los resultados de M_{σ}^{yr} obtenidos para Rx1day, T4Rx1day y R10y mediante los enfoques espacial y temporal en CMIP5 y CMIP6. La Figura 5-4 presenta las distribuciones obtenidas para Rx1day en las cinco macrozonas analizadas.

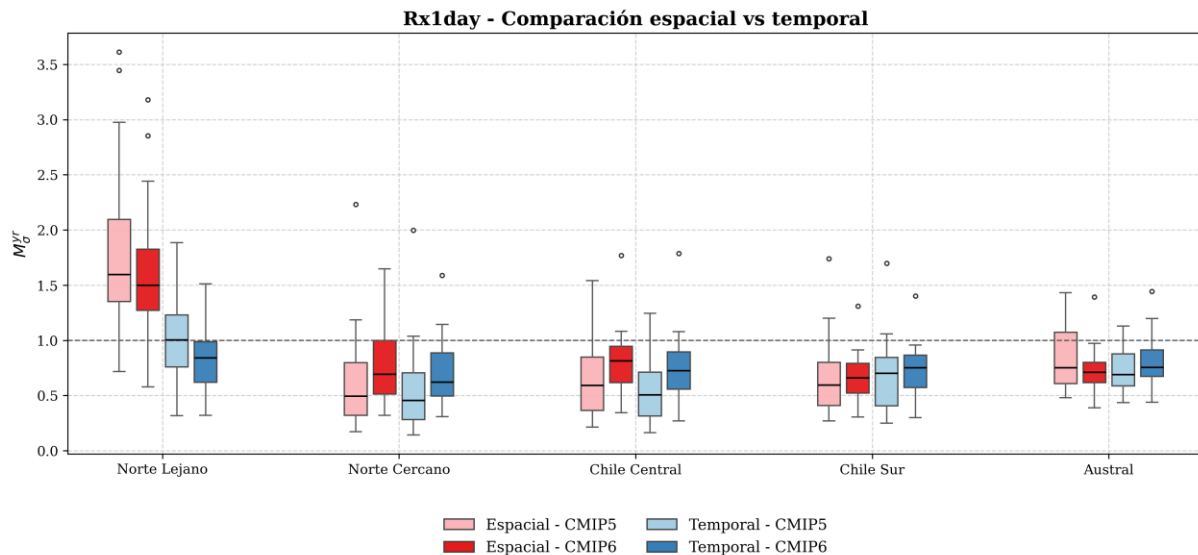


Figura 5-4. Boxplot comparativo de M_{σ}^{yr} para Rx1day considerando el enfoque espacial y temporal en CMIP5 y CMIP6.

La representación de la variabilidad interanual de Rx1day presenta una subestimación generalizada en Norte Cercano, Chile Central, Chile Sur y Austral, tanto en CMIP5 como en CMIP6. Dentro de este grupo, el enfoque espacial reduce la subestimación en Norte Cercano y Chile Central, mientras que el temporal entrega mejores resultados en Chile Sur. Por otro lado, el Norte Lejano presenta un comportamiento diferente, ya que el enfoque espacial sobreestima la variabilidad en ambas generaciones, mientras que el temporal reduce este sesgo y entrega valores más próximos al óptimo.

Respecto de la dispersión entre modelos, el enfoque temporal presenta una desviación estándar menor en Norte Lejano y Norte Cercano para ambas generaciones. En cambio, desde Chile Central hasta la Zona Austral, el enfoque con menor dispersión depende de la generación.

La **Figura 5-5** presenta las distribuciones de M_{σ}^{yr} obtenidas para T4Rx1day mediante los enfoques espacial y temporal en CMIP5 y CMIP6.

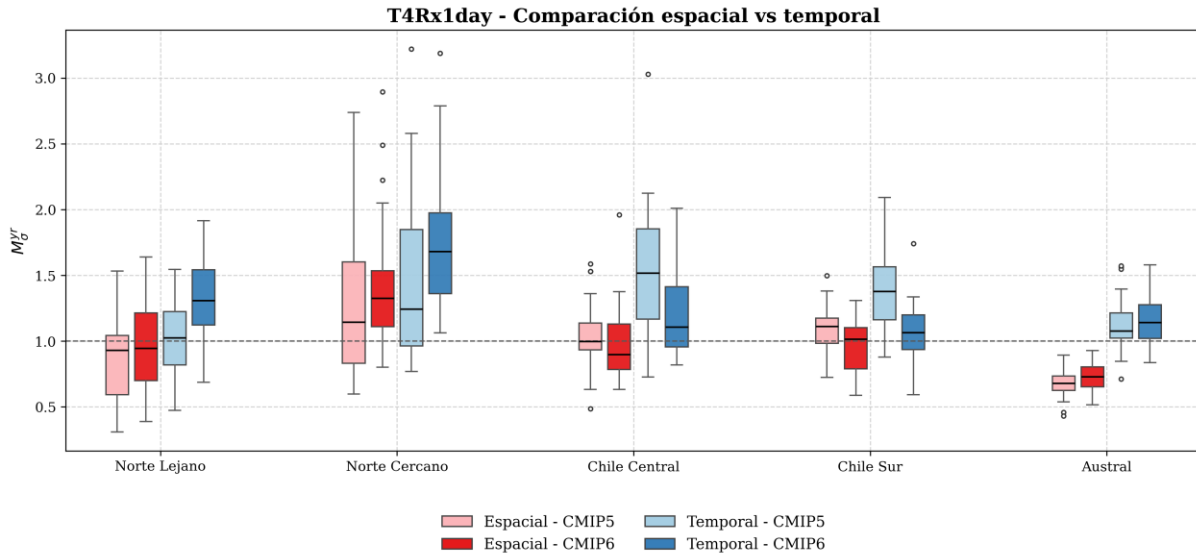


Figura 5-5. Comparación de las distribuciones de M_{σ}^{yr} para T4Rx1day obtenidas mediante los enfoques espacial y temporal en CMIP5 y CMIP6.

Para T4Rx1day, la variabilidad interanual se sobreestima en el Norte Cercano, Chile Central y Chile Sur, principalmente bajo el enfoque temporal. El enfoque espacial reduce esta sobreestimación y presenta medianas más próximas al valor óptimo en ambas generaciones. La mayor dificultad se observa en Norte Cercano, especialmente en CMIP6 bajo el enfoque temporal, donde la mediana alcanza un valor de 1.68. En la Zona Austral se observa el comportamiento contrario, ya que el enfoque espacial subestima considerablemente la variabilidad, mientras que el temporal produce una sobreestimación menor y entrega resultados más próximos al óptimo. En el Norte Lejano, el enfoque con mejor desempeño depende de la generación, siendo el espacial en CMIP6 y el temporal en CMIP5.

La corrección de temperatura por elevación no se considera en esta comparación, debido a que no modifica la desviación estándar de T4Rx1day y, por lo tanto, los resultados de M_{σ}^{yr} son idénticos para las temperaturas corregidas y no corregidas.

Finalmente, la Figura 5-6 compara las distribuciones de M_{σ}^{sp} obtenidas para R10y mediante CMIP5 y CMIP6.

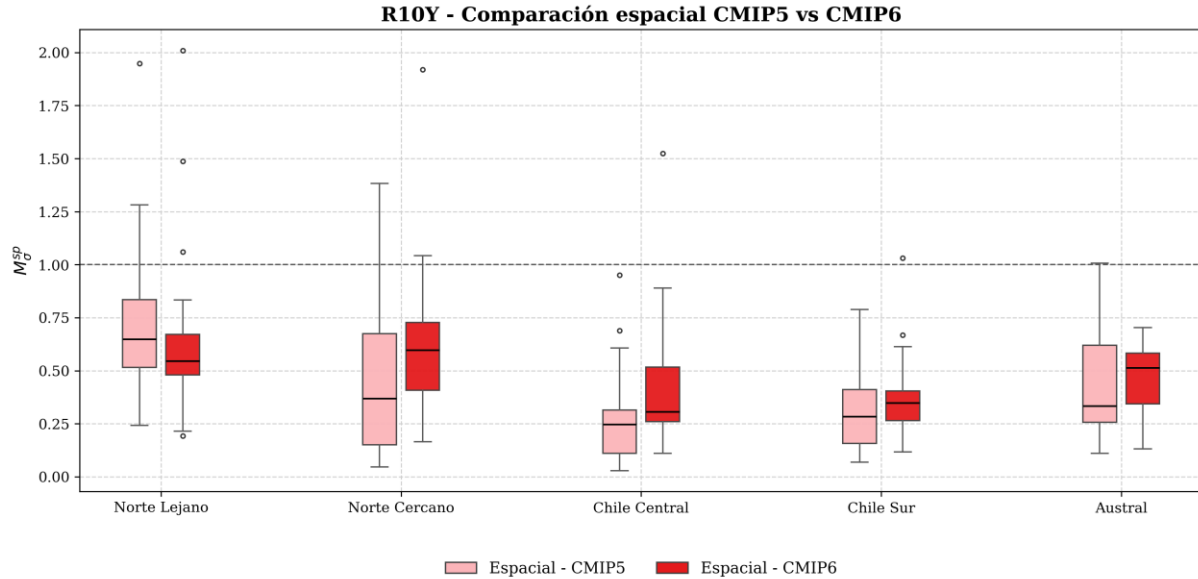


Figura 5-6. Boxplot comparativo de M_{σ}^{sp} para R10y considerando el enfoque espacial de CMIP5 y CMIP6.

La variabilidad espacial de R10y es subestimada en todas las macrozonas por ambas generaciones. CMIP6 reduce esta subestimación en Norte Cercano, Chile Central, Chile Sur y Austral, aunque las medianas permanecen alejadas del valor óptimo. La mayor dificultad se observa en Chile Central, donde las medianas alcanzan solamente 0.25 en CMIP5 y 0.31 en CMIP6. El Norte Lejano constituye la única excepción al mejor desempeño general de CMIP6, ya que CMIP5 presenta una mediana de 0.65, frente a 0.55 en CMIP6.

Respecto de la dispersión, CMIP6 presenta una desviación estándar menor en Norte Lejano, Norte Cercano, Chile Sur y la Zona Austral, mientras que CMIP5 presenta valores menores en Chile Central.

5.1.3 Índice de desempeño pasado (PPI)

La Figura 5-7 presenta los valores de PPI obtenidos mediante los enfoques espacial y temporal para CMIP5 y CMIP6. El eje horizontal representa el PPI de T4Rx1day (PPI_{tas}), mientras que el eje vertical corresponde al PPI conjunto de Rx1day y R10y. Cada punto representa un GCM, los colores identifican la familia a la que pertenece y los números permiten reconocer cada modelo. Los valores más próximos al óptimo (1.1) indican un mejor desempeño de los modelos. Para complementar la comparación, la Tabla 5-1 presenta el promedio de PPI_{pr} , PPI_{tas} y del PPI global para cada generación, enfoque y macrozona, junto con sus respectivas desviaciones estándar entre paréntesis.

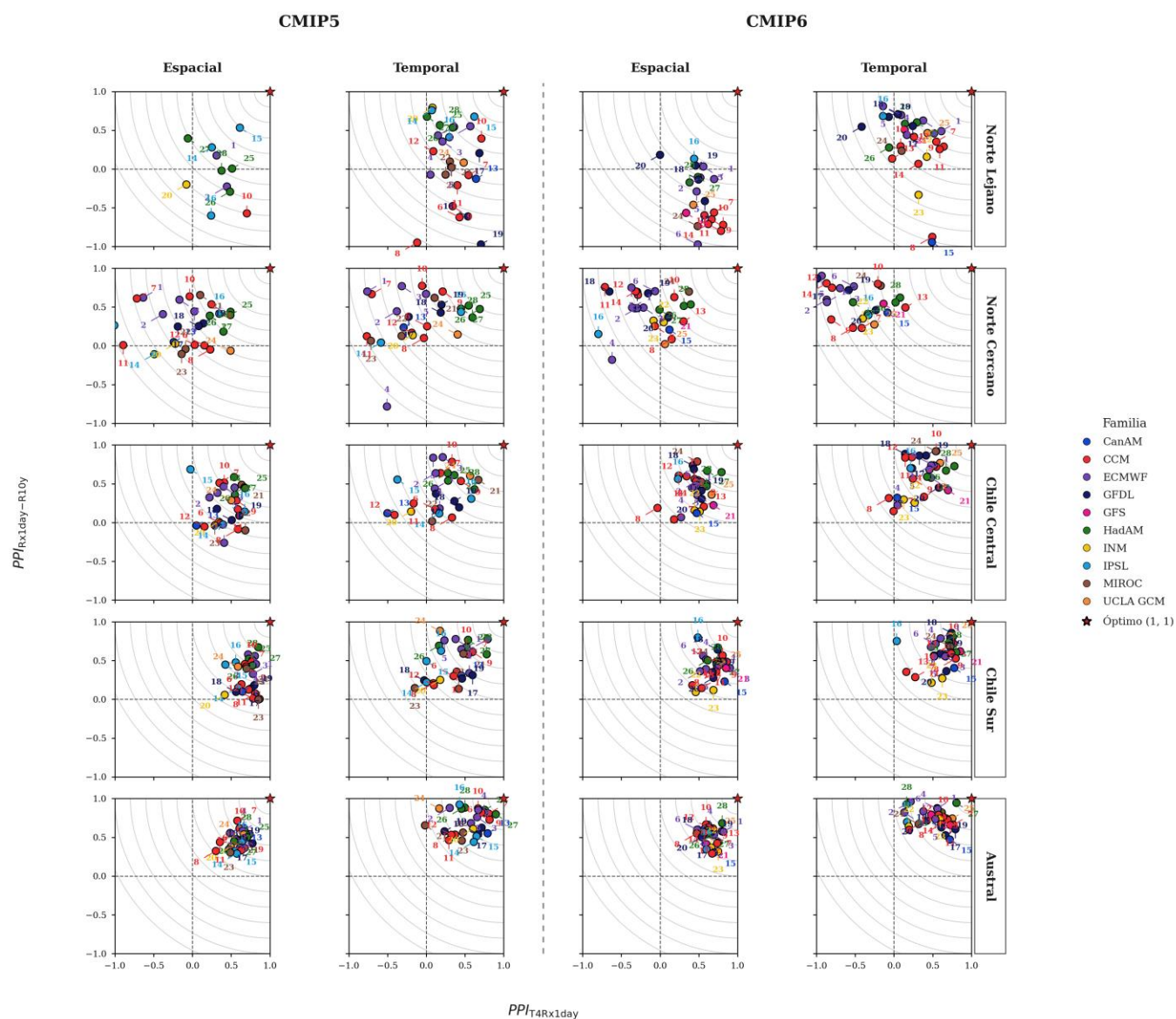


Figura 5-7. Valores de $PPI_{Rx1day-R10y}$ y PPI_{tas} para los modelos CMIP5 y CMIP6 bajo los enfoques espacial y temporal en las cinco macrozonas analizadas. Los colores indican las familias de modelos y la estrella representa el valor óptimo (1.1).

