

SIMULACIONES CLIMÁTICAS REGIONALES

Proyecto
“Simulaciones climáticas regionales y marco de evaluación
de la vulnerabilidad”

Santiago, 2018
Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)²
(FONDAP 15110009)
Universidad de Chile

Directoras del proyecto

Maisa Rojas (Directora)

Laura Gallardo (Directora alterna)

Mandante del proyecto

Oficina de Cambio Climático del Ministerio del Medio Ambiente

Simulaciones climáticas regionales

Deniz Bozkurt

Marco de evaluación de la vulnerabilidad

Anahí Urquiza

Marco Billi

Plataforma de visualización de simulaciones climáticas

Mark Falvey

Francisca Muñoz

Nancy Valdebenito

Matías Meneses

Felipe Saavedra

Edición de documento

Nicole Tondreau

Diagramación de documento

M. Giselle Ogaz

Las simulaciones climáticas regionales se realizaron en colaboración con el Laboratorio Nacional de Computación de Alto Rendimiento (NLHPC, por sus siglas en inglés) haciendo uso del supercomputador Leftrarú.

Citar este documento como: Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)² (FONDAP 15110009) “Simulaciones climáticas regionales”. Proyecto “Simulaciones climáticas regionales y marco de evaluación de la vulnerabilidad” mandatado por el Ministerio del Medio Ambiente. Julio de 2018. Disponible en www.cr2.cl

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN.....	4
2.	RESULTADOS SIMULACIONES REGIONALES.....	4
2.1	Simulaciones climáticas globales	5
2.2	Simulaciones climáticas regionales.....	6
2.3	Metodología y configuración experimental.....	6
2.4	Resultados de las simulaciones para el periodo de evaluación e histórica.....	10
2.5	Resultados de las proyecciones.....	16
3.	REFERENCIAS.....	26

1. INTRODUCCIÓN

El Ministerio del Medio Ambiente contrató en 2016 el presente estudio a un equipo multidisciplinario del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)² a través de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, el que fue desarrollado durante el año 2017.

El propósito del proyecto fue generar proyecciones climáticas para Chile a través de la modelación climática a escala regional. Dicha información busca aportar a la correcta estimación de la vulnerabilidad del país, y está disponible en una plataforma interactiva que permite apoyar el diseño de políticas públicas.

Este informe de síntesis presenta los resultados de las nuevas simulaciones climáticas regionales generadas en el marco del estudio. Se realizaron simulaciones numéricas del clima de Chile continental a 50 y 10 km de resolución horizontal para un período histórico (1979-2015) y futuro (2016-2050), considerando para este último dos escenarios. El primero, llamado RCP2.6, corresponde a un escenario según el cual el forzamiento antrópico del clima es consistente con un aumento de la temperatura media del planeta hacia el año 2100 inferior a 2°C respecto de la era preindustrial. Por su parte, el escenario RCP8.5 considera que el forzamiento antrópico puede resultar en un calentamiento de hasta 5°C. Las simulaciones se hicieron utilizando el modelo climático regional *Regional Climate Model System* versión 4 (RegCM4) descrito por Giorgi et al. (2012) y que toma condiciones de borde dadas por el modelo global del Instituto Max Planck de Meteorología (MPI-ESM-MR).

Los conceptos técnicos y científicos de este informe se explican en el documento “Guía de referencia para la plataforma de visualización de simulaciones climáticas”.

2. RESULTADOS SIMULACIONES REGIONALES

Los principales resultados de las simulaciones realizadas se resumen a continuación.

- En general, la herramienta computacional escogida (RegCM4) simula correctamente las climatologías y los ciclos anuales de temperatura y precipitación en las 7 regiones analizadas.
- Existe valor agregado (VA) en las simulaciones RegCM4 (50 km y 10 km) comparado con el modelo global utilizado como condición de borde. Este valor agregado se observa en la zona costera y valle central entre los 27 a 45°S. Sin embargo, la simulación regional a 10 km sobreestima la variabilidad y el valor absoluto de la precipitación en la zona más alta de la cordillera. ***Esto significa que no es conveniente utilizar las proyecciones de precipitaciones de este modelo (RegCM-10 km) en la zona cordillerana de Chile central.***
- Las simulaciones regionales en ambas resoluciones (50 km y 10 km) según los escenarios RCP2.6 y RCP8.5 proyectan un aumento de temperatura anual en todo el territorio nacional, con un gradiente de mayor a menor de norte a sur y de cordillera a océano.
- Los cambios proyectados generales son más o menos similares en las dos resoluciones espaciales. En las simulaciones a 10 km, los valores de los cambios anuales para el periodo 2021-2050 con respecto a 1976-2005 van desde 0.4°C (RCP2.6) y 0.6°C (RCP8.5) en Patagonia Sur, hasta 1.2°C (RCP2.6) y 1.6°C (RCP8.5) en el Altiplano. El mayor aumento de la temperatura ocurre durante el verano en el Altiplano (mayor a 2°C).

- Tanto las simulaciones a 50 km como a 10 km de resolución horizontal muestran un futuro (2021-2050) con más noches cálidas (percentil 90 de la temperatura mínima diaria, Tabla 3) y olas de calor (5 días consecutivos con temperatura máxima diaria 5°C por sobre un valor de referencia, Tabla 3). Las simulaciones a 10 km, además de presentar más detalles espaciales, sugieren una mayor frecuencia de eventos cálidos que las simulaciones a 50 km. Los mayores cambios se observan en el Norte Chico.
- Con ambas resoluciones y en los dos escenarios de forzamiento antrópico se proyecta una disminución del número de días fríos en el Altiplano de Chile y en la Patagonia, siendo esto más pronunciado en el escenario RCP8.5 para el periodo 2021-2050.
- Las simulaciones a 50 km y 10 km en el escenario RCP2.6 indican una clara disminución de la precipitación anual (~20%) en el norte y centro del país para el periodo 2021-2050. En el escenario RCP8.5, con ambas resoluciones espaciales, este descenso resulta más débil (~10%) y se limita a las zonas costeras del norte y centro para el periodo 2021-2050. También se observa un ligero aumento en la precipitación anual (~10%) sobre la cordillera desde la zona central hasta el sur. Estos cambios ocurren mayormente en la precipitación de invierno, asociada al paso de sistemas frontales de latitudes medias (mecanismo de precipitación de Chile central). Las diferencias para ambos escenarios obedecen en gran medida a la variabilidad natural simulada por el modelo global utilizado como condición de borde, la cual es relevante para un período de tiempo más cercano (ejemplo, 2021-2050). La variabilidad natural del modelo global forzante se debe tomar en cuenta al analizar estos resultados pues la misma hace más difícil identificar tendencias.
- Las simulaciones en ambas resoluciones (50 km y 10 km) y según los escenarios RCP2.6 y RCP8.5 proyectan una disminución en la precipitación de verano en la zona sur y en Patagonia Norte para el periodo 2021-2050, la cual es más pronunciada en el escenario RCP8.5 (~20%) a 10 km de resolución. El escenario RCP8.5 muestra un aumento de la precipitación (mayor a 20%) en las estaciones de otoño y primavera en el centro del país y el Norte Chico para el periodo 2021-2050.

2.1 Simulaciones climáticas globales

En el contexto de la elaboración los informes del Panel Intergubernamental sobre cambio climático (IPCC, por sus siglas en inglés), la comunidad internacional diseña y ejecuta (corre) de manera coordinada simulaciones climáticas globales. Éstas son realizadas por alrededor de 40 grupos de investigación en todo el mundo utilizando supercomputadores que ejecutan modelos del sistema Tierra. Dichos modelos son representaciones numéricas de la física, química y dinámica de la atmósfera y del océano, la criósfera (nieve, hielo marino, glaciares), la vegetación terrestre y el ciclo de carbono.

En el presente informe, los modelos acoplados globales serán denominados ‘modelos globales’ (GCM, por sus siglas en inglés). Estos experimentos coordinados se conocen como Proyecto internacional de intercomparación de modelos (CMIP, por sus siglas en inglés) que actualmente se encuentra en su sexta fase (CMIP6), la cual proveerá información climática para el sexto informe de evaluación del IPCC a publicarse en 2021. Para el desarrollo de nuestro estudio hemos utilizado modelos globales y escenarios de emisiones de CMIP5, es decir, la quinta fase del proyecto CMIP.

Los modelos GCM son forzados principalmente por emisiones o concentraciones de gases de efecto invernadero (antropogénicos y naturales), aerosoles provenientes de erupciones volcánicas, quema de biomasa, o contaminación. También por cambios de uso de suelo y radiación solar.

Como la trayectoria de emisiones de gases de efecto invernadero y otros para el futuro no es conocida se utilizan distintos escenarios de desarrollo económico-social para predecirlas. Debido a que las mayores emisiones de gases de efecto invernadero proviene de las necesidades energéticas de las naciones, distintas posibles vías de desarrollo se traducen en trayectorias de emisiones. Distintas vías de crecimiento y desarrollo de la agricultura se traducen en escenarios de cambios de uso de suelo. Estos distintos escenarios son recogidos en las ‘trayectorias de concentración representativas’ (RCP, por sus siglas en inglés) (Moss et al, 2010).

Todos los modelos GCM que participan en CMIP5 debieron correr como mínimo una simulación llamada ‘histórica’ que abarca los años 1850-2005, y que está forzada por gases de efecto invernadero, erupciones volcánicas, radiación solar, y otros fenómenos observados. Además, realizaron simulaciones de escenarios futuros de emisiones para el periodo 2005-2100, siguiendo las trayectorias RCP.