Tabla 5-1. Promedio del PPI de precipitación PPI_{pr} , temperatura PPI_{tas} y global para los 28 GCMs de CMIP5 y CMIP6, según el enfoque de cálculo y la macrozona. Los valores entre paréntesis corresponden a la desviación estándar.

CMIP	Enfoque	Macrozona	PPI Rx1day - R10y	PPI T4Rx1day	PPI Global
CMIP5	Espacial	Norte Lejano	-1.19 (1.08)	0.46 (0.23)	-0.63 (0.71)
		Norte Cercano	0.21 (0.36)	-0.08 (0.41)	0.03 (0.31)
		Chile Central	0.22 (0.25)	0.44 (0.19)	0.31 (0.17)
		Chile Sur	0.30 (0.21)	0.71 (0.12)	0.45 (0.14)
		Austral	0.46 (0.11)	0.60 (0.11)	0.52 (0.09)
	Temporal	Norte Lejano	0.11 (0.50)	0.34 (0.23)	0.18 (0.29)
		Norte Cercano	0.35 (0.32)	-0.14 (0.53)	0.05 (0.37)
		Chile Central	0.39 (0.25)	0.14 (0.38)	0.24 (0.28)
		Chile Sur	0.48 (0.23)	0.35 (0.25)	0.40 (0.20)
		Austral	0.70 (0.16)	0.55 (0.22)	0.60 (0.16)
CMIP6	Espacial	Norte Lejano	-0.71 (0.71)	0.49 (0.18)	-0.27 (0.48)
		Norte Cercano	0.44 (0.25)	-0.15 (0.37)	0.08 (0.26)
		Chile Central	0.43 (0.21)	0.46 (0.17)	0.43 (0.15)
		Chile Sur	0.42 (0.16)	0.69 (0.13)	0.52 (0.12)
		Austral	0.52 (0.11)	0.65 (0.09)	0.57 (0.07)
	Temporal	Norte Lejano	0.33 (0.42)	0.23 (0.27)	0.23 (0.24)
		Norte Cercano	0.56 (0.22)	-0.54 (0.42)	-0.15 (0.28)
		Chile Central	0.61 (0.24)	0.36 (0.23)	0.45 (0.19)
		Chile Sur	0.60 (0.18)	0.62 (0.19)	0.60 (0.16)
		Austral	0.74 (0.12)	0.52 (0.22)	0.60 (0.13)

De la Tabla 5-1 se observa que, las principales dificultades se concentran en las macrozonas del Norte. En el Norte Lejano, CMIP6 mejora respecto de CMIP5, especialmente bajo el enfoque espacial. Sin embargo, el PPI global promedio continúa siendo negativo y presenta la mayor dispersión en comparación al resto de las macrozonas. Por otro lado, en el Norte Cercano depende del enfoque de cálculo, donde en el espacial, CMIP6 presenta un desempeño levemente superior a CMIP5. Esto se debe a que el PPI de T4Rx1day se aleja del valor óptimo en CMIP6, aun cuando mejora el PPI de los índices extremos de precipitación.

En contraste con las macrozonas del Norte, CMIP6 presenta un mejor desempeño promedio que CMIP5 en Chile Central y Chile Sur, principalmente bajo el enfoque temporal. En ambas macrozonas, los promedios de $PPI_{Rx1day-R10y}$ y PPI_{Tas} se encuentran más próximos al valor óptimo, lo que también se refleja en un aumento del PPI global promedio. Este comportamiento se mantiene bajo el enfoque espacial. Además, CMIP6 presenta una menor desviación estándar en todas las macrozonas y bajo ambos enfoques, mostrando una menor dispersión entre los modelos.

Al comparar los enfoques de cálculo en cada generación de modelos, se observa que para CMIP5 el enfoque temporal presenta un mejor desempeño promedio en el Norte Lejano y Austral, mientras que el espacial obtiene mejores resultados en Chile Central y Chile Sur. Por otro lado, en CMIP6, el enfoque temporal tiende a presentar mayores valores del PPI global promedio, con excepción del Norte Cercano, donde el enfoque espacial entrega un mejor resultado.

5.2 Ranking final de los modelos con mejor desempeño.

La Tabla 5-2 presenta el ranking final de los modelos CMIP6 con mejor desempeño histórico en la representación de los índices extremos para cada macrozona y enfoque de cálculo. El ranking correspondiente a CMIP5 se presenta en el Anexo A. 2.

Tabla 5-2. Ranking de los modelos CMIP6 con mejor desempeño para cada macrozona según los enfoques espacial y temporal. Se presentan los valores de PPI para Rx1day, R10y y T4Rx1day, junto con la distancia euclidiana (ED). Los modelos se encuentran ordenados de menor a mayor ED.

	ESPACIAL					TEMPORAL				
	MODELO	PPI_RX1DAY	PPI_R10Y	PPI_T4RX1DAY	ED	MODELO	PPI_RX1DAY	PPI_R10Y	PPI_T4RX1DAY	ED
Norte Lejano	IPSL-CM6A-LR-gn	0.178	0.087	0.439	1.350	EC-Earth3-Veg-LR	0.491	0.853	0.377	0.818
	EC-Earth3-Veg-LR	0.096	-0.027	0.558	1.438	ACCESS-CM2	0.559	0.647	0.296	0.903
	GFDL-CM4-gr2	0.003	0.086	0.458	1.457	MRI-ESM2-0	0.361	0.591	0.434	0.947
	ACCESS-CM2	-0.155	-0.052	0.488	1.644	GFDL-ESM4-gr1	0.489	0.632	0.243	0.985
	MRI-ESM2-0	-0.565	-0.352	0.429	2.146	FGOALS-g3	0.216	0.526	0.547	1.022
	FGOALS-g3	-0.640	-0.479	0.696	2.229	IITM-ESM	0.337	0.785	0.138	1.108
	IITM-ESM	-0.533	-0.598	0.336	2.313					
Norte Cercano	MIROC6-gn	0.576	0.952	0.373	0.759	KACE-1-0-G	0.510	0.780	0.080	1.065
	KACE-1-0-G	0.542	0.522	0.396	0.896	NorESM2-LM	0.398	0.612	0.148	1.113
	TaiESM1	0.524	0.772	0.183	0.972	MIROC6-gn	0.690	0.928	-0.170	1.213
	NESM3-gn	0.876	0.599	-0.065	1.145	IITM-ESM	0.459	0.642	-0.135	1.307
	IITM-ESM	0.513	0.287	0.116	1.236	CanESM5	0.321	0.558	-0.083	1.353
	GFDL-CM4-gr2	0.667	0.687	-0.155	1.243	KIOST-ESM-gr1	0.382	0.550	-0.233	1.451
	INM-CM4-8	0.282	0.326	0.047	1.371	NESM3-gn	0.741	0.793	-0.517	1.553
	CanESM5	0.364	0.076	0.121	1.425	INM-CM5-0	0.304	0.545	-0.337	1.575
						IPSL-CM6A-LR-gn	0.210	0.675	-0.329	1.580
						MRI-ESM2-0	0.034	0.649	-0.252	1.620
Chile Central	KACE-1-0-G	0.846	0.528	0.793	0.538	KACE-1-0-G	0.657	0.825	0.781	0.444
	MIROC6-gn	0.857	0.735	0.480	0.601	TaiESM1	0.889	0.979	0.547	0.467
	GFDL-CM4-gr1	0.853	0.658	0.422	0.688	MIROC6-gn	0.900	0.944	0.540	0.474
	NESM3-gn	0.822	0.313	0.601	0.814	MRI-ESM2-0	0.690	0.893	0.596	0.521
	NorESM2-MM	0.763	0.366	0.533	0.822	NESM3-gn	0.687	0.800	0.513	0.613
	MRI-ESM2-0	0.529	0.225	0.665	0.966	GFDL-CM4-gr2	0.835	0.902	0.415	0.616
						IITM-ESM	0.288	0.583	0.698	0.878
Chile Sur	GFDL-ESM4-gr1	0.777	0.586	0.747	0.534	GFDL-CM4-gr1	0.838	0.880	0.743	0.327
	IPSL-CM6A-LR-gn	0.715	0.966	0.488	0.588	KACE-1-0-G	0.793	0.818	0.760	0.365
	TaiESM1	0.755	0.436	0.807	0.644	MRI-ESM2-0	0.794	0.862	0.727	0.369
	MIROC6-gn	0.642	0.363	0.806	0.756	TaiESM1	0.669	0.776	0.770	0.462
	NESM3-gn	0.777	0.420	0.556	0.764	EC-Earth3	0.746	0.833	0.602	0.500
	ACCESS-CM2	0.701	0.346	0.741	0.765	MIROC6-gn	0.609	0.773	0.729	0.527
	MRI-ESM2-0	0.717	0.263	0.760	0.825	IITM-ESM	0.561	0.687	0.855	0.558
	IITM-ESM	0.620	0.244	0.852	0.859					
Austral	ACCESS-ESM1-5	0.678	0.687	0.802	0.491	ACCESS-CM2	0.922	0.981	0.807	0.209
	CESM2-WACCM	0.682	0.642	0.617	0.614	MRI-ESM2-0	0.644	0.924	0.754	0.440
	EC-Earth3-CC	0.606	0.551	0.797	0.631	EC-Earth3	0.825	0.983	0.558	0.476
	MRI-ESM2-0	0.488	0.695	0.688	0.672	CMCC-ESM2	0.684	0.816	0.677	0.488
	GFDL-CM4-gr1	0.702	0.505	0.606	0.699	INM-CM5-0	0.699	0.793	0.596	0.544
						IITM-ESM	0.714	0.931	0.482	0.596
						GFDL-ESM4-gr1	0.484	0.784	0.793	0.597

Aunque los modelos seleccionados cambian según la macrozona y el enfoque de cálculo, algunos presentan un desempeño favorable en gran parte del territorio. En CMIP6, IITM-ESM y MRI-ESM2-0 aparecen en el ranking temporal de todas las macrozonas, mientras que MRI-ESM2-0 también es seleccionado bajo el enfoque espacial en cuatro de ellas (Norte Lejano, Chile Central, Chile Sur y Austral). En CMIP5, MIROC5 y MRI-CGCM3 forman parte del ranking espacial en todo Chile continental, aunque bajo el enfoque temporal solo se mantienen desde el Norte Lejano hasta Chile Sur. Asimismo, IPSL-CM5B-LR es seleccionado mediante el enfoque temporal en todas las macrozonas, excepto en el Norte Lejano. Sin embargo, ningún modelo es seleccionado simultáneamente en todas las regiones y bajo ambos enfoques de cálculo.

La similitud entre los rankings también cambia entre generaciones. En CMIP5 existe una alta coincidencia entre los modelos seleccionados mediante los enfoques espacial y temporal, llegando a contener los mismos siete modelos en el Norte Cercano. En CMIP6, en cambio, la selección es más sensible al enfoque utilizado y la coincidencia disminuye hacia el sur, hasta alcanzar un único modelo común en Austral. A pesar de estas diferencias, el enfoque temporal presenta menores valores de ED en la mayoría de las macrozonas y en ambas generaciones. La principal excepción corresponde al Norte Cercano en CMIP6, donde el enfoque espacial obtiene mejores resultados. Esto muestra que los enfoques espacial y temporal no entregan evaluaciones equivalentes, ya que modifican tanto los valores de las métricas como los modelos incluidos en el ranking.

La dificultad para representar los índices también depende de la macrozona y del enfoque utilizado. Bajo el enfoque espacial, los menores valores de PPI se relacionan principalmente con los extremos de

precipitación. En el Norte Lejano, tanto Rx1day como R10y presentan valores bajos e incluso negativos, mientras que R10y corresponde al índice con mayores dificultades en Chile Central, Chile Sur y Austral. El Norte Cercano constituye la principal excepción, ya que en esta macrozona los menores valores corresponden a T4Rx1day. Bajo el enfoque temporal se observa un comportamiento diferente, debido a que T4Rx1day presenta los menores valores de PPI en Norte Lejano, Norte Cercano, Chile Central y Austral. Esta dificultad es especialmente marcada en el Norte Cercano, donde varios de los modelos seleccionados presentan valores negativos para este índice, a pesar de reproducir de mejor manera Rx1day y R10y.

5.3 Mapas de cambio climático CMIP6

5.3.1 Rx1day bajo los enfoques espacial y temporal

Las proyecciones de cambio climático de Rx1day obtenidas mediante el enfoque espacial se presentan en la Figura 5-8 para los escenarios SSP5-8.5 y SSP2-4.5. En ambos casos, los cambios se calculan entre el periodo futuro 2070–2100 y el periodo histórico 1985–2014. El panel a) corresponde al escenario SSP2-4.5 y el panel b) al SSP5-8.5. Para cada escenario, la primera columna presenta el cambio porcentual proyectado por los 28 modelos analizados en este estudio (ALL), mientras que la segunda muestra el cambio obtenido al considerar únicamente los modelos con mejor desempeño histórico en cada macrozona según el ranking espacial (BEST). La tercera columna presenta la diferencia absoluta entre ambos conjuntos (BEST – ALL). El Anexo A. 3 presenta los resultados obtenidos mediante el enfoque temporal.