2.2 Simulaciones climáticas regionales

La modelación climática con modelos regionales (que cubren una parte limitada del planeta), está coordinada internacionalmente por el Experimento coordinado sobre reducción de escala de modelos climáticos regionales (CORDEX, por sus siglas en inglés) que es parte del Programa Mundial de investigación del clima (WCRP, por sus siglas en inglés). El objetivo general de CORDEX es “*Comprender mejor los fenómenos climáticos regionales y locales relevantes, su variabilidad y cambios, a través de la reducción de escala*”

Específicamente, CORDEX busca producir un conjunto coordinado de proyecciones regionales. Para ello se han definido una serie de regiones (escala continental) sobre las cuales grupos de investigación realizan experimentos de manera coordinada. Una de estas regiones es Cordex-Sudamérica (Figura 1a). Con la realización de este grupo de simulaciones, Chile se está involucrando activamente en la comunidad sudamericana de modelación regional.

2.3 Metodología y configuración experimental

La herramienta computacional escogida para el presente proyecto es el modelo climático regional *Regional Climate Model System* versión 4 (RegCM4, Giorgi et al., 2012), el cual se utilizó para simular el clima presente y futuro para dos dominios y resoluciones espaciales. El primer dominio se denomina CORDEX-Sudamérica con resolución de aproximadamente 50 km, y corresponde al dominio el proyecto CORDEX para nuestra región. Adicionalmente se realizaron simulaciones para el territorio de Chile continental, que hemos denominado **regional** con resolución de 10 km (Figura 1). RegCM4 es un modelo climático regional de la atmósfera y la superficie continental de área limitada y alta resolución especial que puede ser localizado en cualquier parte del globo. Este modelo resuelve una versión aproximada de las ecuaciones atmosféricas denominada hidrostática¹ que se basa en el modelo regional *Mesoscale Model version 5* del *National Center for Atmospheric Research* (MM5-NCAR).

¹ Aproximación hidrostática se refiere a utilizar una versión simplificada de la ecuación de movimiento vertical en la atmósfera, válida para resoluciones mayores a 5 km.

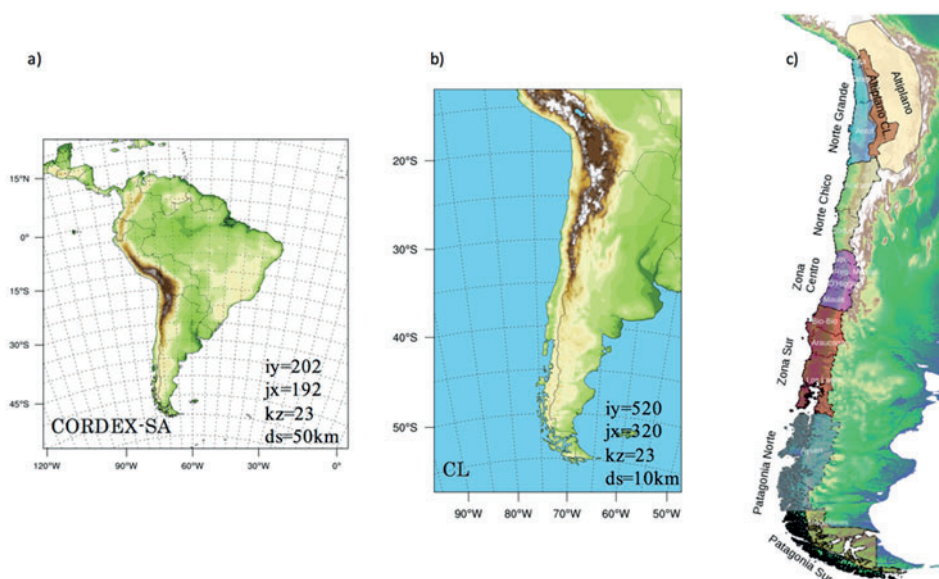


Figura 1: Dominios de las simulaciones RegCM4 (a) CORDEX-SA, (b) REGIONAL-Chile. (c) Regiones de análisis (7 macrozonas).

Parte de la metodología de correr un modelo regional incluye proveer en los bordes laterales del dominio variables atmosféricas tales como vientos y temperatura. Estas condiciones de borde pueden ser tomadas desde productos grillados tales como un reanálisis, o desde las salidas de un modelo de circulación general global (GCM, por sus siglas en inglés). Como las condiciones de borde proporcionan las condiciones de gran escala que van a influir la simulación del clima dentro del dominio del modelo regional, normalmente se utilizan indistintamente los conceptos ‘condiciones de borde’, ‘modelo forzante’ o una simulación ‘forzada por’ tal o cual modelo.

En este proyecto se realizaron varias simulaciones cuyas características se describen a continuación y se resumen en la Tabla 1.

- a) RegCM-eval (periodo 1979-2015, a 10 km de resolución) forzada por el producto de reanálisis Era-Interim y cuyo objetivo es la evaluación del modelo regional.
- b) RegCM-hist (periodo 1979-2005, a 50 y 10 km de resolución) forzada por el modelo global MPI-ESM-MR, y cuyo objetivo es tener un clima ‘presente’.
- c) RegCM-rcp26 (periodo 2006-2050, a 50 y 10 km de resolución), forzada por el modelo global MPI-ESM-MR según el escenario RCP2.6, cuyo objetivo es contar una proyección futura considerando el escenario de menores emisiones existente.
- d) RegCM-rcp85 (periodo 2006-2050, a 50 y 10km de resolución), forzada por el modelo global MPI-ESM-MR según el escenario RCP8.5, cuyo objetivo es contar una proyección futura considerando el escenario de mayores emisiones existente.

En términos de modelos globales, en la primera etapa del proyecto se evaluó y categorizaron los modelos globales de proyecto CMIP5 según un conjunto de índices de desempeño (por ejemplo, presión a nivel del mar, vientos y temperaturas superficiales del océano) basados en diferentes análisis (por ejemplo, mapas de climatología y sesgos, diagramas de Taylor) para encontrar los modelos globales que mejor representan el clima en la región del Pacífico suroriental, frente a Chile. Basado en este análisis, y también en la disponibilidad de datos, decidimos utilizar el modelo global MPI-ESM-MR para generar las simulaciones de escenarios futuros (Tabla 1). Todas las simulaciones se corrieron en el Laboratorio Nacional de Computación de Alto Rendimiento en Universidad de Chile (NLHPC, por sus siglas en inglés).

Tabla 1: Simulaciones RegCM4

Dominio	Simulación	Forzantes / Condiciones de borde	Resolución espacial	Periodo de simulación
SAM-44	RegCM4-ERAINT-EVAL	ECMWF-ERAINT	0.44° x 0.44° (~50 km)	1979-2015
		MPI-ESM-MR-HISTÓRICO		1976-2005
		MPI-ESM-MR-RCP26		2006-2050
		MPI-ESM-MR-RCP85		2006-2050
CL-09	RegCM4-ERAINT-EVAL	ECMWF-ERAINT	0.09° x 0.09° (~10 km)	1979-2015
		MPI-ESM-MR-HISTÓRICO		1976-2005
		MPI-ESM-MR-RCP26		2006-2050
	RegCM4-MPI-ESM-MR-RCP85	MPI-ESM-MR-RCP85		

Con el objetivo de evaluar la capacidad de RegCM4 de simular el clima actual para el periodo 1980-2015, se comparó el modelo con un conjunto de observaciones o productos basados en observaciones existentes. Estas son: la base datos de temperatura y precipitación grillados de CR2MET, CRU (Mitchell and Jones, 2005), CHIRPS (Funk et al., 2015) y ERA-Interim (Dee et al., 2011) (Tabla 2). La evaluación se basa principalmente en campos climatológicos, ciclo anual, variabilidad interanual, la tendencia y los extremos de precipitación y temperatura. Cada producto grillado se ha interpolado a una grilla común de 0.09x0.09 grados (~10 km). Para realizar los análisis de series temporales y ciclos anuales, se divide el país en 7 zonas climáticas (Figura 1c), las cuales fueron escogidas a través criterios de representatividad (Atlas del Agua, DGA 2016) y fueron decididos en conjunto con la mesa de expertos del proyecto:

- Zona1: Altiplano (15-27°S) Altiplano-Chile (18-25°S)
- Zona2: Norte Grande (18-26°S)
- Zona3: Norte Chico (26-32°S)
- Zona4: Chile Central (32-36°S)
- Zona5: Zona sur (36-44°S)
- Zona6: Patagonia Norte (44-51°S)
- Zona7: Patagonia Sur (51-55°S)

Tabla 2: Descripción de los productos grillados utilizados

Nombre	Fuente	Variable	Frecuencia temporal	Resolución (grados)
CR2MET	Universidad de Chile	Precipitación, Temperatura	Diario, mensual	0.05 x 0.05
CRU	University of East Anglia	Precipitación, Temperatura	Mensual	0.5 x 0.5
CHIRPS		Precipitación	Diario, mensual	0.05 x 0.05 y 0.25 x 0.25
ERA-Interim		Precipitación, Temperatura	Diario, mensual	0.75 x 0.75

Para la evaluación de las simulaciones históricas (1976-2005) forzado por MPI-ESM-MR, hemos usado el concepto de “valor agregado” (VA), (Di Luca et al., 2012; Dosio et al., 2015), que busca determinar si el ejercicio de correr un modelo regional a partir de las condiciones de borde de un modelo global mejora la simulación de algún aspecto o variable del clima.

El valor agregado está dado por la fórmula:

$$VA = \frac{\left((X_{CMIP5} - X_{OBS})^2 - (X_{CORDEX} - X_{OBS})^2 \right)}{\max \left((X_{CMIP5} - X_{OBS})^2, (X_{CORDEX} - X_{OBS})^2 \right)}$$

donde XOBS, XCMIP5 y XCORDEX corresponden a los valores medios de las observaciones (por ejemplo, CR2MET), CMIP5 (MPI-ESM-MR) y CORDEX (RegCM4). Esta fórmula se aplica a cada punto de grilla y donde se obtiene un valor positivo de valor agregado hemos achurado el punto para mostrar que el modelo regional mejora la simulación en comparación con el modelo global.