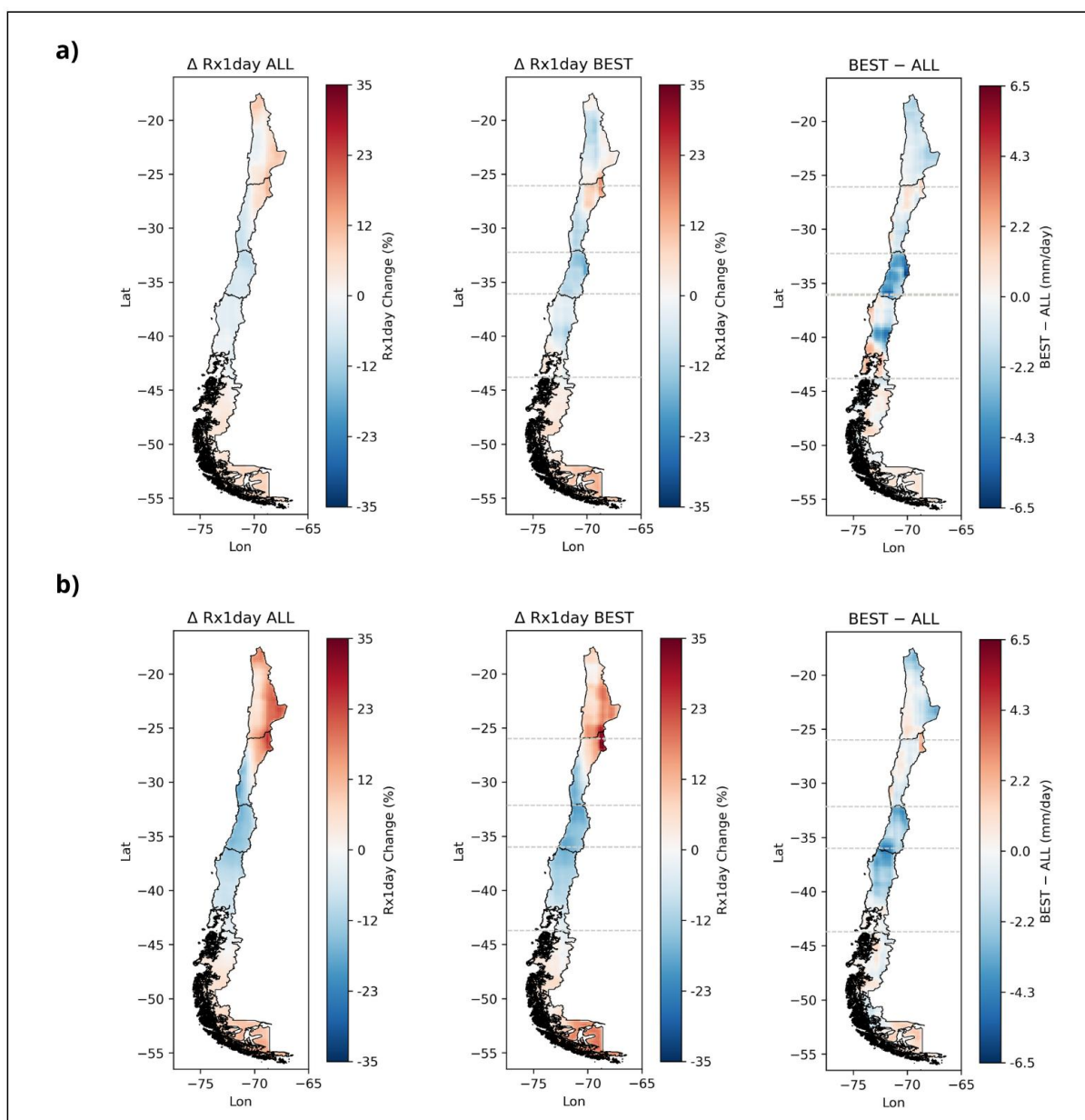


Figura 5-8. Cambios proyectados de Rx1day para el periodo 2070–2100 mediante el enfoque espacial, bajo los escenarios a) SSP2-4.5 y b) SSP5-8.5. Las columnas presentan el cambio porcentual obtenido con el conjunto completo de modelos (ALL), el conjunto de modelos con mejor desempeño histórico (BEST) y la diferencia absoluta entre ambos conjuntos (BEST – ALL), expresada en mm/día.

Para complementar la distribución presentada en la Figura 5-8, la Tabla 5-3 resume los cambios promedio proyectados para Rx1day en cada macrozona, considerando los escenarios SSP5-8.5 y SSP2-4.5. Se presentan los resultados obtenidos con el conjunto completo de modelos CMIP6 (ALL) y con los subconjuntos de modelos de mejor desempeño histórico seleccionados mediante los enfoques espacial y temporal (BEST). Los cambios de ALL y BEST se expresan porcentualmente respecto del periodo histórico 1985–2014, mientras que la diferencia entre ambos conjuntos (BEST – ALL) se presenta en mm/día.

Tabla 5-3. Promedio espacial de los cambios proyectados para Rx1day en cada macrozona, según escenario, conjunto de modelos y enfoque de selección.

Escenario	Macrozona	ALL (%)	BEST espacial (%)	BEST – ALL espacial (mm/día)	BEST temporal (%)	BEST – ALL temporal (mm/día)
SSP5-8.5	Norte Lejano	11.72	9.75	-0.81	6.95	-1.22
	Norte Cercano	0.87	0.58	-0.13	-2.22	-0.86
	Chile Central	-12.84	-15.08	-2.53	-14.55	-2.20
	Chile Sur	-7.30	-8.85	-1.56	-8.81	-1.56
	Austral	5.95	6.65	0.19	5.62	0.13
SSP2-4.5	Norte Lejano	3.37	-2.51	-1.09	-1.35	-0.96
	Norte Cercano	-0.31	-0.89	-0.23	-0.73	-0.07
	Chile Central	-5.68	-10.20	-3.21	-8.65	-2.25
	Chile Sur	-2.24	-2.70	-0.41	-3.88	-1.26
	Austral	4.44	4.79	0.16	4.95	0.34

Bajo el escenario SSP5-8.5, ALL y ambos subconjuntos BEST proyectan aumentos promedio de Rx1day en Norte Lejano y Austral, y disminuciones promedio en Chile Central y Chile Sur. El mayor aumento promedio se registra en Norte Lejano, donde ALL alcanza un valor de +11.72%, mientras que BEST reduce esta magnitud a +9.75% bajo el enfoque espacial y +6.95% bajo el temporal. Por otro lado, la mayor reducción promedio se concentra en Chile Central, donde el cambio de -12.84% obtenido con ALL se intensifica hasta -15.08% con BEST espacial y -14.55% con BEST temporal. La única excepción se produce en Norte Cercano, donde los enfoques presentan señales distintas, ya que BEST espacial mantiene un cambio promedio ligeramente positivo, mientras que BEST temporal proyecta una disminución de este índice.

Bajo el escenario SSP2-4.5, ambos subconjuntos BEST proyectan disminuciones promedio desde Norte Lejano hasta Chile Sur y aumentos promedio en Austral. La principal diferencia respecto de ALL se observa en Norte Lejano, donde la selección modifica el signo del cambio en ambos enfoques. Chile Central vuelve a presentar las mayores reducciones promedio, con -10.20% bajo el enfoque espacial y -8.65% bajo el temporal, frente a -5.68 % con ALL. En Austral, en cambio, ambos enfoques mantienen la señal positiva.

En general, SSP5-8.5 presenta cambios de mayor magnitud que SSP2-4.5 y mantiene la misma señal en la mayoría de las macrozonas. La principal diferencia se observa en Norte Lejano, donde BEST proyecta aumentos bajo SSP5-8.5 y disminuciones bajo SSP2-4.5. En Norte Cercano, la señal solo cambia con BEST espacial, pasando de valores positivos bajo SSP5-8.5 a negativos bajo SSP2-4.5.

5.3.2 T4Rx1day bajo los enfoques espacial y temporal

Las proyecciones de cambio climático de T4Rx1day obtenidas mediante el enfoque espacial se presentan en la Figura 5-9 para los escenarios SSP5-8.5 y SSP2-4.5. El panel a) corresponde a SSP2-4.5 y el panel b) a SSP5-8.5. Para cada escenario, las columnas muestran el cambio proyectado por el conjunto completo de modelos (ALL), el conjunto de modelos con mejor desempeño histórico según el ranking espacial (BEST) y la diferencia entre ambos conjuntos (BEST – ALL). Los resultados equivalentes obtenidos mediante el enfoque temporal se presentan en el Anexo A. 4.

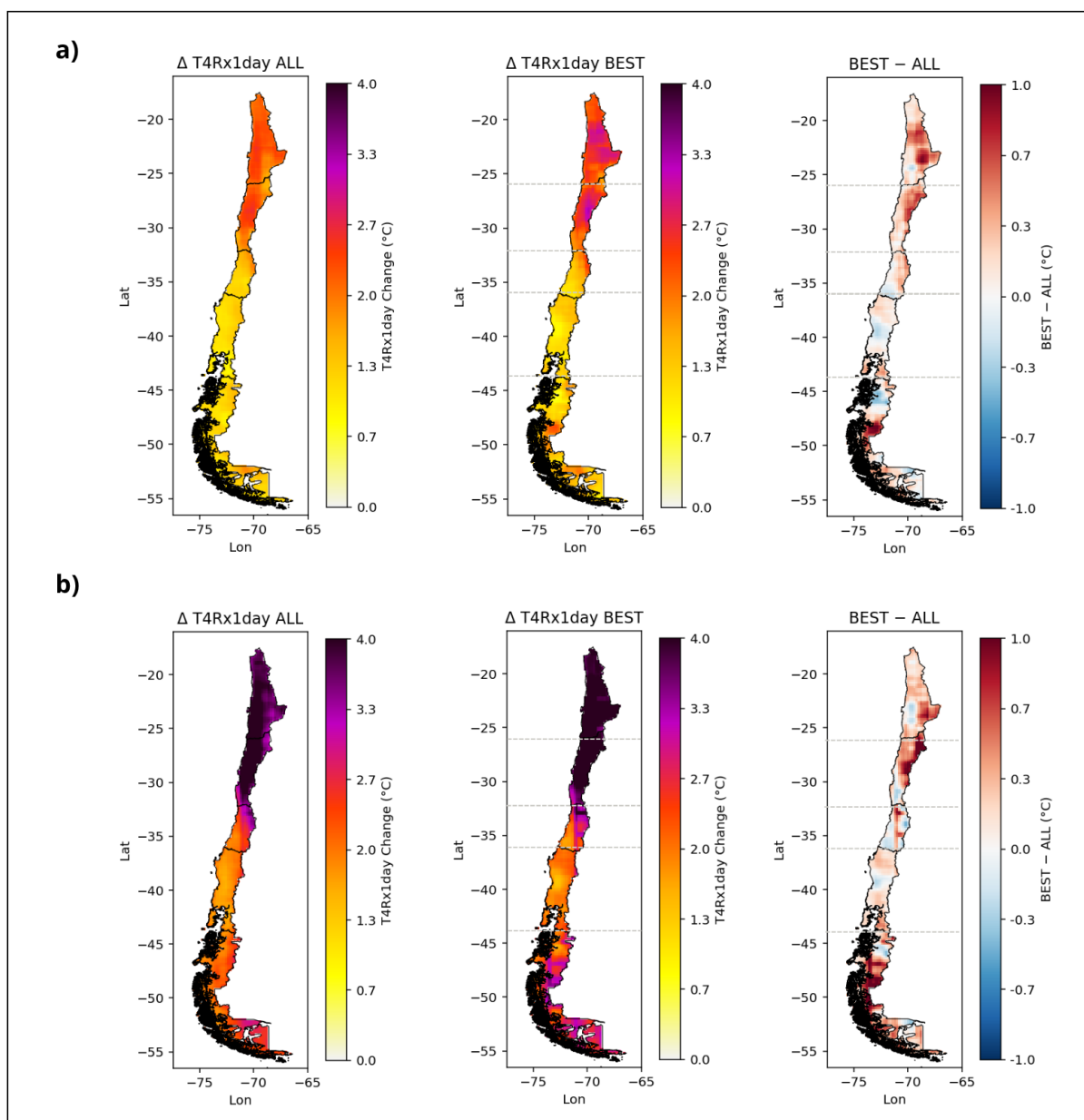


Figura 5-9. Cambios proyectados de T4Rx1day entre los periodos histórico 1985–2014 y futuro 2070–2100, obtenidos mediante el enfoque espacial bajo los escenarios a) SSP2-4.5 y b) SSP5-8.5. Las columnas presentan los resultados del conjunto completo de modelos (ALL), el conjunto de modelos con mejor desempeño histórico (BEST) y la diferencia entre ambos conjuntos (BEST – ALL), expresados en °C.

Para complementar la distribución espacial presentada en la Figura 5-9, la Tabla 5-4 resume los cambios promedio proyectados para T4Rx1day en cada macrozona bajo los escenarios SSP5-8.5 y SSP2-4.5. Se presentan los resultados obtenidos con ALL y con los subconjuntos BEST seleccionados mediante los enfoques espacial y temporal, junto con la diferencia entre cada subconjunto y el conjunto completo. Todos los valores se expresan en °C y corresponden al promedio espacial de los píxeles que conforman cada macrozona.

Tabla 5-4. Promedio espacial de los cambios proyectados para T4Rx1day en cada macrozona, según escenario, conjunto de modelos y enfoque de selección.

Escenario	Macrozona	ALL (°C)	BEST espacial (°C)	BEST – ALL espacial (°C)	BEST temporal (°C)	BEST – ALL temporal (°C)
SSP5-8.5	Norte Lejano	3.94	4.19	0.26	4.07	0.13
	Norte Cercano	4.09	4.54	0.45	4	-0.09
	Chile Central	2.56	2.65	0.09	2.54	-0.03
	Chile Sur	1.86	2.01	0.16	1.84	-0.01
	Austral	2.22	2.61	0.39	2.16	-0.06
SSP2-4.5	Norte Lejano	2.19	2.51	0.32	2.34	0.15
	Norte Cercano	2.09	2.41	0.31	2.21	0.11
	Chile Central	1.37	1.49	0.12	1.66	0.29
	Chile Sur	1.14	1.22	0.08	1.08	-0.06
	Austral	1.25	1.41	0.16	1.21	-0.04

Las proyecciones de T4Rx1day muestran un calentamiento generalizado en Chile continental, con incrementos en todas las macrozonas, escenarios y conjuntos de modelos. Bajo SSP5-8.5, los mayores aumentos se concentran en Norte Lejano y Norte Cercano, mientras que desde Chile Central hacia el sur las magnitudes son menores. Para BEST espacial, el incremento máximo se proyecta en Norte Cercano, con +4.54 °C, mientras que BEST temporal presenta su mayor valor en Norte Lejano, con +4.07 °C. En comparación con ALL, la selección espacial intensifica el calentamiento en todas las macrozonas, destacando Norte Cercano y Austral, donde la diferencia BEST – ALL alcanza +0.45 °C y +0.39 °C, respectivamente.