Para las proyecciones futuras se analizan los cambios de temperatura y precipitación con respecto a la simulación histórica, según los escenarios RCP2.6 y RCP8.5 con las resoluciones de 50 km y 10 km. De los diferentes índices de extremos climáticos (ETCCDI de Peterson, 2005), se ha seleccionado un subconjunto para investigar las proyecciones de eventos extremos diarios (Tabla 3).

Tabla 3: Descripción de índices de extremos climáticos utilizados.

Código de índice (Cast.)	Nombre de índice	Descripción de índice	Unidad
Precipitación			
CDD (DSC)	Días secos consecutivos	Número máximo de días consecutivos sin precipitación o con precipitación inferior a 1mm	Días
R95 (P95)	Precipitación intensa, percentil 95	Precipitación diaria cuando $P \geq P95$ en los días lluviosos	mm
R95pTOT (P95pTOT)	Precipitación intensa	Fracción de la precipitación total anual (en días que $P \geq 1$ mm) debida a eventos que superan el percentil 95 del periodo de referencia	%
Temperatura			
TX90 (TX90)	Días cálidos, percentil 90	Percentil 90 de la temperatura máxima diaria	°C
TX90p (TX90p)	Días cálidos	Porcentaje de tiempo en que la temperatura máxima es superior al percentil 90 de la temperatura máxima diaria del periodo de referencia	%
HWDI (IDOC)	Indicador de duración de las olas de calor	El número máximo de días consecutivos (≥ 5), con temperatura máxima diaria es más de 5°C por encima de un valor de referencia (calculado como la media de las temperaturas máximas de cinco días del periodo de referencia)	Días, Periodos
TN90p (TN90p)	Noches cálidas	Porcentaje de tiempo en que la temperatura mínima es superior al percentil 90 de la temperatura mínima diaria del periodo de referencia	%
FD (DH)	Días de helados	Número de días en que la temperatura mínima es inferior a 0°C	Días

2.4 Resultados de las simulaciones para el periodo de evaluación e histórica

Resultados de la simulación para el periodo de evaluación (1980-2015)

La simulación RegCM4 forzada por el reanálisis ERA-Interim es lo más cercano que tenemos a la ‘realidad’, y por lo tanto su comparación con observaciones nos permite evaluar la capacidad del modelo regional de reproducir lo más fidedignamente posible el clima real. El periodo comprende desde 1980 a 2015, que corresponde a la extensión temporal de producto ERA-Interim y coincide también con la existencia de observaciones.

Temperatura

En esta sección se analiza la temperatura en ambas simulaciones RegCM4.ERA-Interim (50 km y 10 km) comparadas con las observaciones. Los paneles superiores de la Figura 2 muestran los resultados obtenidos con los productos CR2MET y CRU, los cuales presentan importantes diferencias: CR2MET tiene mayor resolución espacial comparada con CRU y, por lo tanto, un mayor detalle topográfico. En el desierto y extendiéndose hasta Patagonia Norte, CR2MET muestra temperaturas más altas. Por el contrario, en Patagonia Sur (campos de hielo) CR2MET entrega temperaturas más frías que CRU. En los paneles inferiores de la Figura 2 se muestra la temperatura anual de las simulaciones de RegCM4 a 50 y 10 km resolución, y se compara a la temperatura del producto ERA-Interim, que sirvió de condición de borde para las simulaciones RegCM4.

La representación de la temperatura con sus detalles finos es mejor en la simulación RegCM4 con resolución a 10 km. Sin embargo, existe un sesgo importante en esta simulación que consiste en la sobreestimación de la temperatura (entre 3 a 4°C) en el Norte Grande. Un análisis más exhaustivo permite asociar el problema a la evaporación. La simulación a 10 km evapora menos sobre el desierto que la simulación a 50 km, y por esta razón hay menor enfriamiento evaporativo, lo que provoca el sesgo en temperatura. La falta de evaporación se debe probablemente a que el módulo que calcula estos procesos es muy simple y no funciona correctamente a alta resolución (módulo de capa límite).

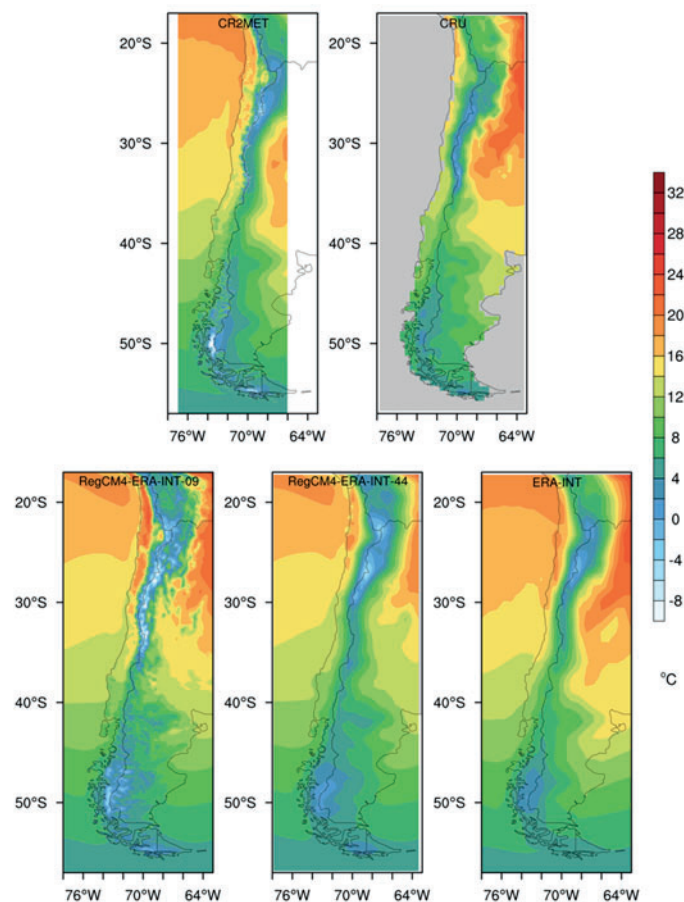


Figura 2: Climatología anual de la temperatura (°C) para el periodo 1980-2015 basado en los datos observacionales grillados (panel superior) y las simulaciones forzadas por ERA-Interim en 10 y 50 km resoluciones (panel inferior). El panel inferior también incluye ERA-Interim.

Ambas simulaciones reproducen bien el ciclo anual de las temperaturas (Figura 3a), siendo la simulación a 10 km la que más se acerca a las observaciones, salvo en dos excepciones: Como ya se ha mencionado, la simulación a 10 km sobreestima las temperaturas en la zona norte, y en Patagonia ambas simulaciones muestran un ciclo anual algo corrido en el tiempo comparado con las observaciones.

En las series de tiempo de las temperaturas anuales (Figura 3b) ambas simulaciones reproducen bastante bien las variaciones año a año. Las discrepancias se observan en la región del Altiplano, y nuevamente se observa el sesgo sistemático en la simulación a 10 km en el Norte Grande. En el Altiplano, el producto CR2MET muestra una marcada tendencia de calentamiento que no se presenta en las observaciones. Algo similar ocurre, aunque en menor medida, en la serie de tiempo de temperaturas en la zona central.

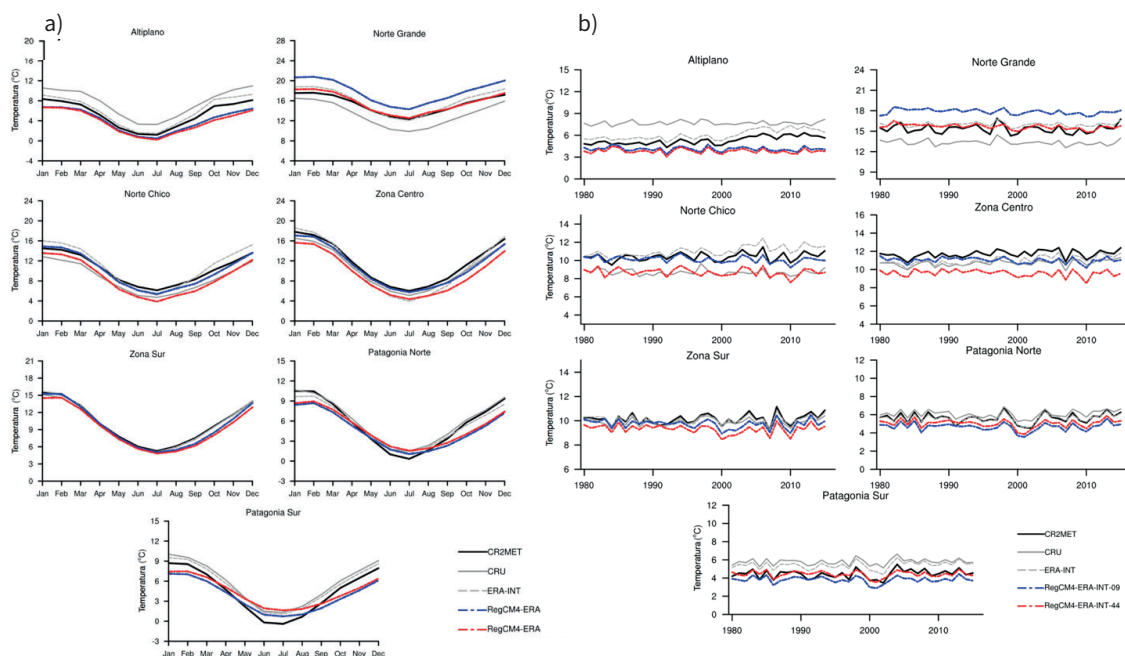


Figura 3: (a) Ciclo anual de la temperatura y (b) serie de tiempo la temperatura anual (1980-2015) en las 7 macrozonas definidas en la Figura 1c. Las líneas negras y grises corresponden a los productos grillados utilizados, mientras que las líneas azul y roja representan las simulaciones forzadas por ERA-Interim en 10 y 50 km resoluciones.