En comparación con SSP5-8.5, el escenario SSP2-4.5 proyecta aumentos promedio de menor magnitud en todas las macrozonas. Dentro de este escenario, los mayores incrementos se concentran en Norte Lejano bajo ambos enfoques de selección, alcanzando +2.51 °C con BEST espacial y +2.34 °C con BEST temporal. Desde Chile Central hacia el sur, los aumentos proyectados son menores. En comparación con ALL, BEST espacial intensifica el calentamiento en todas las macrozonas, mientras que BEST temporal entrega aumentos ligeramente menores en Chile Sur y Austral.

5.3.3 R10y bajo los enfoques espacial y temporal

La Figura 5-10 presenta los cambios proyectados de R10y bajo el enfoque espacial para los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5. En cada escenario se compara el conjunto completo de modelos (ALL) con el subconjunto de mejor desempeño histórico (BEST). Los dos primeros paneles muestran el cambio porcentual respecto del periodo histórico, mientras que el tercero presenta la diferencia absoluta BEST-ALL en mm/día. Los resultados correspondientes al enfoque temporal se presentan en el Anexo A. 5.

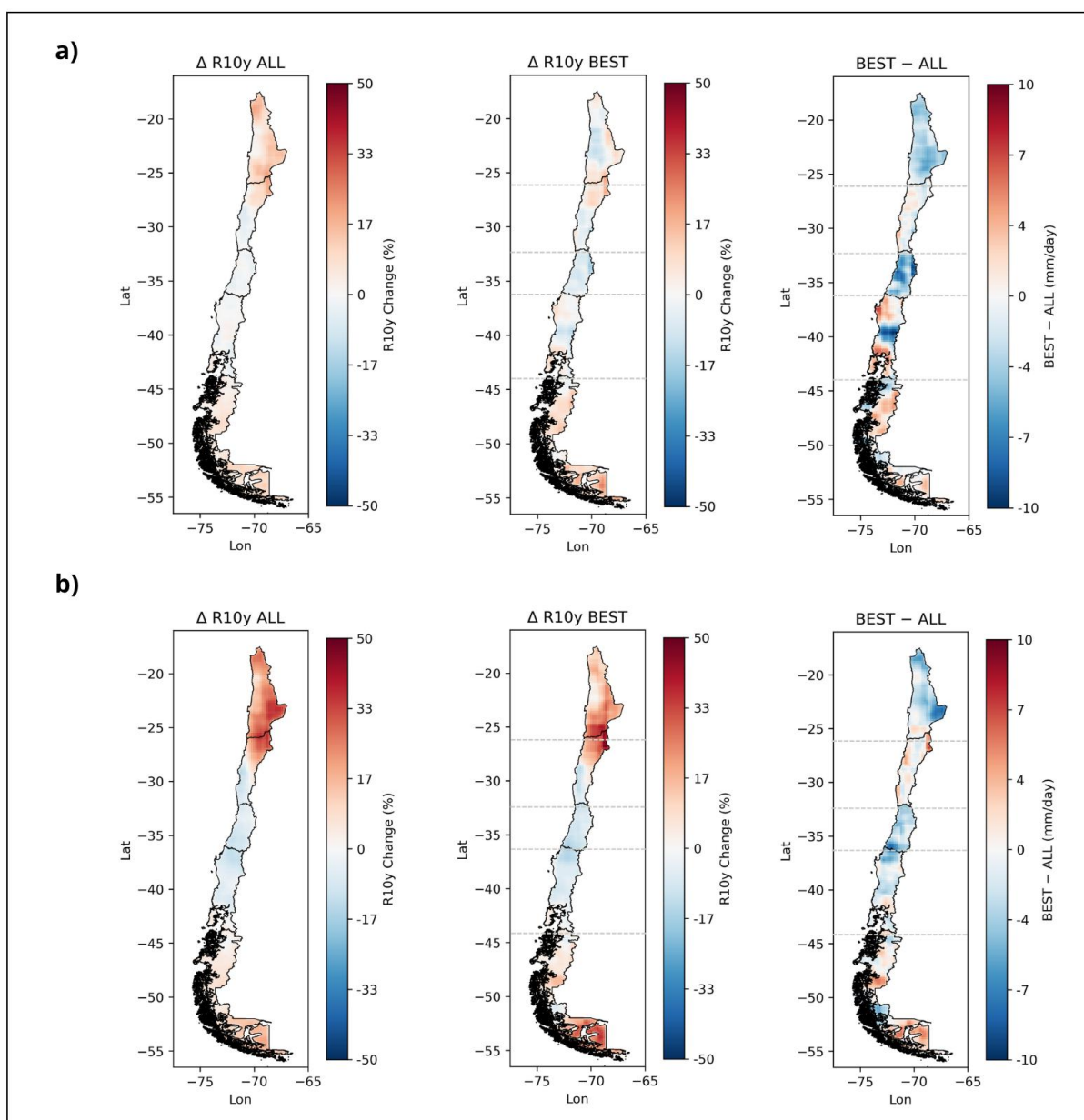


Figura 5-10. Cambios proyectados de R10y mediante el enfoque espacial para los escenarios a) SSP2-4.5 y b) SSP5-8.5. En cada fila se presenta el cambio porcentual obtenido con el conjunto completo de modelos (ALL), el subconjunto de mejor desempeño histórico (BEST) y la diferencia absoluta entre ambos conjuntos (BEST – ALL), expresada en mm/día.

Para complementar la distribución espacial presentada en la Figura 5-10, la Tabla 5-5 resume los cambios promedio de R10y en cada macrozona. Los resultados de ALL y BEST se expresan como cambios porcentuales respecto del periodo histórico, mientras que la diferencia BEST–ALL se presenta en unidades absolutas de mm/día. La tabla incorpora los subconjuntos BEST obtenidos mediante los enfoques espacial y temporal, lo que permite evaluar cómo cambia la proyección al seleccionar los modelos según cada enfoque de cálculo.

Tabla 5-5. Cambios promedio proyectados de R10y por escenario y macrozona para el conjunto completo de modelos (ALL) y los subconjuntos de mejor desempeño histórico (BEST) obtenidos mediante los enfoques espacial y temporal. Los cambios de ALL y BEST se expresan porcentualmente respecto del período histórico, mientras que las diferencias BEST – ALL se presentan en mm/día.

Escenario	Macrozona	ALL (%)	BEST espacial (%)	BEST-ALL espacial (mm/día)	BEST temporal (%)	BEST-ALL temporal (mm/día)
SSP2-4.5	Norte Lejano	9.82	-0.16	-3.06	1.14	-2.81
	Norte Cercano	2.91	2.41	-0.17	2.46	0.22
	Chile Central	-1.20	-5.93	-4.32	-1.39	-0.14
	Chile Sur	0.09	0.08	0.07	-2.07	-1.82
	Austral	6.27	6.52	0.08	6.29	0.04
SSP5-8.5	Norte Lejano	23.61	16.93	-2.61	16.71	-2.73
	Norte Cercano	8.85	10.49	0.64	6.57	-0.52
	Chile Central	-6.13	-8.37	-3.05	-6.40	-0.98
	Chile Sur	-4.33	-5.25	-1.34	-6.91	-2.71
	Austral	8.43	10.01	0.52	8.14	0.18

Las proyecciones de R10y reproducen parcialmente el patrón observado para Rx1day. Bajo el escenario SSP5-8.5, ambos índices aumentan en Norte Lejano y Austral y disminuyen en Chile Central y Chile Sur en ambos enfoques. Sin embargo, para R10y los cambios son más intensos en Norte Lejano, donde el aumento promedio alcanza +23.61% con ALL y se reduce a valores cercanos al +17% en ambos subconjuntos BEST. Bajo SSP2-4.5, R10y presenta un comportamiento diferente al de Rx1day en las macrozonas del Norte. Mientras BEST proyecta disminuciones de Rx1day en Norte Lejano y Norte Cercano, R10y proyecta un cambio promedio cercano a cero en Norte Lejano y aumentos en Norte Cercano.

Se observa que el efecto de seleccionar los modelos de mejor desempeño presenta diferencias en las distintas macrozonas. Por una parte, en el Norte Lejano ambos subconjuntos BEST reducen los aumentos proyectados por ALL en los dos escenarios, siendo mayor bajo el escenario SSP2-4.5. Por otra parte, en Chile Central y Chile Sur la selección tiende a intensificar las disminuciones, aunque el mayor efecto se obtiene con BEST espacial en Chile Central y con BEST temporal en Chile Sur. En Norte Cercano y Austral, el comportamiento depende del escenario y del enfoque. Bajo SSP5-8.5, BEST espacial intensifica los aumentos de ALL, mientras que BEST temporal los reduce.

6 Discusión

6.1 Conjunto de mejores modelos

Los estudios de Gateño et al. (2024), Salazar et al. (2024) y Rivera & Arnould (2020) basados en la evaluación de modelos CMIP6 para climatología media de precipitación y temperatura en Chile y Sudamérica, señalan que los GCMs seleccionados a partir de su desempeño varían según la región analizada, mostrando que no existe un modelo óptimo para todas las macrozonas y que un GCM con buen desempeño en una región puede ser deficiente en otra. Los resultados obtenidos en este estudio para extremos muestran este mismo comportamiento, donde al construir los rankings finales a partir del desempeño histórico de los conjuntos CMIP5 y CMIP6, se observa que los mejores modelos cambian según la macrozona climática de Chile y según el enfoque de cálculo utilizado, ya sea espacial o temporal.

Para Chile Sur, la familia GFDL presenta un buen desempeño en extremos bajo los enfoques espacial y temporal del CMIP6. Resultados similares se presentan en el estudio de Salazar et al. (2024), quienes identifican esta familia con un buen rendimiento para Chile en general, destacando específicamente a GFDL-CM4 en la Patagonia Norte. Por otro lado, CanESM5 ha sido identificado como uno de los modelos con buen desempeño para climatología media en los estudios de Gateño et al. (2024) para todas las macrozonas, Salazar et al. (2024) para Chile Central y Rivera & Arnould (2020) en Sudamérica. Sin embargo, no destaca en la evaluación de extremos, presentando posiciones bajas en los rankings, e incluso quedando fuera de la selección final en Norte lejano, Chile Central, Chile Sur y Zona Austral, tanto para el ranking espacial como el temporal del CMIP6. En el caso de CMIP5, CanESM2, perteneciente a la misma familia, destaca solo en el Norte Lejano cuando el cálculo se realiza espacialmente, y en la Zona Austral cuando se hace de forma temporal, sin embargo, muestra posiciones bajas. Este contraste indica que CanESM5 presenta una mayor capacidad para representar la climatología media que los extremos analizados en este estudio. Por lo tanto, su buen desempeño bajo condiciones medias no se mantiene al evaluar eventos extremos.

Para el Norte Lejano el modelo IPSL-CM6A-LR, aparece como el mejor evaluado para extremos bajo el enfoque espacial, al igual que IPSL-CM5A-MR en CMIP5 bajo ambos enfoques. A pesar de esto, Rivera & Arnould (2020) y Gateño et al. (2024) reportan un bajo desempeño de este modelo en la estacionalidad de la precipitación en el Norte Lejano, Norte Cercano y Chile Central. En esta última macrozona, destaca MIROC6, que se ubica entre los modelos mejor posicionados para extremos bajo ambos enfoques, al igual que MIROC5 en CMIP5. Esto contrasta con Gateño et al. (2024), quienes reportan bajo desempeño de esta familia para Chile Central, aunque Rivera & Arnould (2020) identifican a MIROC6 entre los modelos con mejor capacidad para reproducir el patrón espacial de precipitación anual sobre Chile.

El conjunto completo de GCMs antes de seleccionar el 60% de los modelos con mejor desempeño y el filtro por familia (Anexo A. 6), también permite identificar algunas coincidencias. Por ejemplo, BCC-CSM2-MR se ubica entre los modelos con peor desempeño en el Norte Lejano y Chile Central bajo los enfoques espacial y temporal de CMIP6, lo que coincide con Gateño et al. (2024), quienes también reportan un bajo desempeño de este modelo, considerándolo como uno de los GCMs que siempre producen los peores valores de PPI. En el Norte Cercano, CMCC-CM2-SR5 presenta un bajo desempeño para extremos bajo ambos enfoques, coincidiendo con Gateño et al. (2024) que también lo consideran deficiente para esta macrozona, al igual que FGOALS en Chile Central, donde para este estudio, presenta un bajo rendimiento tanto en el enfoque temporal como espacial. Para Chile Sur, NorESM2-LM presenta bajo desempeño en extremos, lo que también concuerda con Gateño et al. (2024), que lo clasifica como un modelo deficiente para la macrozona, mientras que Ortega et al. (2021) lo destaca como el modelo con mejor desempeño (a partir de diagramas de Taylor) para evaluar la precipitación sobre Chile.