Precipitación

Los paneles superiores de la Figura 4 muestran los productos de precipitaciones CR2MET, CRU y CHIRPS. Existen diferencias importantes entre ellos, en especial una importante subestimación de la precipitación en Patagonia de CRU y CHIRPS en comparación con CR2MET. Dado que CR2MET está basado un set de estaciones más actualizado, creemos que este producto representa mejor la realidad. En los paneles inferiores de la figura se presenta la precipitación anual de las simulaciones de RegCM4 a 50 y 10 km resolución y el producto ERA-Interim, que sirvió de condición de borde para las simulaciones RegCM4. Se puede observar que la mayor resolución espacial en la modelación mejora sustancialmente el detalle de los patrones regionales de precipitación, aunque pareciera que la sobreestima considerablemente en la zona más austral.

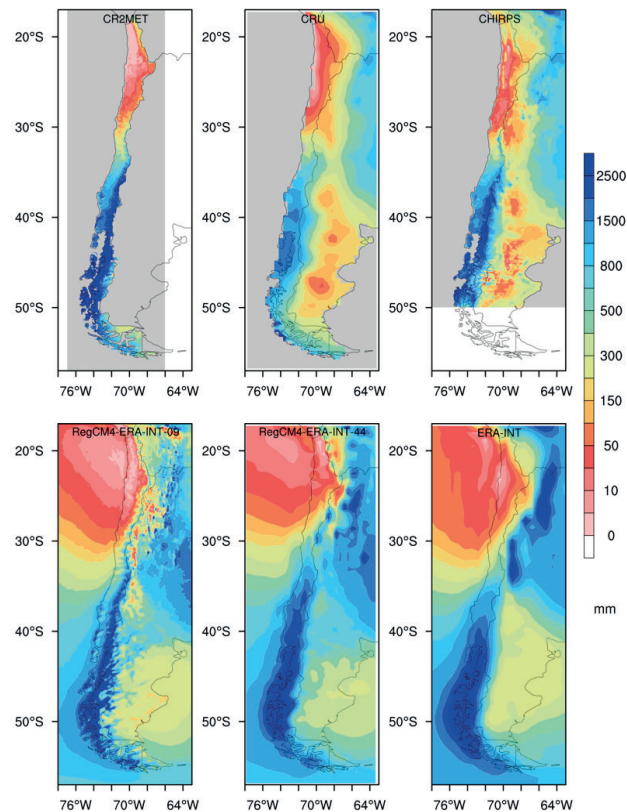


Figura 4: Climatología anual de la precipitación (mm) para el periodo 1980-2015 basado en los datos observacionales grillados (paneles superiores) y las simulaciones forzado por ERA-Interim en 10 y 50 km resoluciones (paneles inferiores). El panel inferior también incluye ERA-Interim.

La Figura 5a muestra la climatología del ciclo anual de las precipitaciones promediada sobre las 7 regiones de análisis. Para el Altiplano se observa el característico patrón de lluvias de verano, precipitaciones casi nulas en el Norte Grande (Desierto de Atacama) y el régimen mediterráneo, con precipitaciones en invierno desde el Norte Chico hasta la zona sur. Patagonia Norte y Sur muestra un ciclo anual plano de precipitaciones, es decir, con lluvia todo el año. Para todas las regiones la mejor representación del ciclo anual se obtiene con la simulación a 10 km de resolución, salvo en Patagonia Sur donde se ve una importante sobreestimación de la precipitación.

Dado que esta simulación está forzada por ERA-Interim (reanálisis) y, por lo tanto, es más cercana a observaciones reales, es posible evaluar la variabilidad interanual del modelo (Figura 5b). Por ejemplo, 1997 fue un año de El Niño muy lluvioso en el Norte Chico y la zona central, lo que es bien capturado por ambas simulaciones. Nuevamente, la simulación a 10 km es más cercana a las observaciones que la simulación a 50 km.

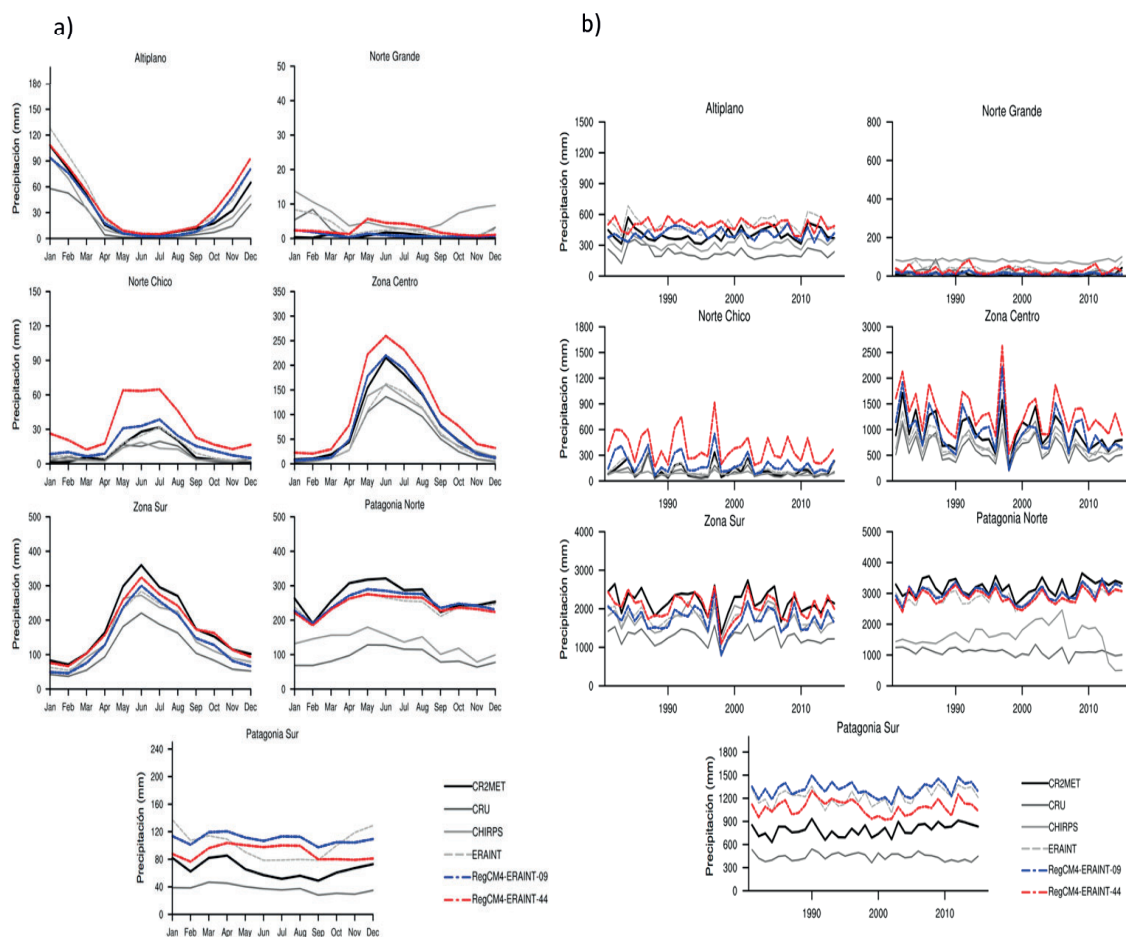


Figura 5: (a) Ciclo anual de la precipitación y (b) serie de tiempo la precipitación anual (1980-2015) en las 7 macrozonas que aparecen en la Figura 1c. Las líneas negras y grises corresponden a los productos grillados utilizados, mientras que las líneas azul y roja representan simulaciones forzadas por ERA-Interim a 10 y 50 km, respectivamente.

Resultados del periodo de histórico (1980-2005): Valor agregado

En esta sección evaluaremos las simulaciones RegCM4-hist, que corresponden a las simulaciones forzadas por el modelo global MPI-ESM-MR para el periodo 1980-2005. A su vez, el modelo global está forzado por condiciones observadas tales como, gases de efecto invernadero, cambio de uso de suelo, variabilidad solar, entre otras. Estas simulaciones deberían por lo tanto reproducir satisfactoriamente el clima actual (mapas climatológicos, ciclo anual), pero no la variabilidad año a año. En esta sección además se aplica el concepto de ‘Valor agregado’ para evaluar si la simulación con el modelo regional mejoró en algún aspecto la modelación global.

La Figura 6a muestra las climatologías anuales de la precipitación. Ambas simulaciones muestran valor agregado comparado con los campos del modelo global, sobre todo en la cordillera, pero la simulación a 10 km mejora la representación de la precipitación en la zona costera y la depresión intermedia en la zona centro y sur de Chile (Figura 6b).

La Figura 7a presenta las climatologías anuales de la temperatura. Dado que la temperatura está determinada por la altura sobre el nivel del mar, para este caso la mayor resolución de la topografía entrega una mejor representación. Esto es evidente al comparar la temperatura de RegCM4 (simulaciones a 10 y 50 km) con la temperatura del modelo forzante MPI-ESM-MR (Figura 7b).