6.1.1 Proyecciones de modelos seleccionados para extremos vs clima medio

Como complemento de la discusión, se realiza un análisis adicional para evaluar cómo cambian las proyecciones al utilizar una selección de modelos basada en el desempeño para extremos, en comparación con una selección basada en climatología media. Para ello, la Figura 6-1 presenta las series de tiempo, históricas y futuras bajo el escenario SSP5-8.5 para el conjunto completo de modelos (línea negra), el subconjunto de mejor desempeño histórico para extremos bajo el enfoque espacial (línea azul), el conjunto de mejores modelos seleccionados por Gateño et al. (2024) para climatología media (línea roja) y las observaciones históricas (línea segmentada naranja). Además, se presentan boxplots que muestran las diferencias entre las proyecciones futuras e históricas de los índices Rx1day y T4Rx1day para los tres conjuntos analizados. En general, se puede observar que el criterio utilizado para seleccionar los modelos influye principalmente en la magnitud de los cambios proyectados de Rx1day. Esto se observa fuertemente en las macrozonas Chile Central, Chile Sur y la Zona Austral, donde el conjunto seleccionado por Gateño et al. (2024) proyecta un aumento menor que el conjunto basado en extremos. Para T4Rx1day, ocurre lo mismo, donde para las macrozonas Norte Cercano, Chile Central y la Zona Austral, se observa visualmente que los modelos considerados para extremos muestran proyecciones más elevadas. Esto destaca la importancia de utilizar criterios de selección acordes con la variable analizada, ya que considerar el conjunto completo de modelos o seleccionar aquellos con buen desempeño en climatología media puede conducir a proyecciones de extremos distintas de las obtenidas mediante una evaluación específica de estos eventos.

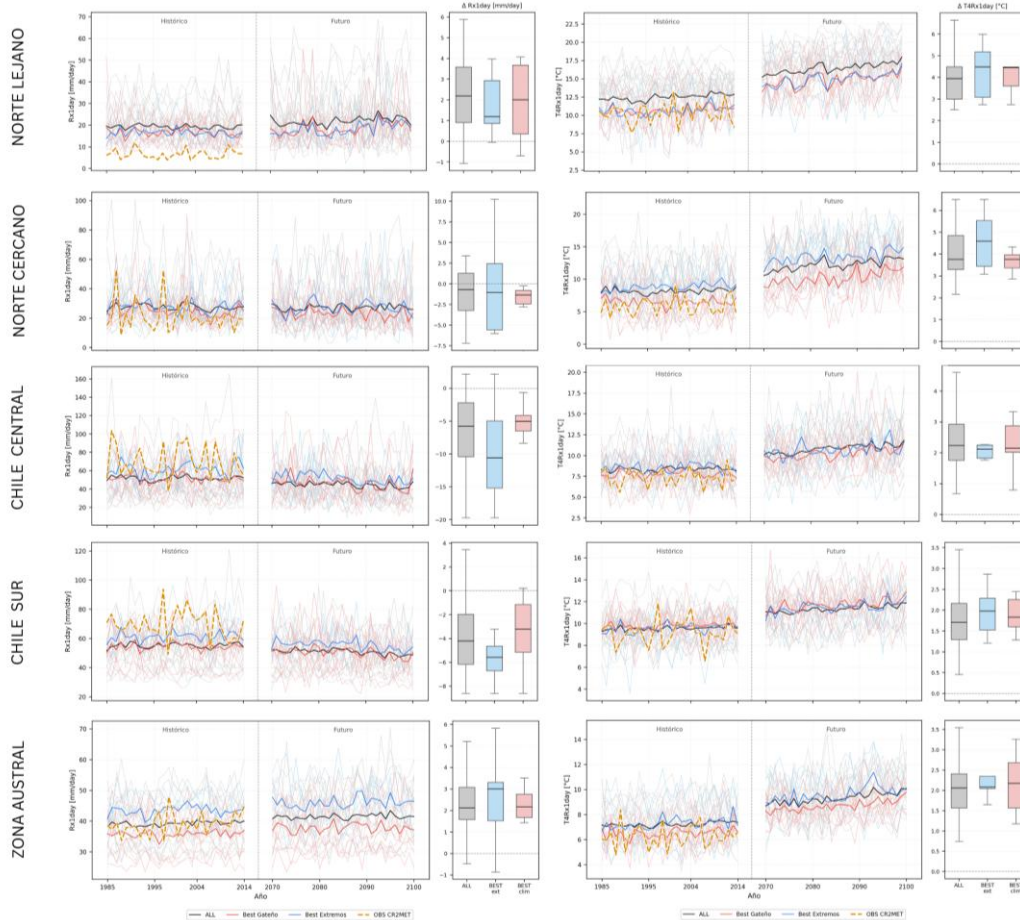


Figura 6-1. Series de tiempo, comparando el conjunto completo de GCMs frente a los modelos de mejor desempeño del estudio de Gateño et al. (2024), junto a los modelos en base al ranking espacial para extremos, para el escenario SSP5-8.5.

6.2 Diferencias entre conjuntos CMIP

Los resultados concuerdan con Ortega et al. (2021), quienes reportan un mejor desempeño de CMIP6 respecto de CMIP5 en la representación de la precipitación sobre Sudamérica. En este estudio, Rx1day bajo el enfoque espacial y temporal, presenta medianas de M_μ más cercanas al valor óptimo para el Norte Lejano, Norte Cercano, Chile Central y Chile Sur. La excepción es la Zona Austral, donde CMIP5 presenta un valor ligeramente más cercano al óptimo, con 1.09, frente a 1.11 en CMIP6 para el enfoque espacial y 0.82, frente a 0.79 para el temporal. Respecto de la variabilidad interanual, CMIP6 presenta mejores resultados en Norte Cercano, Chile Central, Chile Sur y Austral bajo el enfoque temporal. La excepción corresponde al Norte Lejano, donde CMIP5 alcanza una mediana de M_σ^{yr} de 1.01, mientras que CMIP6 obtiene 0.84. Bajo el enfoque espacial, CMIP6 representa mejor la variabilidad en Norte Lejano, Norte Cercano, Chile Central y Chile Sur, mientras que CMIP5 presenta un resultado levemente superior en Austral, con una mediana de 0.75, frente a 0.71 para CMIP6.

Rivera & Arnould (2020) señalan que la mejora de CMIP6 no elimina las dificultades de representar la precipitación en el suroeste de Sudamérica, donde los modelos CMIP6 mantienen sesgos importantes, especialmente un sesgo húmedo al sur de los 35°S, en la cordillera de los Andes y en el sur de Chile. Aunque esta conclusión se obtuvo a partir del análisis de condiciones climatológicas medias, los resultados del presente estudio muestran algunas coincidencias. Rx1day muestra este sesgo húmedo, principalmente en la Zona Austral, mencionada en el párrafo anterior, donde las medianas espaciales (M_μ) alcanzan valores de 1.09 en CMIP5 y 1.11 en CMIP6, indicando que la nueva generación también presenta un sesgo húmedo. Sin embargo, Chile Sur presenta medianas por debajo del valor óptimo, con valores de 0.70 en CMIP5 y 0.88 en CMIP6, lo que indica una subestimación del índice, que se vuelve menor para la sexta generación de modelos climáticos globales a diferencia de lo que señalan los autores.

6.3 Cambio climático

Gateño et al. (2024) y Salazar et al. (2024) proyectan una disminución de la precipitación media en Chile Central bajo el escenario SSP5-8.5. En particular, Salazar et al. (2024) estiman reducciones de aproximadamente -20% a -40% en Chile Central, mientras que Gateño et al. (2024) proyectan disminuciones cercanas al -37% para la Zona Central de Chile. Aunque estos estudios analizan condiciones climatológicas medias, los resultados del presente estudio muestran un patrón concordante para los extremos de precipitación. Para Rx1day, bajo el enfoque espacial y utilizando el conjunto BEST, el 90% de los cambios proyectados en Chile Central se encuentra entre -18.79% y -10.61% bajo SSP5-8.5. Asimismo, R10y presenta reducciones, entre -13.46% y -3.94%. Por lo tanto, la disminución proyectada para la precipitación media también se refleja en extremos, aunque con reducciones menores que las reportadas para climatología media.

Respecto de la temperatura, Vásquez et al. (2025) y Salazar et al. (2024) identifican los mayores incrementos en el Norte de Chile y sobre la cordillera de los Andes. Salazar et al. (2024) proyectan aumentos de hasta aproximadamente 6 °C en el Norte, bajo SSP5-8.5, seguidos por incrementos de hasta 5 °C en Chile Central y de hasta 4 °C en Patagonia. Vásquez et al. (2025) obtienen un patrón similar, con aumentos de entre 4 °C y 5 °C en el Norte y los Andes. En el presente estudio, T4Rx1day también aumenta en todas las macrozonas, lo que indica que los eventos de precipitación máxima anual ocurrirían bajo condiciones más cálidas. Para el conjunto BEST espacial, el mayor aumento promedio se proyecta en Norte Cercano, seguido por Norte Lejano, presentando cambios entre 3.29 y 5.48 °C en Norte Cercano y entre 3.79 y 4.74 °C en Norte Lejano. Por otro lado, a pesar de que en este estudio no se evalúa el aumento de la línea relacionada al punto de congelación, se podría de igual forma asumir que el aumento generalizado de la temperatura para eventos extremos, podría aumentar la isoterma 0° cuando ocurran lluvias intensas y por ende aumentar las áreas de escurrimiento por lluvia, como señala Vásquez et al. (2025), donde se proyecta un aumento de 500 m en todas las cuencas del país, donde la zona más afectada sería el Norte de Chile con incrementos de hasta 1000 m bajo condiciones de clima medio.

6.4 Limitaciones

Una limitación corresponde a la base observacional utilizada para evaluar los modelos. En este estudio se emplearon registros diarios de estaciones meteorológicas, mientras que otros estudios, como Gateño et al. (2024) y Salazar et al. (2024), utilizan otras bases de referencia como el producto grillado CR2MET. Por esta razón, la comparación debe realizarse con cautela, ya que las diferencias en el desempeño y en el ranking de los GCMs también pueden estar condicionadas por los datos observacionales utilizados.

La principal limitación se relaciona con las diferencias de escala entre los GCMs y las estaciones meteorológicas. Aunque las simulaciones fueron llevadas a una grilla de 0.2° , los valores obtenidos continúan dependiendo de la resolución original de cada modelo. El regrillado divide o redistribuye la información disponible sobre una malla común, pero no incorpora nuevos datos sobre las variaciones de precipitación y temperatura diarias. A esto se suma que una estación registra las condiciones meteorológicas en un punto específico, mientras que el valor de una celda de un GCM representa las condiciones promedio de un área mucho mayor. En zonas con fuertes variaciones de elevación, una estación puede encontrarse a una altura y bajo condiciones locales que no coinciden con las condiciones representadas por la celda del modelo. Esta diferencia es relevante en extremos, ya que un evento intenso registrado por una estación meteorológica puede ser representado de menor magnitud dentro de una celda de los GCMs.

En consecuencia, las diferencias entre los valores simulados y observados no dependen exclusivamente de la capacidad del GCM, sino también de la diferencia de escala entre ambos datos. Esta limitación debe considerarse al interpretar las métricas de desempeño y los rankings obtenidos, particularmente en sectores cordilleranos y con baja cobertura de estaciones.

7 Conclusiones

El presente estudio permitió evaluar la capacidad de los modelos climáticos globales CMIP5 y CMIP6 para representar los extremos de precipitación y las temperaturas asociadas a estos eventos en cinco macrozonas climáticas de Chile continental, considerando los índices Rx1day, R10y y T4Rx1day. Para ello, se utilizaron métricas que permiten evaluar de manera conjunta la capacidad de los GCM para reproducir las señales observadas, entre las que destacan el índice de desempeño pasado (PPI) junto a la distancia euclidiana (ED), permitiendo identificar los modelos más representativos para cada macrozona.

A partir de los resultados obtenidos se puede concluir que:

1. Un modelo con buen desempeño para climatología media no necesariamente presenta un rendimiento óptimo en eventos extremos. Por lo tanto, la selección de los GCMs debe basarse en índices y métricas asociadas a estos eventos. Asimismo, un modelo con buen desempeño en una macrozona no necesariamente es bueno en otra.
2. Los modelos seleccionados mediante el enfoque espacial no necesariamente coinciden con aquellos obtenidos mediante el enfoque temporal. Un mejor desempeño espacial indica que el modelo representa adecuadamente la magnitud del evento considerando las precipitaciones registradas el mismo día en la macrozona. En cambio, un mejor desempeño temporal indica una mayor capacidad para reproducir la magnitud de los máximos en cada píxel, aunque ocurran en fechas diferentes. Estas diferencias se deben al orden en que se calculan los promedios y los máximos. Por lo tanto, el resultado no puede generalizarse y la elección del enfoque depende de si se busca analizar eventos simultáneos a escala macrozonal o máximos locales que pueden ocurrir en fechas distintas.
3. CMIP6 presenta una mejora general respecto de CMIP5, ya que la sexta generación de modelos reproduce de mejor manera la magnitud de Rx1day y R10y en la mayoría de las macrozonas y mejora la variabilidad espacial de R10y en gran parte del territorio. Sin embargo, se mantienen excepciones.
4. La corrección altitudinal mejora la representación de T4Rx1day principalmente en Chile Central y Chile Sur, pero en algunas macrozonas del Norte los datos no corregidos presentan medianas más próximas al valor óptimo. Por ello, la incorporación de una corrección por altura debe evaluarse por macrozona y no considerarse como una mejora generalizada para todo el territorio.
5. La comparación entre el conjunto completo de modelos, ALL, y los subconjuntos BEST mostró diferencias en magnitud, dispersión y distribución espacial de los cambios proyectados. En escenarios como el SSP5-8.5, la selección mantiene generalmente el patrón regional, pero se observa que se puede intensificar o reducir la magnitud. En cambio, bajo SSP2-4.5, la selección puede modificar el signo del cambio en algunas macrozonas. Por lo tanto, utilizar todos los modelos sin considerar su desempeño histórico puede ocultar señales relevantes.

Finalmente, este trabajo busca contribuir y motivar a futuros investigadores a evaluar el impacto de los extremos climáticos en Chile. Si bien el principal aporte de esta investigación consiste en identificar los modelos climáticos que representan de mejor manera los índices Rx1day, R10y y T4Rx1day en cada macrozona, los resultados obtenidos sirven como una herramienta para extender el análisis hacia los impactos hidrológicos que pueden tener estos índices para Chile.

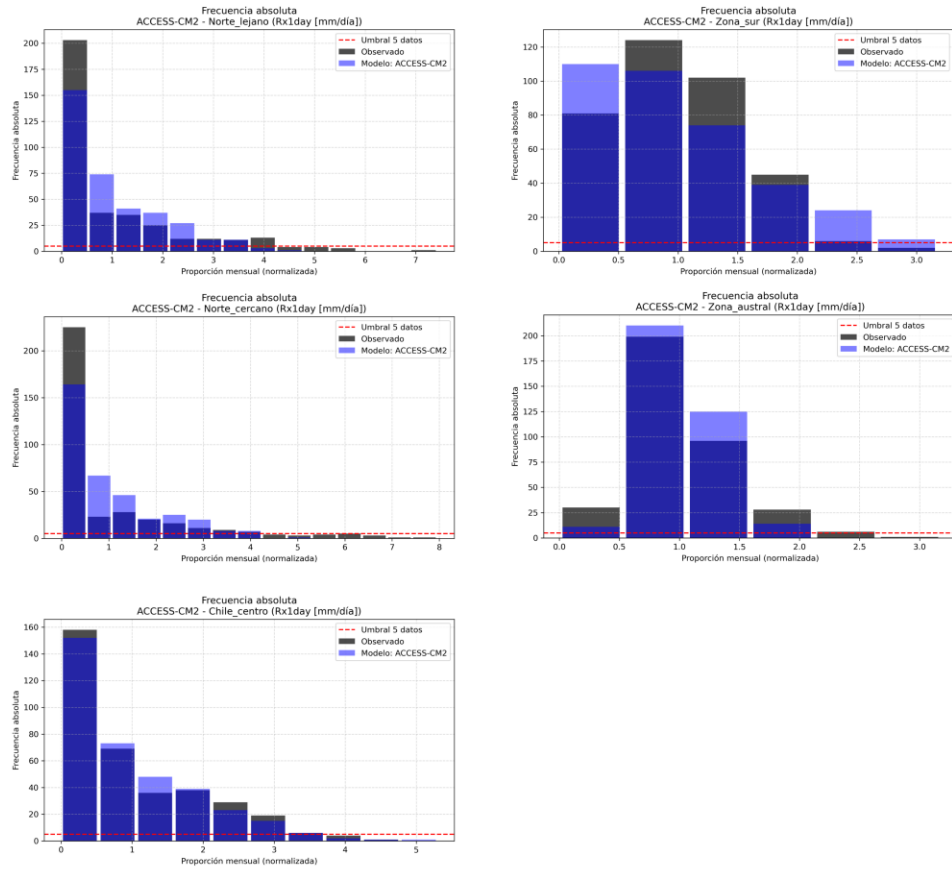
Referencias

- Aravena, C. U. (n.d.). *REPORTE ANUAL DE LA EVOLUCIÓN DEL CLIMA EN CHILE*.
- Barrett, B. S., Campos, D. A., Vicencio Veloso, J., & Rondanelli, R. (2016). Extreme temperature and precipitation events in march 2015 in central and northern Chile. *Journal of Geophysical Research*, 121(9), 4563–4580. <https://doi.org/10.1002/2016JD024835>
- Boisier, J. P., Alvarez-Garreton, C., Cordero, R. R., Damiani, A., Gallardo, L., Garreaud, R. D., Lambert, F., Ramallo, C., Rojas, M., & Rondanelli, R. (2018). Anthropogenic drying in central-southern Chile evidenced by long-term observations and climate model simulations. *Elementa*, 6. <https://doi.org/10.1525/elementa.328>
- Claudia, F. :, Quintay, V. J., De, R., & Chile, V. (n.d.). *REPORTE ANUAL DE LA EVOLUCIÓN DEL CLIMA EN CHILE*.
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9(5), 1937–1958. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>
- Falvey, M., & Garreaud, R. D. (2009). Regional cooling in a warming world: Recent temperature trends in the southeast Pacific and along the west coast of subtropical South America (1979–2006). *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 114(4). <https://doi.org/10.1029/2008JD010519>
- Garreaud, R. D., Boisier, J. P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H. H., & Veloso-Aguila, D. (2020). The Central Chile Mega Drought (2010–2018): A climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology*, 40(1), 421–439. <https://doi.org/10.1002/joc.6219>
- Gateño, F., Mendoza, P. A., Vásquez, N., Lagos-Zúñiga, M., Jiménez, H., Jerez, C., Vargas, X., Rubio-Álvarez, E., & Montserrat, S. (2024). Screening CMIP6 models for Chile based on past performance and code genealogy. *Climatic Change*, 177(6). <https://doi.org/10.1007/s10584-024-03742-1>
- Guo, H., Bao, A., Chen, T., Zheng, G., Wang, Y., Jiang, L., & De Maeyer, P. (2021). Assessment of CMIP6 in simulating precipitation over arid Central Asia. *Atmospheric Research*, 252. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105451>
- IPCC. (2021). *Bases físicas Resumen para responsables de políticas*.
- Jeferson de Medeiros, F., Prestrelo de Oliveira, C., & Avila-Diaz, A. (2022). Evaluation of extreme precipitation climate indices and their projected changes for Brazil: From CMIP3 to CMIP6. *Weather and Climate Extremes*, 38. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2022.100511>
- Kuma, P., Bender, F. A. M., & Jönsson, A. R. (2023). Climate Model Code Genealogy and Its Relation to Climate Feedbacks and Sensitivity. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 15(7). <https://doi.org/10.1029/2022MS003588>
- Lagos-Zúñiga, M., Balmaceda-Huarte, R., Regoto, P., Torrez, L., Olmo, M., Lyra, A., Pareja-Quispe, D., & Bettolli, M. L. (2024). Extreme indices of temperature and precipitation in South America: trends and intercomparison of regional climate models. *Climate Dynamics*, 62(6), 4541–4562. <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06598-2>
- Lagos-Zúñiga, M., Mendoza, P. A., Campos, D., & Rondanelli, R. (2024). Trends in seasonal precipitation extremes and associated temperatures along continental Chile. *Climate Dynamics*, 62(5), 4205–4222. <https://doi.org/10.1007/s00382-024-07127-z>

- Li, Y., Yan, D., Peng, H., & Xiao, S. (2021). Evaluation of precipitation in CMIP6 over the Yangtze River Basin. *Atmospheric Research*, 253. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105406>
- Li, Z., Liu, T., Huang, Y., Peng, J., & Ling, Y. (2022). Evaluation of the CMIP6 Precipitation Simulations Over Global Land. *Earth's Future*, 10(8). <https://doi.org/10.1029/2021EF002500>
- Lv, M., Xu, Z., & Yang, Z. L. (2020). Cloud Resolving WRF Simulations of Precipitation and Soil Moisture Over the Central Tibetan Plateau: An Assessment of Various Physics Options. *Earth and Space Science*, 7(2). <https://doi.org/10.1029/2019EA000865>
- O'Neill, B. C., Krieglner, E., Riahi, K., Ebi, K. L., Hallegatte, S., Carter, T. R., Mathur, R., & van Vuuren, D. P. (2014). A new scenario framework for climate change research: The concept of shared socioeconomic pathways. *Climatic Change*, 122(3), 387–400. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0905-2>
- Ortega, G., Arias, P. A., Villegas, J. C., Marquet, P. A., & Nobre, P. (2021). Present-day and future climate over central and South America according to CMIP5/CMIP6 models. *International Journal of Climatology*, 41(15), 6713–6735. <https://doi.org/10.1002/joc.7221>
- Perkins, S. E., Pitman, A. J., Holbrook, N. J., & McAneney, J. (2007). Evaluation of the AR4 climate models' simulated daily maximum temperature, minimum temperature, and precipitation over Australia using probability density functions. *Journal of Climate*, 20(17), 4356–4376. <https://doi.org/10.1175/JCLI4253.1>
- Planta Nativo Río Biobío, A. C., & Rosendo Región del Biobío -Chile, S. (n.d.). *REPORTE ANUAL DE LA EVOLUCIÓN DEL CLIMA EN CHILE*.
- Rivera, J. A., & Arnould, G. (2020). Evaluation of the ability of CMIP6 models to simulate precipitation over Southwestern South America: Climatic features and long-term trends (1901–2014). *Atmospheric Research*, 241. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.104953>
- Salazar, Á., Thatcher, M., Goubanova, K., Bernal, P., Gutiérrez, J., & Squeo, F. (2024). CMIP6 precipitation and temperature projections for Chile. *Climate Dynamics*, 62(3), 2475–2498. <https://doi.org/10.1007/s00382-023-07034-9>
- Tang, G., Clark, M. P., Simon, A., & Papalexiou, M. (n.d.). *SC-Earth: A Station-Based Serially Complete Earth Dataset from 1950 to 2019*. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-21>
- Vásquez, N. A., Mendoza, P. A., Lagos-Zuñiga, M., Scaff, L., Muñoz-Castro, E., & Vargas, X. (2025). Robust spatial changes in climate classes: insights from bias-corrected CMIP6 models across Chile. *Environmental Research Letters*, 20(1). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad9d5b>
- Veloso, J. V. (2022). Analysis of an extreme precipitation event in the Atacama desert in January 2020 and its relationship to humidity advection along the Southeast Pacific. *Atmosfera*, 35(3), 421–448. <https://doi.org/10.20937/ATM.52911>
- Wilcox, A. C., Escauriaza, C., Agredano, R., Mignot, E., Zuazo, V., Otárola, S., Castro, L., Gironás, J., Cienfuegos, R., & Mao, L. (2016). An integrated analysis of the March 2015 Atacama floods. *Geophysical Research Letters*, 43(15), 8035–8043. <https://doi.org/10.1002/2016GL069751>
- Zhang, B., Song, S., Wang, H., Guo, T., & Ding, Y. (2024). Evaluation of the performance of CMIP6 models in simulating extreme precipitation and its projected changes in global climate regions. *Natural Hazards*. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-06850-4>

Anexos

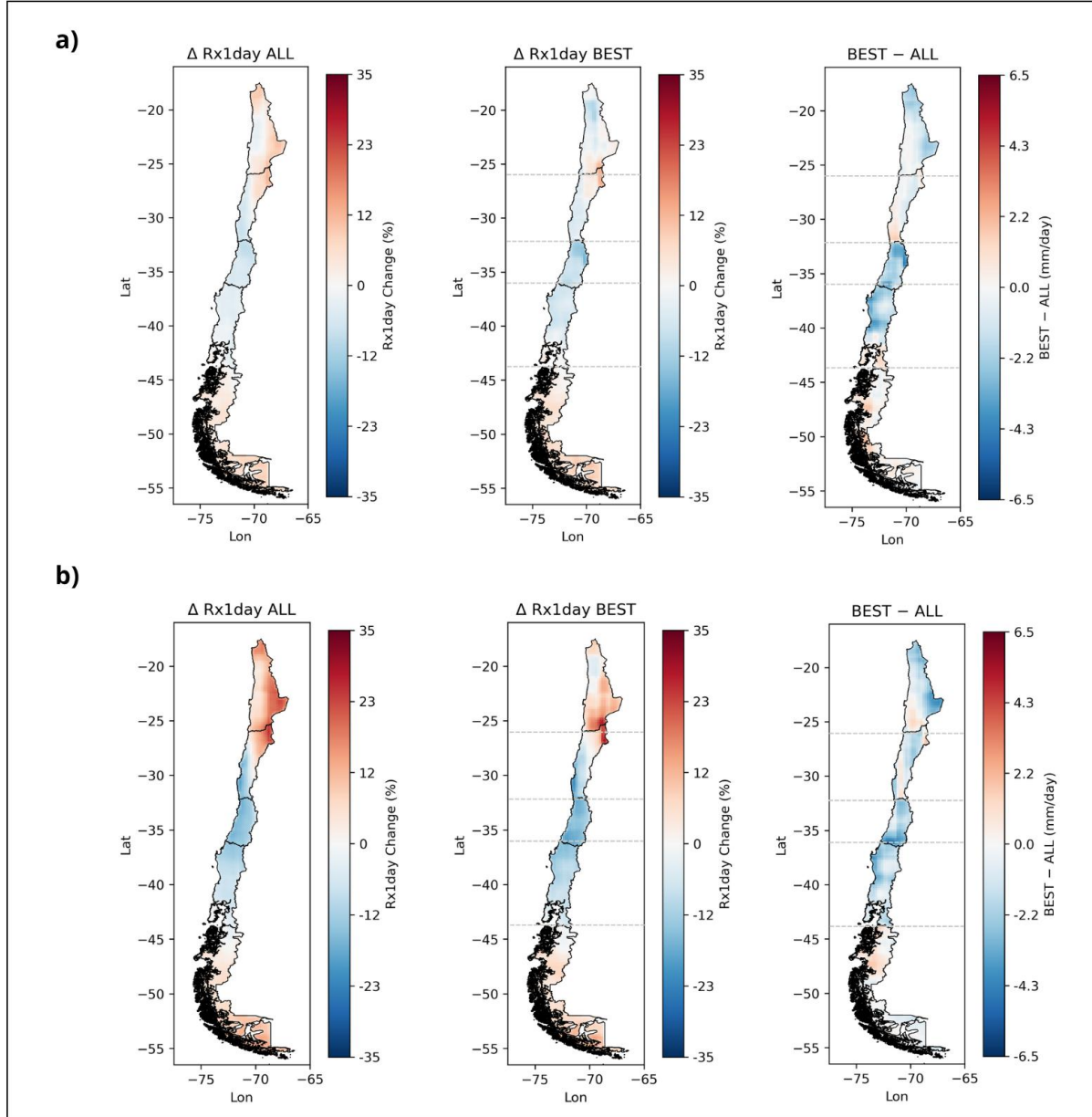
Anexo A. 1. Frecuencia absoluta del PSS para Rx1day espacial en el modelo ACCESS-CM2.