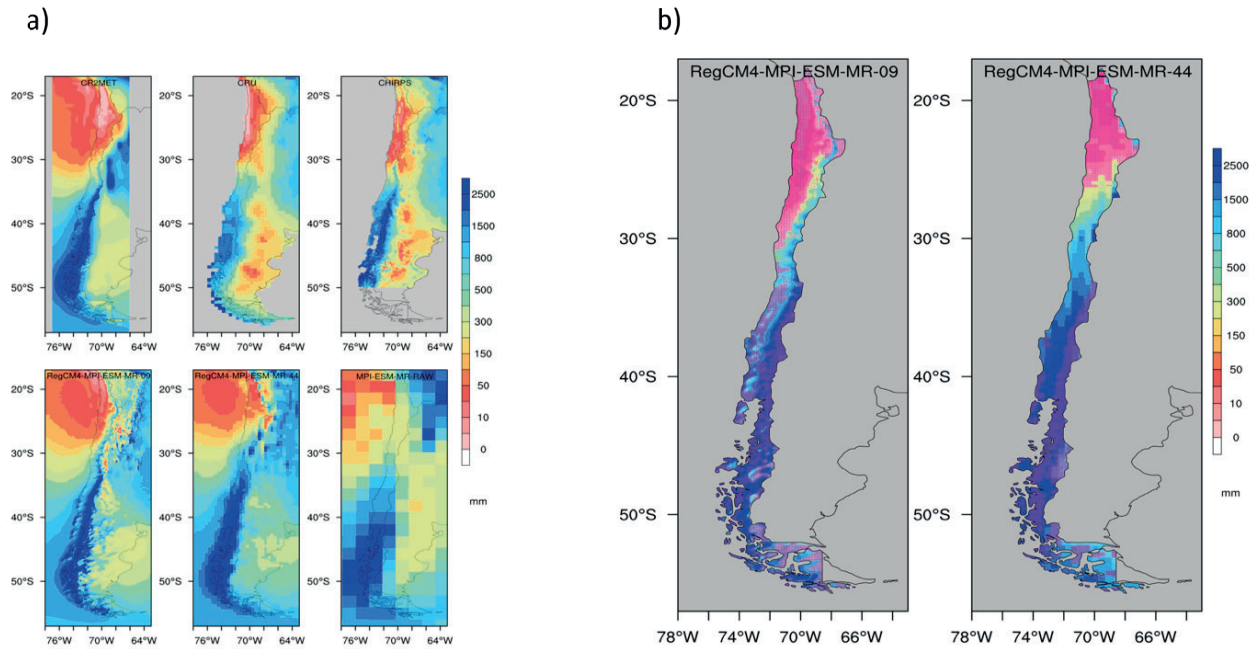


Figura 6: (a) Climatología anual de la precipitación (mm) para el periodo 1980-2005 basado en los datos observacionales grillados (panel superior) y las simulaciones forzadas por MPI-ESM-MR en 10 y 50 km resoluciones (panel inferior). El panel inferior también incluye MPI-ESM-MR. (b) El achurado (magenta) muestra valores positivos de valor agregado de acuerdo con los datos CR2MET.

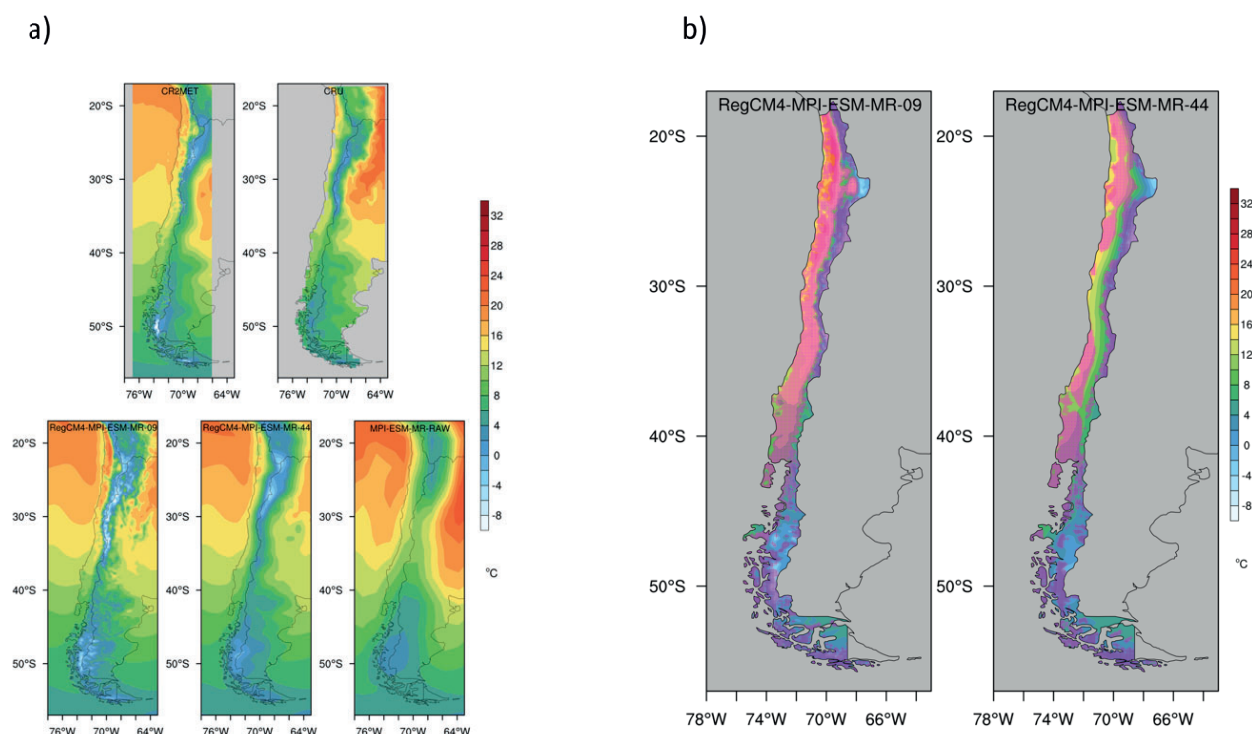


Figura 7: (a) Climatología anual de la temperatura (°C) para el periodo 1980-2005 basado en los datos observacionales grillados (panel superior) y las simulaciones forzado por MPI-ESM-MR en 10 y 50 km resoluciones (panel inferior). El panel inferior también incluye MPI-ESM-MR. (b) El achurado (magenta) muestra valores positivos de valor agregado de acuerdo con los datos CR2MET.

En resumen, la simulación de temperatura y precipitación de RegCM tanto a 50 km como a 10 km muestra valor agregado comparado con el modelo forzante. Además, la simulación a 10 km mejora considerablemente la simulación de la precipitación en la costa y valle central en la región centro-sur del país.

Sin embargo, el modelo tiene dos errores sistemáticos. Por un lado, una importante sobreestimación de la temperatura en la zona norte y una sobreestimación de la precipitación en Patagonia Sur. Ambas simulaciones (10 y 50 km) muestran la sobreestimación comparado con ERA-Interim, pero es mayor a 10 km. Esto podría relacionarse con el uso de un módulo de capa límite muy simple para el funcionamiento a alta resolución.

2.5 Resultados de las proyecciones

En esta sección presentamos las proyecciones del modelo MPI-ESM-MR y también del modelo climático regional a resoluciones de 50 km y 10 km forzadas con MPI-ESM-MR según los escenarios futuros de emisiones RCP2.6 (bajas emisiones) y RCP8.5 (altas emisiones).

Cabe aclarar que estas simulaciones no fueron corridas de manera continua: Las simulaciones históricas terminan el 31 de diciembre de 2005 y las proyecciones comienzan el 1 de enero de 2006, pero desde una condición inicial diferente (es decir, no son corridas como un *restart*). Esto tiene como consecuencia que las series de tiempo son discontinuas, ya que los años 2006 y 2007 corresponden al *spin-off* de la simulación y deben ser eliminadas del análisis.

Cambios en temperatura y precipitación

Temperatura

La Figura 8 muestra las diferencias de temperaturas anuales del modelo global MPI-ESM-MR para el periodo 2021-2050 respecto a 1976-2005 según los escenarios RCP2.6 (paneles superiores) y RCP8.5 (paneles inferiores). Todo el territorio nacional muestra un calentamiento, tanto en el promedio como en el valor anual. Respecto al modelo global MPI-ESM-MR, la simulación forzada por el escenario RCP8.5 muestra un mayor calentamiento. Se observa también un aumento de temperatura en el Altiplano y sobre la cordillera (~ 1.4°C para RCP2.6 y 2°C para RCP8.5). La resolución (10 km versus 50 km) muestra una proyección de calentamiento ligeramente menor, especialmente en la cordillera. Los valores de los cambios en el promedio anual van desde 0.4°C; 0.6°C (RCP2.6; RCP8.5 Patagonia Sur) a 1.2°C; 1.6°C (RCP2.6; RCP8.5 Altiplano) para el periodo 2021-2050 en las simulaciones de 10 km.

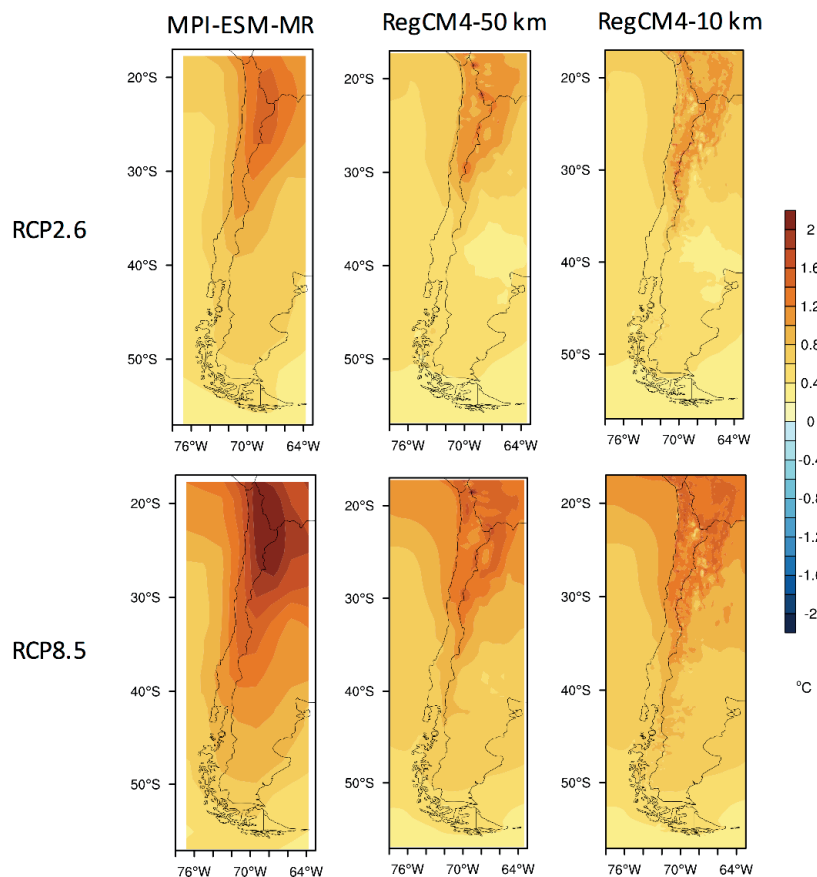


Figura 8: Mapas de cambio de temperatura (°C, anual) para el periodo 2021-2050, con respecto al periodo 1976-2005 basado en el modelo MPI-ESM-MR según los escenarios RCP2.6 (paneles superiores) y RCP8.5 (paneles inferiores).

Precipitación

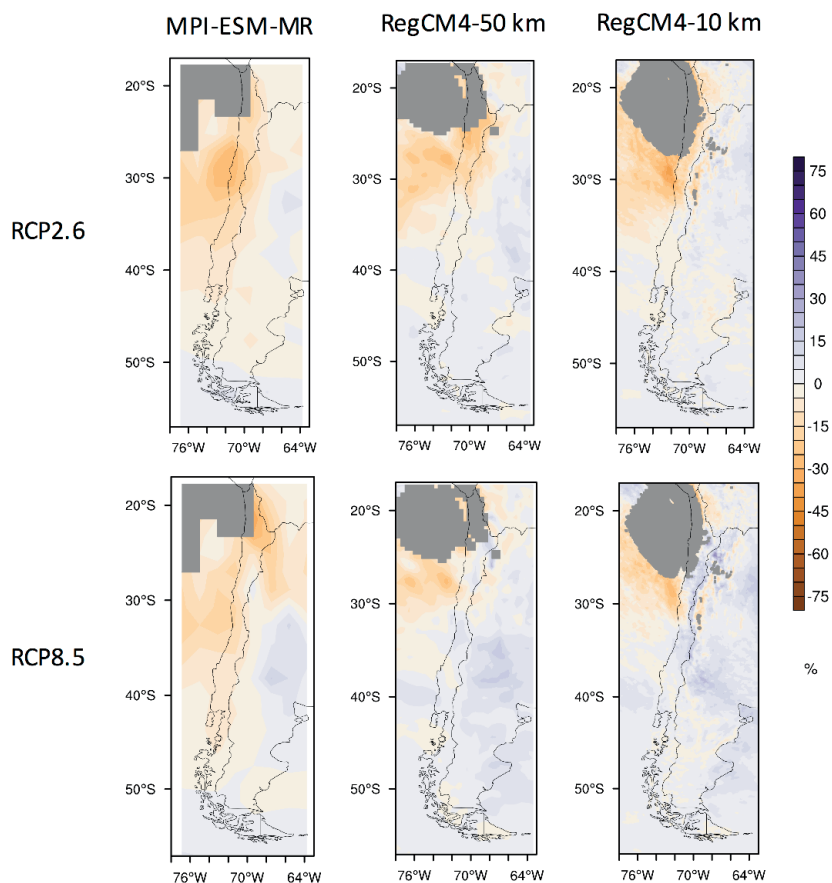


Figura 9: Mapas de cambio de precipitación (% anual) para el periodo 2021-2050, con respecto al periodo 1976-2005 basado en el modelo MPI-ESM-MR según los escenarios RCP2.6 (paneles superiores) y RCP8.5 (paneles inferiores). El color gris corresponde a las áreas enmascaradas donde la precipitación promedio es menor que 5 mm.

Las simulaciones del modelo global MPI-ESM-MR proyectan una disminución de las precipitaciones en gran parte del territorio nacional, excepto en Patagonia Sur (Figura 9). Las proyecciones de precipitación de los modelos regionales siguen en gran medida al modelo global utilizado como condición de borde, pero tienden a mostrar un mayor aumento de precipitaciones, en particular sobre la cordillera, especialmente en las simulaciones a 10 km según el escenario RCP8.5. Se observa una disminución robusta de la precipitación en invierno (Figura 10), pero su aumento en otras estaciones (otoño y primavera) da como resultado una mayor tendencia en el promedio anual. Un resultado similar se documentó para los Alpes en Giorgi et al. (2016). La condición de borde indica una disminución de la precipitación en invierno más evidente en la zona centro (Figura 10). Sin embargo, dado que la resolución de 10 km entrega más detalles de la topografía, las señales de cambio precipitación pueden ser sustancialmente moduladas por características de escala local (por ejemplo, la convección orográfica, el efecto de sombra por barreras de la topografía).

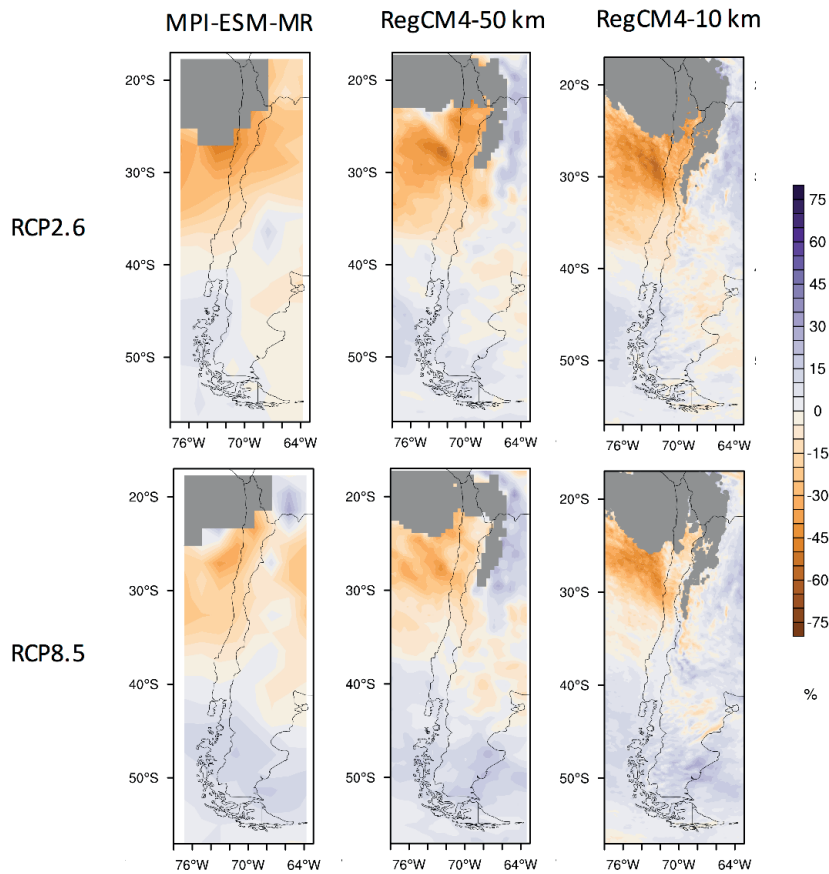


Figura 10: Mapas de cambio de precipitación (% , invierno) para el periodo 2021-2050, con respecto al periodo 1976-2005 basado en el modelo MPI-ESM-MR según los escenarios RCP2.6 (paneles superiores) y RCP8.5 (paneles inferiores). El color gris corresponde a las áreas enmascaradas donde la precipitación promedio es menor que 5 mm.

Para una correcta interpretación de los resultados de precipitación se deben considerar los siguientes aspectos: (1) El periodo 2021-2050 se considera como un futuro de cercano y mediano plazo y, por lo tanto, la variabilidad natural interna del sistema climático juega un papel mayor comparado con la componente antrópica en respuesta a los gases de efecto invernadero (natural versus forzada). De hecho, recién después de 2040 las diferencias en concentraciones de CO_2 en la atmósfera entre ambos escenarios se acentúa. (2) Para medir bien la componente natural se debería contar con un conjunto de simulaciones climáticas (ensamble). (3) Como solo contamos con dos simulaciones, los resultados se deben tomar con cuidado para no sobreinterpretarlos. Más bien, en cuanto a precipitaciones para el periodo 2020-2050, se deberían considerar como posibles escenarios de variabilidad natural, con débil forzamiento antrópico.

Teniendo en cuenta las advertencias anteriores, a continuación realizamos un análisis más específico para la zona central, donde vemos resultados inesperados. En la Figura 11 se muestran las series de tiempo de precipitación, separado por puntos de grillas tanto bajo como sobre los 1000 metros. El modelo RegCM4 amplifica la precipitación de los años lluviosos del modelo global, sobre todo en la cordillera. Es decir, la precipitación orográfica es sobreestimada en el modelo regional. Por lo tanto, se recomienda utilizar solamente la precipitación en los puntos que se encuentran a una altura menor de 1000 metros.