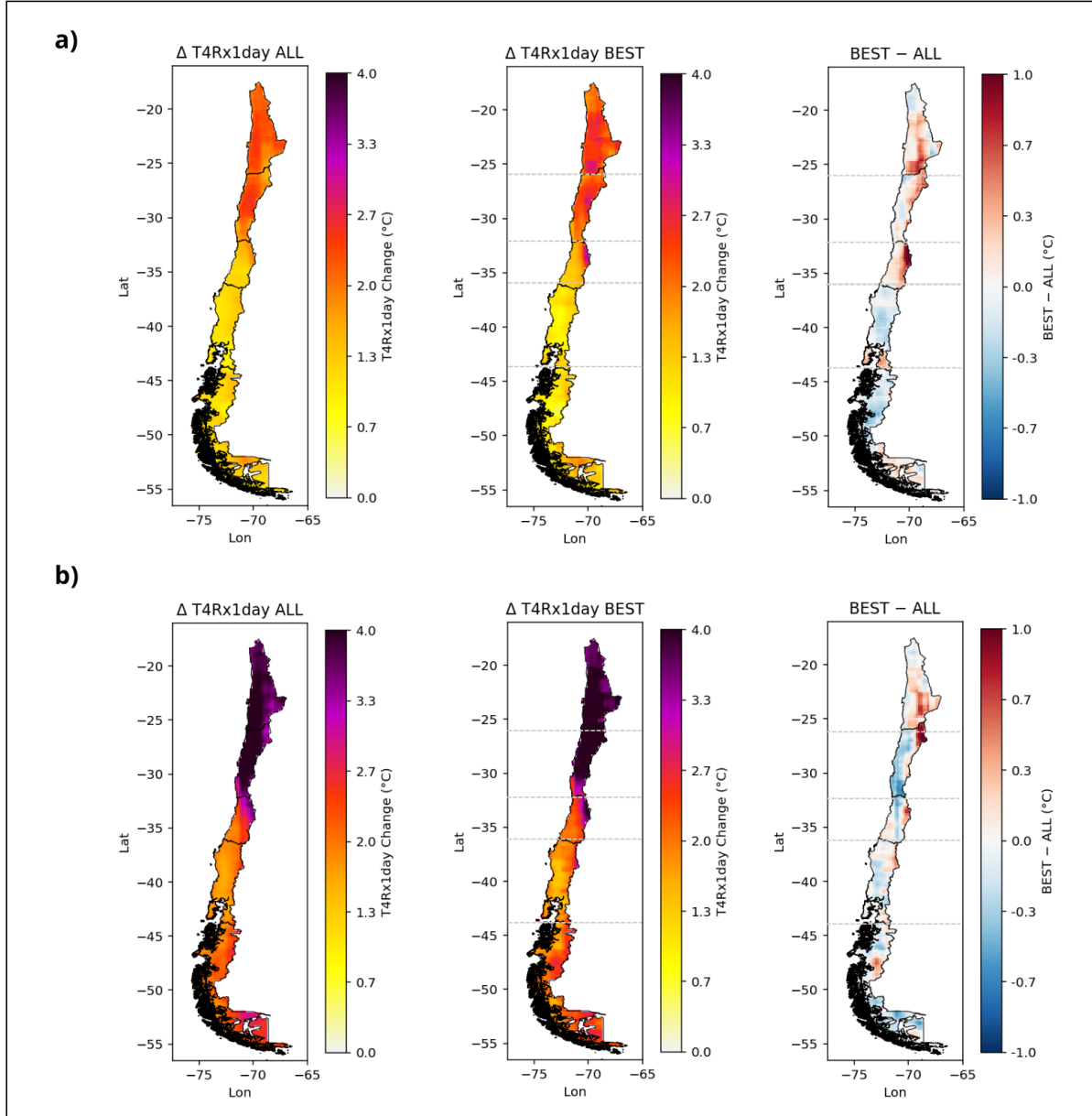
Anexo A. 2. Ranking de los mejores modelos por macrozona para el conjunto CMIP5.

	ESPACIAL					TEMPORAL				
	MODELO	PPI_RX1DAY	PPI_R10Y	PPI_T4RX1DAY	ED	MODELO	PPI_RX1DAY	PPI_R10Y	PPI_T4RX1DAY	ED
Norte Lejano	IPSL-CM5A-MR	0.751	0.388	0.613	0.766	IPSL-CM5A-MR	0.619	0.743	0.621	0.596
	EC-EARTH	0.315	0.054	0.313	1.355	CNRM-CM5	0.420	0.741	0.569	0.767
	ACCESS1-0	0.439	0.353	-0.059	1.362	CESM1-CAM5	0.220	0.642	0.712	0.905
	inmcm4	-0.142	-0.256	-0.077	2.010	ACCESS1-3	0.485	0.608	0.359	0.911
	CESM1-CAM5	-0.602	-0.543	0.703	2.244	inmcm4	0.773	0.810	0.080	0.966
	MIROC5	-1.239	-1.070	0.479	3.093	GFDL-CM3	0.026	0.436	0.686	1.168
	MRI-CGCM3	-1.206	-1.074	0.243	3.121	MRI-CGCM3	-0.120	0.342	0.484	1.398
	GFDL-CM3	-1.344	-1.162	0.723	3.200	MIROC5	-0.093	0.337	0.305	1.454
	CanESM2	-1.564	-1.471	0.648	3.578					
Norte Cercano	HadGEM2-AO	0.472	0.405	0.493	0.943	HadGEM2-AO	0.339	0.658	0.691	0.806
	bcc-csm1.1-m	0.740	0.395	0.246	1.001	bcc-csm1.1-m	0.635	0.782	0.212	0.895
	MIROC5	0.581	0.749	0.101	1.024	IPSL-CM5B-LR	0.326	0.573	0.449	0.969
	IPSL-CM5B-LR	0.300	0.555	0.347	1.056	MIROC5	0.510	0.773	0.108	1.043
	CMCC-CMS	0.331	0.585	0.025	1.253	GFDL-ESM2M	0.449	0.625	0.197	1.044
	GFDL-ESM2M	0.519	0.115	0.142	1.323	CMCC-CMS	0.574	0.802	-0.003	1.107
	MRI-CGCM3	-0.352	0.340	0.493	1.588	MRI-CGCM3	-0.111	0.525	0.405	1.347
Chile Central	ACCESS1-0	0.759	0.467	0.538	0.745	MRI-CGCM3	0.490	0.763	0.567	0.710
	MIROC5	0.563	0.421	0.635	0.812	MIROC5	0.466	0.653	0.673	0.716
	CMCC-CMS	0.725	0.273	0.545	0.901	CESM1-CAM5	0.749	0.822	0.332	0.736
	CESM1-CAM5	0.519	0.510	0.411	0.905	MPI-ESM-MR	0.809	0.886	0.213	0.818
	IPSL-CM5A-MR	0.655	0.720	-0.025	1.117	ACCESS1-0	0.536	0.706	0.363	0.841
	MRI-CGCM3	0.366	0.214	0.503	1.125	IPSL-CM5B-LR	0.157	0.499	0.581	1.067
	EC-EARTH	0.477	0.200	0.221	1.233	GFDL-ESM2M	0.159	0.419	0.364	1.204
	GFDL-ESM2M	0.262	-0.059	0.606	1.349					
Chile Sur	ACCESS1-0	0.895	0.547	0.851	0.488	CNRM-CM5	0.715	0.863	0.794	0.378
	CMCC-CMS	0.833	0.397	0.806	0.655	ACCESS1-0	0.696	0.871	0.540	0.566
	CESM1-CAM5	0.697	0.331	0.765	0.771	CESM1-CAM5	0.617	0.746	0.517	0.667
	IPSL-CM5B-LR	0.506	0.446	0.559	0.863	MPI-ESM-MR	0.730	0.837	0.379	0.697
	MIROC5	0.615	0.240	0.698	0.904	MIROC5	0.509	0.685	0.480	0.782
	MRI-CGCM3	0.613	0.279	0.588	0.916	MRI-CGCM3	0.867	0.900	0.178	0.838
	GFDL-CM3	0.304	0.074	0.799	1.176	IPSL-CM5B-LR	0.565	0.696	0.192	0.967
						GFDL-CM3	0.187	0.464	0.598	1.054
Austral	CCSM4	0.755	0.677	0.580	0.584	ACCESS1-0	0.774	0.824	0.898	0.304
	CMCC-CM	0.567	0.676	0.665	0.636	CCSM4	0.772	0.846	0.805	0.337
	ACCESS1-3	0.655	0.444	0.695	0.722	CMCC-CM	0.746	0.979	0.747	0.359
	MRI-CGCM3	0.523	0.553	0.663	0.736	IPSL-CM5B-LR	0.904	0.944	0.430	0.581
	GFDL-CM3	0.723	0.303	0.641	0.832	GFDL-CM3	0.571	0.686	0.715	0.603
	MIROC5	0.730	0.312	0.569	0.856	CanESM2	0.467	0.654	0.792	0.668
	IPSL-CM5B-LR	0.709	0.257	0.638	0.876	inmcm4	0.510	0.744	0.606	0.679

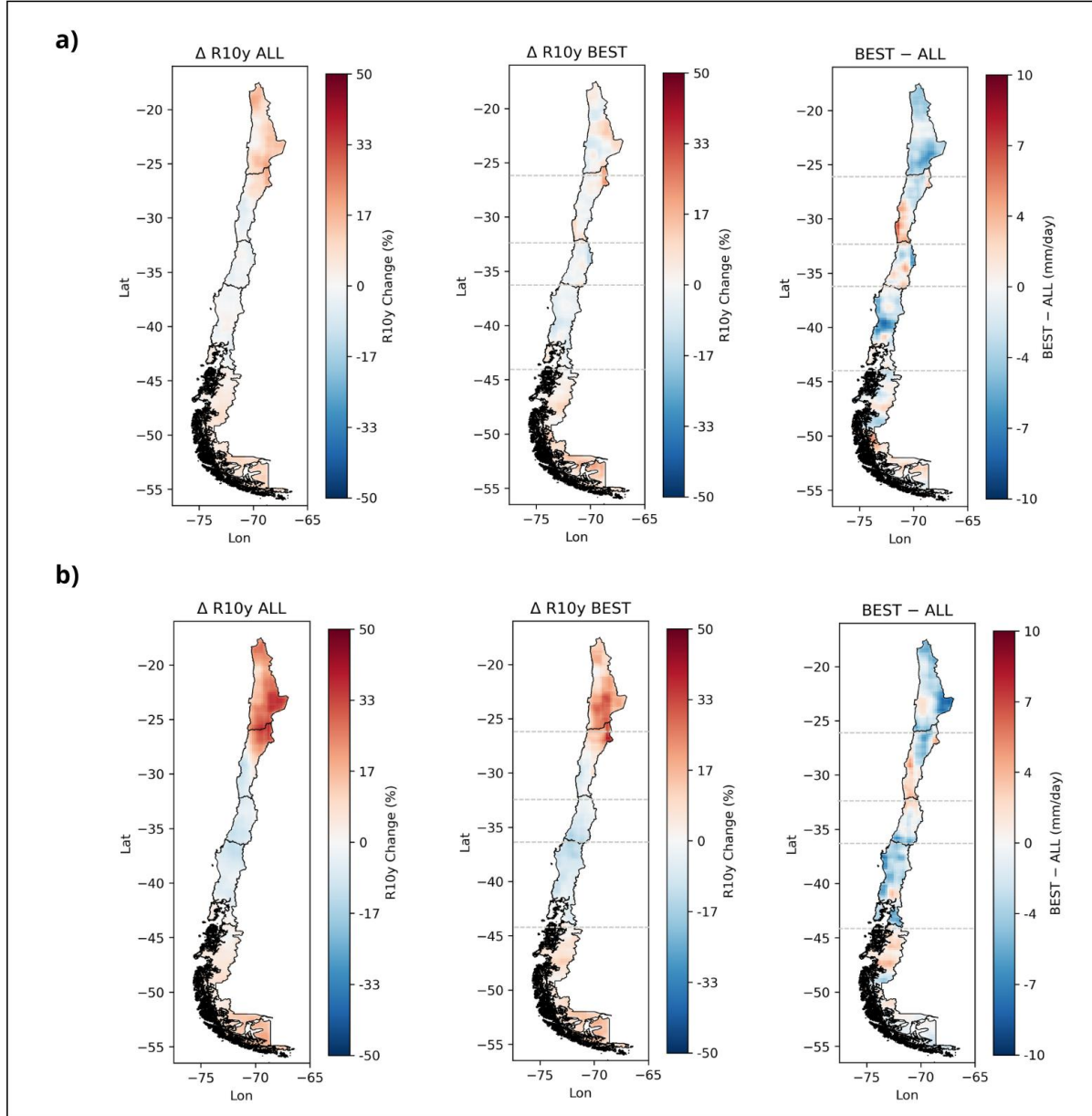
Anexo A. 3. Cambios proyectados de Rx1day para el periodo 2070–2100 mediante el enfoque temporal, bajo los escenarios a) SSP5-8.5 y b) SSP2-4.5. Las columnas presentan el cambio porcentual obtenido con el conjunto completo de modelos (ALL), el conjunto de modelos con mejor desempeño histórico (BEST) y la diferencia absoluta entre ambos conjuntos (BEST – ALL), expresada en mm/día.



Anexo A. 4. Cambios proyectados de T4Rx1day entre los periodos histórico 1985–2014 y futuro 2070–2100, obtenidos mediante el enfoque temporal bajo los escenarios a) SSP2-4.5 y b) SSP5-8.5. Las columnas presentan los resultados del conjunto completo de modelos (ALL), el conjunto de modelos con mejor desempeño histórico (BEST) y la diferencia entre ambos conjuntos (BEST – ALL), expresados en °C.



Anexo A. 5. Cambios proyectados de R10y mediante el enfoque temporal para los escenarios a) SSP2-4.5 y b) SSP5-8.5. En cada fila se presenta el cambio porcentual obtenido con el conjunto completo de modelos (ALL), el subconjunto de mejor desempeño histórico (BEST) y la diferencia absoluta entre ambos conjuntos (BEST – ALL), expresada en mm/día.



Anexo A. 6. Ranking modelos, sin seleccionar el 60% de menor ED y sin filtrar por familia.