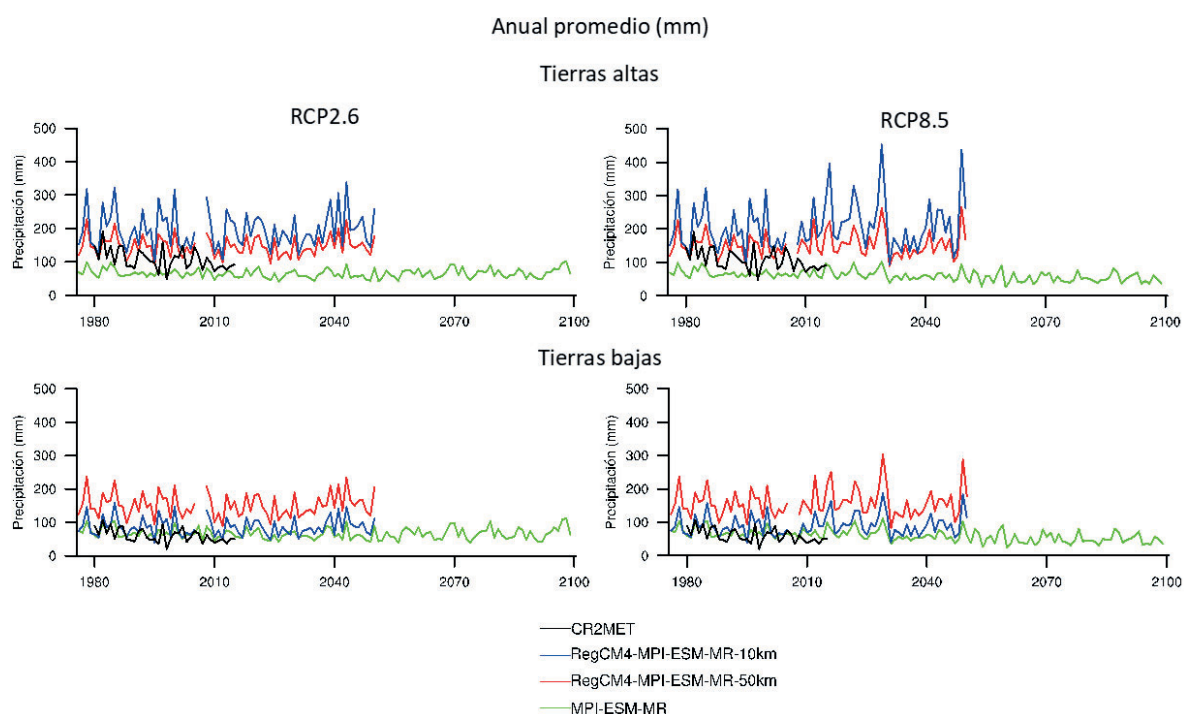


Figura 11: (a) Serie de tiempo de precipitación anual para la zona central según escenarios RCP2.6 (izquierda) y RCP8.5 (derecha), y promediados para puntos de grilla sobre los 1000 m (paneles superiores) y bajo 1000m (paneles inferiores): MPI-ESM-MR, RegCM4 50 km y 10 km, además de CR2MET.

Cambios en los eventos extremos diarios

Temperatura

El número de olas de calor (5 o más días consecutivos con temperatura máxima diaria 5°C por sobre un valor de referencia) aumenta en ambos escenarios, especialmente en la cordillera (Figura 12). El mayor número de olas de calor se observa en el promedio anual, pero es más pronunciado durante el verano y en la zona central y sur. Sobre la cordillera, gran parte del aumento ocurre en invierno y primavera. Las olas de calor se incrementan en el tiempo y son mayores en la simulación a 10 km. (Figura 13).

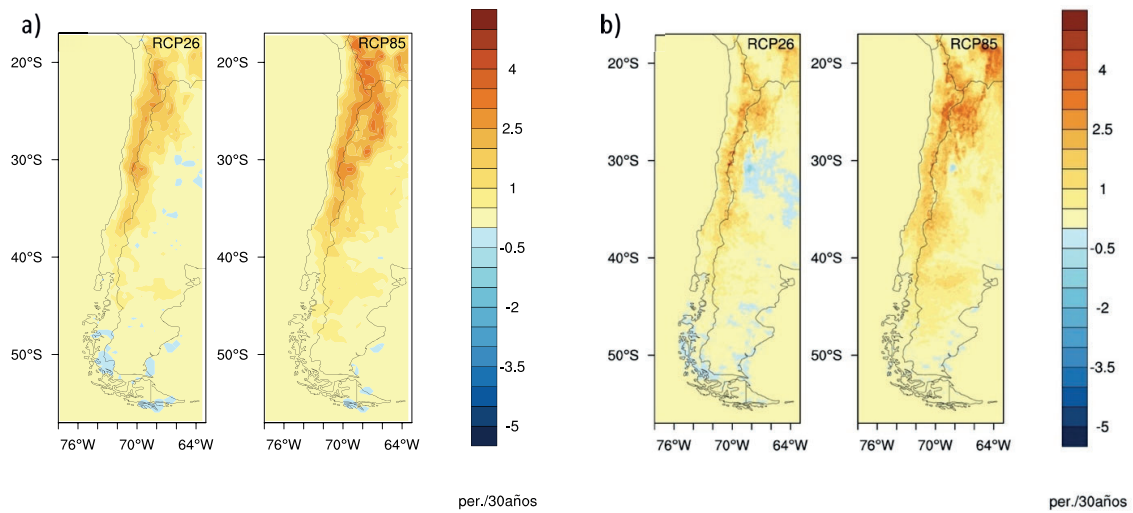


Figura 12: (a) Mapas de cambio de número de olas de calor (números, anual) para el periodo 2021-2050, con respecto al periodo 1976-2005 basado en las simulaciones de 50 km y (b) 10 km según los escenarios RCP2.6 y RCP8.5.

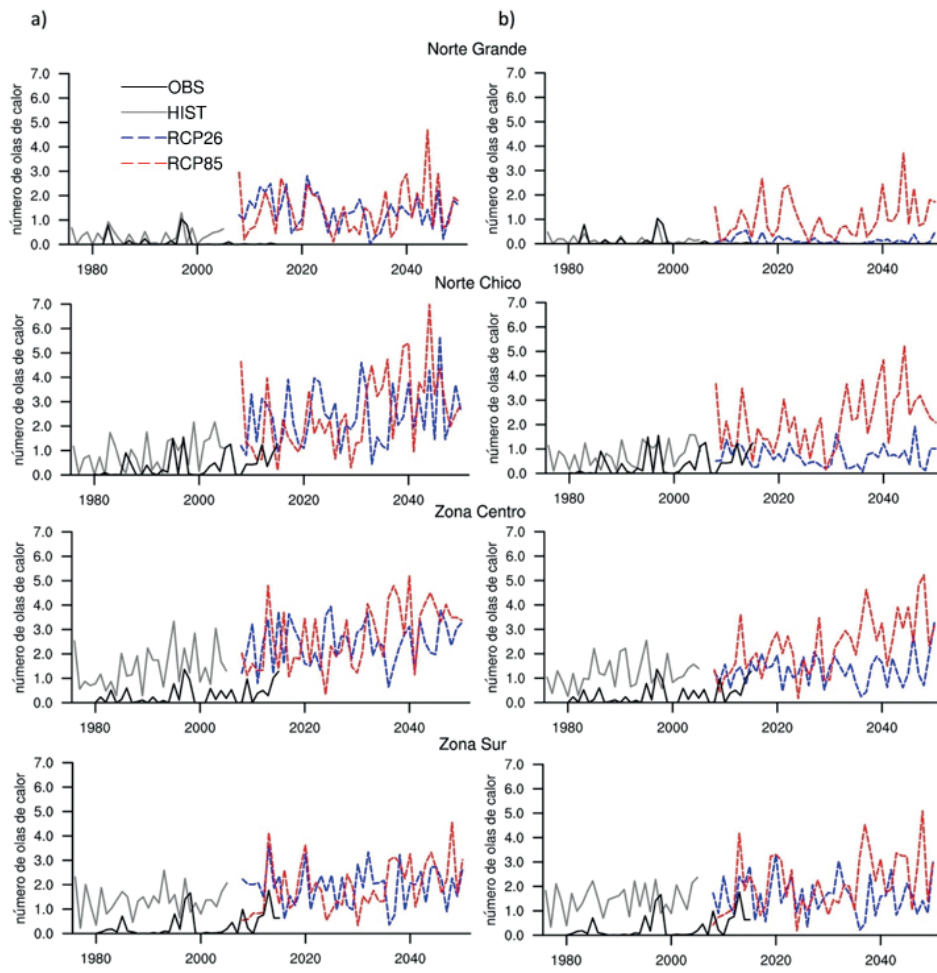


Figura 13: (a) Serie de tiempo de los números de olas de calor en las diferentes subregiones basado en las simulaciones de 50 km y (b) 10 km. La línea negra corresponde a las observaciones grilladas (CR2MET, 1980-2015) y línea gris corresponde a las simulaciones históricas (1976-2005). Líneas azul y roja son las proyecciones según los escenarios RCP2.6 y RCP8.5 (2008-2050), respectivamente.

Otro indicador analizado son las noches cálidas (ver Tabla 3), las cuales aumentan considerablemente, sobre todo en el Norte Grande (Figuras 14 y 15). En esta zona, la discontinuidad evidente en la serie de tiempo se explica por el importante sesgo identificado tanto en la simulación de validación como en la metodología empleada para la corrida de proyección (discontinua).