MACROZONE	GCMs CMIP6		GCMs CMIP5	
	TEMPORAL	SPATIAL	TEMPORAL	SPATIAL
Far North	EC-Earth3-Veg-LR	IPSL-CM6A-LR-gn	IPSL-CM5A-MR	IPSL-CM5A-MR
	EC-Earth3	EC-Earth3-Veg-LR	CNRM-CM5	IPSL-CM5A-LR
	ACCESS-CM2	GFDL-CM4-gr2	CESM1-CAM5	EC-EARTH
	EC-Earth3-CC	KIOST-ESM-gr1	ACCESS1-3	ACCESS1-0
	MRI-ESM2-0	EC-Earth3	HadGEM2-AO	HadGEM2-ES
	GFDL-ESM4-gr1	EC-Earth3-CC	inmcm4	ACCESS1-3
	NESM3-gn	ACCESS-CM2	IPSL-CM5A-LR	CNRM-CM5
	FGOALS-g3	GFDL-CM4-gr1	HadGEM2-ES	HadGEM2-AO
	GFDL-CM4-gr1	ACCESS-ESM1-5	IPSL-CM5B-LR	inmcm4
	ACCESS-ESM1-5	MPI-ESM1-2-LR	ACCESS1-0	CESM1-CAM5
	CMCC-ESM2	GFDL-ESM4-gr1	EC-EARTH	IPSL-CM5B-LR
	IITM-ESM	MRI-ESM2-0	GFDL-CM3	MIROC5
	CESM2-WACCM	FGOALS-g3	MPI-ESM-MR	MRI-CGCM3
	CMCC-CM2-SR5-gn	CMCC-CM2-SR5-gn	MRI-CGCM3	GFDL-CM3
	MPI-ESM1-2-HR	IITM-ESM	BNU-ESM	CCSM4
	GFDL-CM4-gr2	CESM2-WACCM	MIROC5	BNU-ESM
	MPI-ESM1-2-LR	TaiESM1	CMCC-CMS	CanESM2
	IPSL-CM6A-LR-gn	NorESM2-MM	MIROC-ESM-CHEM	MPI-ESM-MR
	INM-CM4-8	MIROC6-gn	CCSM4	MIROC-ESM-CHEM
	TaiESM1	CMCC-ESM2	CanESM2	NorESM1-M
	MIROC6-gn	NESM3-gn	MIROC-ESM	MIROC-ESM
	KACE-1-0-G	KACE-1-0-G	CMCC-CM	CMCC-CM
	NorESM2-MM	INM-CM4-8	NorESM1-M	bcc-csm1-1-m
	KIOST-ESM-gr1	NorESM2-LM	bcc-csm1-1-m	CMCC-CMS
	NorESM2-LM	MPI-ESM1-2-HR	GFDL-ESM2G	FGOALS-g2
	INM-CM5-0	INM-CM5-0	FGOALS-g2	GFDL-ESM2G
	BCC-CSM2-MR	CanESM5	GFDL-ESM2M	GFDL-ESM2M
	CanESM5	BCC-CSM2-MR	bcc-csm1-1	bcc-csm1-1
Near North	KACE-1-0-G	MIROC6-gn	HadGEM2-AO	HadGEM2-AO
	NorESM2-LM	KACE-1-0-G	HadGEM2-ES	HadGEM2-ES
	ACCESS-ESM1-5	TaiESM1	bcc-csm1-1-m	bcc-csm1-1-m
	MIROC6-gn	ACCESS-ESM1-5	ACCESS1-0	MIROC5
	TaiESM1	NESM3-gn	IPSL-CM5B-LR	IPSL-CM5B-LR
	IITM-ESM	NorESM2-LM	ACCESS1-3	CESM1-CAM5
	CanESM5	IITM-ESM	MIROC5	ACCESS1-0
	KIOST-ESM-gr1	GFDL-CM4-gr2	GFDL-ESM2M	CMCC-CMS
	NESM3-gn	ACCESS-CM2	CESM1-CAM5	MPI-ESM-MR
	INM-CM5-0	KIOST-ESM-gr1	CMCC-CMS	ACCESS1-3
	IPSL-CM6A-LR-gn	GFDL-ESM4-gr1	GFDL-ESM2G	GFDL-ESM2M
	MRI-ESM2-0	INM-CM4-8	MRI-CGCM3	GFDL-ESM2G
	GFDL-CM4-gr2	CMCC-ESM2	MPI-ESM-MR	MRI-CGCM3
	ACCESS-CM2	NorESM2-MM	FGOALS-g2	GFDL-CM3
	INM-CM4-8	EC-Earth3-Veg-LR	GFDL-CM3	CNRM-CM5
	EC-Earth3-Veg-LR	MPI-ESM1-2-LR	CNRM-CM5	FGOALS-g2
	FGOALS-g3	CanESM5	bcc-csm1-1	bcc-csm1-1
	CMCC-ESM2	INM-CM5-0	BNU-ESM	BNU-ESM
	BCC-CSM2-MR	EC-Earth3-CC	CanESM2	EC-EARTH
	NorESM2-MM	CESM2-WACCM	inmcm4	CCSM4
	MPI-ESM1-2-LR	EC-Earth3	CCSM4	CanESM2
	EC-Earth3-CC	BCC-CSM2-MR	MIROC-ESM	MIROC-ESM
	EC-Earth3	MRI-ESM2-0	EC-EARTH	inmcm4
	GFDL-ESM4-gr1	GFDL-CM4-gr1	IPSL-CM5A-LR	MIROC-ESM-CHEM
	CESM2-WACCM	CMCC-CM2-SR5-gn	NorESM1-M	IPSL-CM5A-LR
	GFDL-CM4-gr1	IPSL-CM6A-LR-gn	MIROC-ESM-CHEM	IPSL-CM5A-MR
	CMCC-CM2-SR5-gn	MPI-ESM1-2-HR	IPSL-CM5A-MR	NorESM1-M
	MPI-ESM1-2-HR	FGOALS-g3	CMCC-CM	CMCC-CM
Central Chile	KACE-1-0-G	KACE-1-0-G	MRI-CGCM3	ACCESS1-0
	TaiESM1	MIROC6-gn	MIROC5	MIROC5
	MIROC6-gn	ACCESS-CM2	CESM1-CAM5	HadGEM2-AO
	MRI-ESM2-0	GFDL-CM4-gr1	MPI-ESM-MR	HadGEM2-ES
	ACCESS-ESM1-5	GFDL-ESM4-gr1	ACCESS1-0	CMCC-CMS
	NorESM2-MM	NESM3-gn	bcc-csm1-1-m	CESM1-CAM5
	NESM3-gn	EC-Earth3-CC	HadGEM2-AO	CCSM4
	GFDL-CM4-gr2	NorESM2-MM	ACCESS1-3	MPI-ESM-MR
	EC-Earth3-CC	TaiESM1	CMCC-CMS	ACCESS1-3
	GFDL-ESM4-gr1	ACCESS-ESM1-5	CCSM4	bcc-csm1-1-m
	EC-Earth3	CESM2-WACCM	HadGEM2-ES	CNRM-CM5
	EC-Earth3-Veg-LR	CMCC-ESM2	CNRM-CM5	IPSL-CM5A-MR
	CMCC-ESM2	MPI-ESM1-2-LR	IPSL-CM5B-LR	MRI-CGCM3
	ACCESS-CM2	CMCC-CM2-SR5-gn	EC-EARTH	EC-EARTH
	GFDL-CM4-gr1	GFDL-CM4-gr2	GFDL-ESM2M	NorESM1-M
	MPI-ESM1-2-LR	MRI-ESM2-0	GFDL-CM3	IPSL-CM5B-LR
	IITM-ESM	EC-Earth3	GFDL-ESM2G	GFDL-ESM2M
	KIOST-ESM-gr1	IPSL-CM6A-LR-gn	CMCC-CM	GFDL-CM3
	CMCC-CM2-SR5-gn	EC-Earth3-Veg-LR	FGOALS-g2	GFDL-ESM2G
	IPSL-CM6A-LR-gn	KIOST-ESM-gr1	bcc-csm1-1	inmcm4
	CESM2-WACCM	IITM-ESM	IPSL-CM5A-LR	FGOALS-g2
	NorESM2-LM	NorESM2-LM	IPSL-CM5A-MR	IPSL-CM5A-LR
	INM-CM4-8	INM-CM5-0	NorESM1-M	MIROC-ESM
	INM-CM5-0	INM-CM4-8	MIROC-ESM	bcc-csm1-1
	CanESM5	CanESM5	inmcm4	MIROC-ESM-CHEM
	BCC-CSM2-MR	MPI-ESM1-2-HR	BNU-ESM	BNU-ESM
	MPI-ESM1-2-HR	BCC-CSM2-MR	CanESM2	CanESM2
	FGOALS-g3	FGOALS-g3	MIROC-ESM-CHEM	CMCC-CM

MACROZONE	GCMs CMIP6		GCMs CMIP5	
	TEMPORAL	SPATIAL	TEMPORAL	SPATIAL
South	GFDL-CM4-gr1	GFDL-ESM4-gr1	CNRM-CM5	ACCESS1-0
	KACE-1-0-G	GFDL-CM4-gr1	ACCESS1-0	CMCC-CMS
	MRI-ESM2-0	IPSL-CM6A-LR-gn	ACCESS1-3	MPI-ESM-MR
	GFDL-ESM4-gr1	TaiESM1	CESM1-CAM5	HadGEM2-ES
	TaiESM1	NorESM2-MM	HadGEM2-ES	ACCESS1-3
	ACCESS-CM2	MIROC6-gn	bcc-csm1-1-m	CESM1-CAM5
	EC-Earth3	NESM3-gn	MPI-ESM-MR	CNRM-CM5
	NorESM2-MM	ACCESS-CM2	EC-EARTH	HadGEM2-AO
	MIROC6-gn	CMCC-ESM2	CCSM4	CCSM4
	IITM-ESM	MPI-ESM1-2-HR	MIROC5	IPSL-CM5B-LR
	ACCESS-ESM1-5	KACE-1-0-G	CMCC-CMS	bcc-csm1-1-m
	NESM3-gn	CMCC-CM2-SR5-gn	MRI-CGCM3	MIROC5
	EC-Earth3-CC	CESM2-WACCM	HadGEM2-AO	MRI-CGCM3
	CMCC-ESM2	ACCESS-ESM1-5	IPSL-CM5B-LR	IPSL-CM5A-MR
	MPI-ESM1-2-HR	MRI-ESM2-0	CMCC-CM	EC-EARTH
	BCC-CSM2-MR	EC-Earth3-Veg-LR	GFDL-CM3	GFDL-CM3
	CESM2-WACCM	IITM-ESM	NorESM1-M	NorESM1-M
	GFDL-CM4-gr2	EC-Earth3	CanESM2	GFDL-ESM2M
	EC-Earth3-Veg-LR	BCC-CSM2-MR	GFDL-ESM2M	FGOALS-g2
	CMCC-CM2-SR5-gn	MPI-ESM1-2-LR	FGOALS-g2	IPSL-CM5A-LR
	MPI-ESM1-2-LR	GFDL-CM4-gr2	IPSL-CM5A-MR	bcc-csm1-1
	CanESM5	EC-Earth3-CC	inmcm4	CanESM2
	KIOST-ESM-gr1	KIOST-ESM-gr1	MIROC-ESM	GFDL-ESM2G
	IPSL-CM6A-LR-gn	CanESM5	bcc-csm1-1	CMCC-CM
	INM-CM5-0	INM-CM5-0	BNU-ESM	MIROC-ESM
	INM-CM4-8	FGOALS-g3	GFDL-ESM2G	BNU-ESM
	NorESM2-LM	NorESM2-LM	IPSL-CM5A-LR	MIROC-ESM-CHEM
	FGOALS-g3	INM-CM4-8	MIROC-ESM-CHEM	inmcm4
Austral	ACCESS-CM2	ACCESS-ESM1-5	ACCESS1-0	CCSM4
	MRI-ESM2-0	CESM2-WACCM	HadGEM2-ES	CMCC-CM
	KACE-1-0-G	TaiESM1	CCSM4	CESM1-CAM5
	EC-Earth3	EC-Earth3-CC	CMCC-CM	CMCC-CMS
	NESM3-gn	NorESM2-MM	CESM1-CAM5	EC-EARTH
	CMCC-ESM2	EC-Earth3	bcc-csm1-1-m	CNRM-CM5
	NorESM2-MM	MPI-ESM1-2-HR	CMCC-CMS	ACCESS1-3
	TaiESM1	CMCC-ESM2	FGOALS-g2	MRI-CGCM3
	CESM2-WACCM	MRI-ESM2-0	MPI-ESM-MR	HadGEM2-ES
	FGOALS-g3	MPI-ESM1-2-LR	ACCESS1-3	bcc-csm1-1-m
	INM-CM5-0	GFDL-CM4-gr1	HadGEM2-AO	MPI-ESM-MR
	CMCC-CM2-SR5-gn	KACE-1-0-G	IPSL-CM5B-LR	GFDL-CM3
	IITM-ESM	EC-Earth3-Veg-LR	GFDL-CM3	HadGEM2-AO
	GFDL-ESM4-gr1	GFDL-CM4-gr2	EC-EARTH	GFDL-ESM2G
	MPI-ESM1-2-LR	ACCESS-CM2	CanESM2	MIROC5
	BCC-CSM2-MR	CMCC-CM2-SR5-gn	inmcm4	GFDL-ESM2M
	GFDL-CM4-gr1	NESM3-gn	CNRM-CM5	IPSL-CM5B-LR
	MPI-ESM1-2-HR	BCC-CSM2-MR	GFDL-ESM2G	ACCESS1-0
	KIOST-ESM-gr1	MIROC6-gn	IPSL-CM5A-MR	FGOALS-g2
	GFDL-CM4-gr2	GFDL-ESM4-gr1	MIROC-ESM-CHEM	CanESM2
	EC-Earth3-CC	KIOST-ESM-gr1	MRI-CGCM3	BNU-ESM
	CanESM5	NorESM2-LM	IPSL-CM5A-LR	inmcm4
	MIROC6-gn	IITM-ESM	bcc-csm1-1	NorESM1-M
	ACCESS-ESM1-5	INM-CM4-8	MIROC-ESM	IPSL-CM5A-MR
	EC-Earth3-Veg-LR	INM-CM5-0	BNU-ESM	MIROC-ESM-CHEM
	IPSL-CM6A-LR-gn	IPSL-CM6A-LR-gn	GFDL-ESM2M	IPSL-CM5A-LR
	INM-CM4-8	CanESM5	NorESM1-M	MIROC-ESM
	NorESM2-LM	FGOALS-g3	MIROC5	bcc-csm1-1