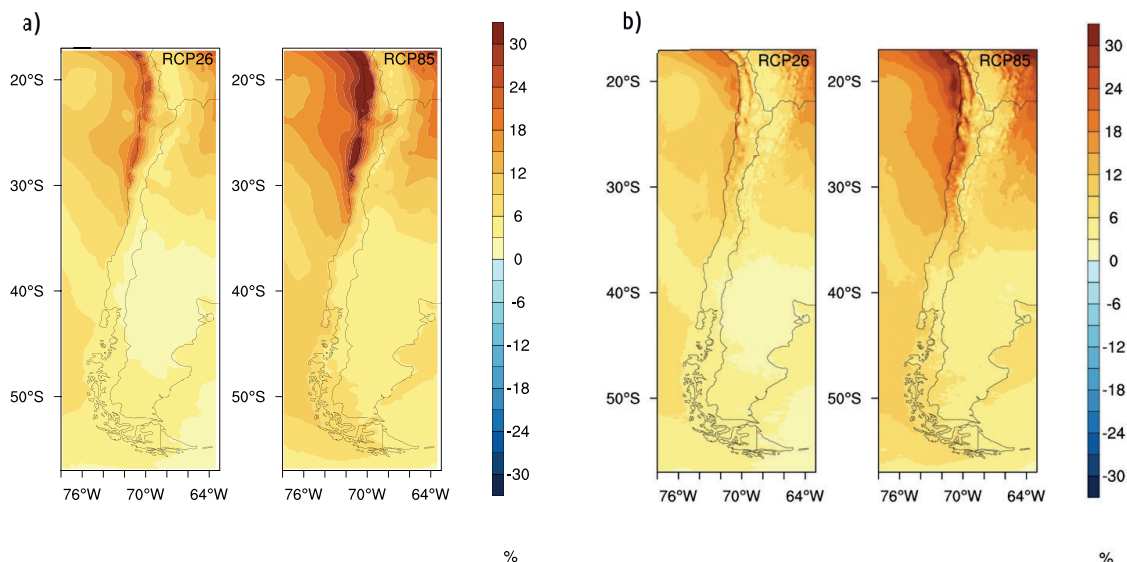


Figura 14: (a) Mapas de cambio de noches cálidas (% anual) para el período 2021-2050, con respecto al período 1976-2005 basado en las simulaciones de 50 km y (b) 10 km según los escenarios RCP2.6 y RCP8.5.

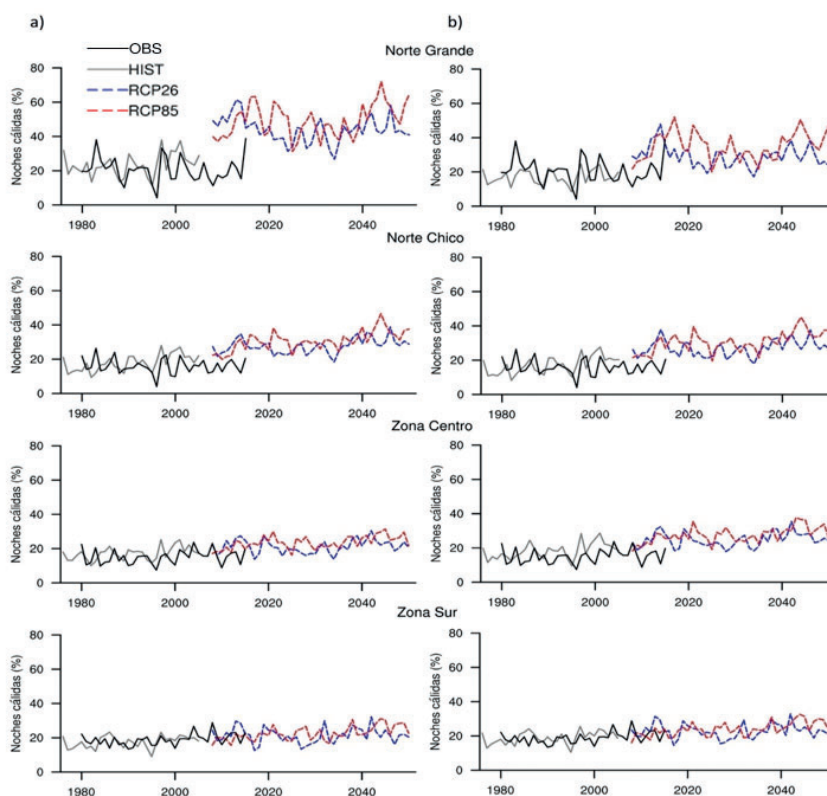


Figura 15: (a) Serie de tiempo de noches cálidas en las diferentes subregiones, basado en las simulaciones de 50 km y (b) 10 km. Línea negra corresponde a las observaciones grilladas (CR2MET, 1980-2015) y línea gris corresponde a las simulaciones históricas (1976-2005). Líneas azul y roja son las proyecciones según los escenarios RCP2.6 y RCP8.5 (2008-2050), respectivamente.

Los índices relacionados con días fríos (número de días en que la temperatura mínima es inferior a 0°C) disminuyen en el futuro para ambos escenarios y en las simulaciones a 50 km y 10 km (Figuras 16 y 17). El modelo RegCM4, en comparación al producto CR2MET, subestima el número de días helados en todas las regiones de análisis (línea negra comparada con gris en Figura 17).

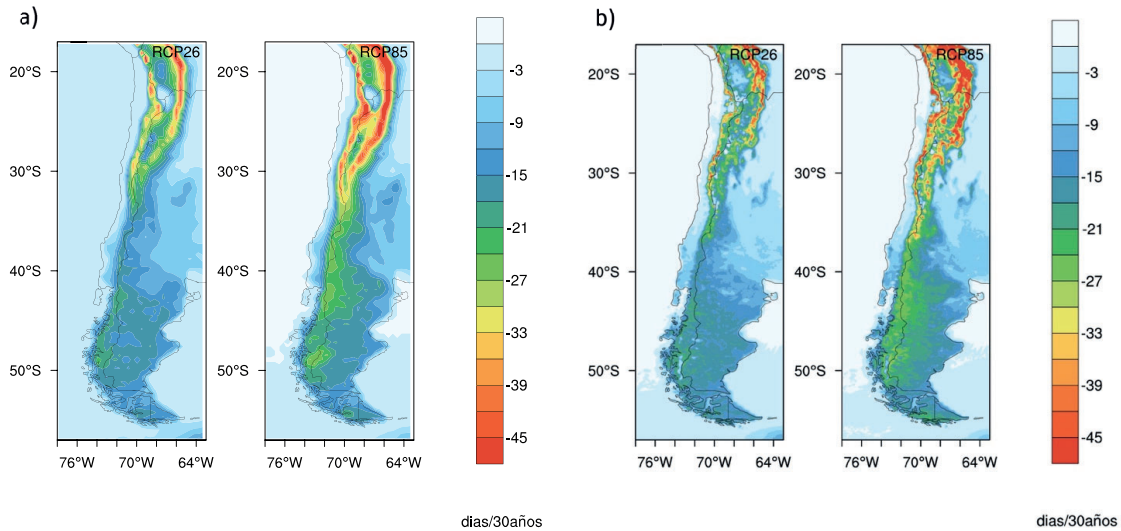


Figura 16: (a) Mapas de cambio de días helados (días, anual) para el periodo 2021-2050, con respecto al periodo 1976-2005 basado en las simulaciones de 50 km y (b) 10 km según los escenarios RCP2.6 y RCP8.5.

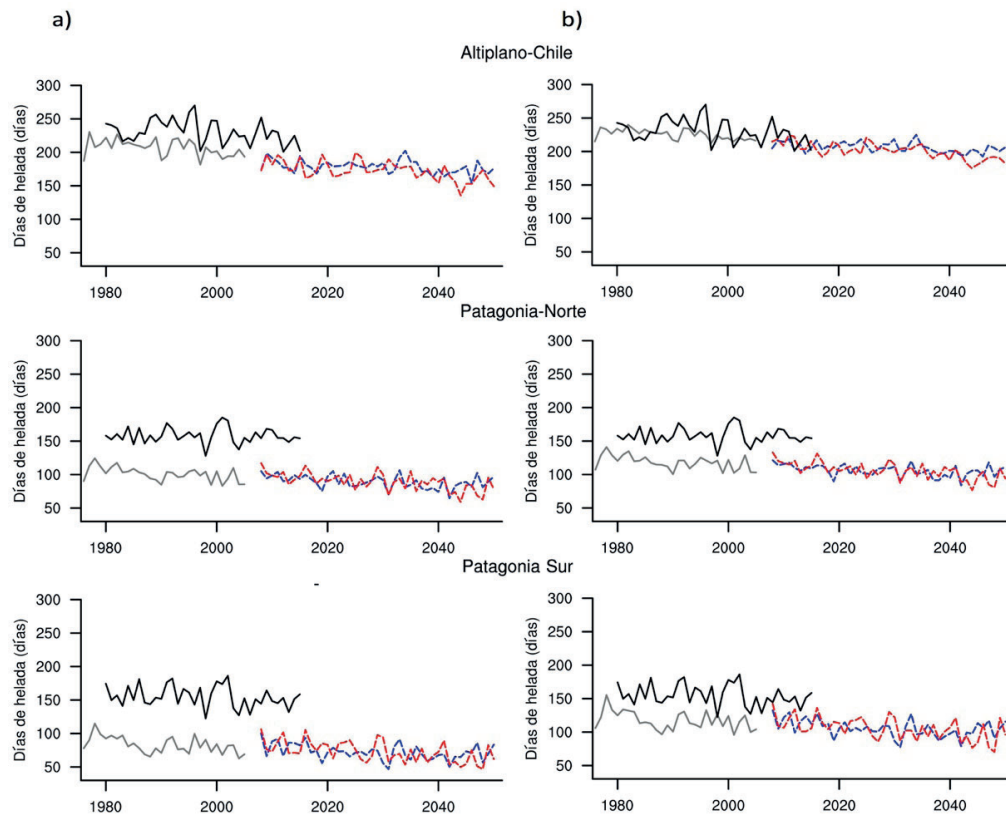


Figura 17: (a) Serie de tiempo de días helados en las diferentes subregiones basadas en las simulaciones de 50 km y (b) 10 km. Línea negra corresponde a las observaciones grilladas (CR2MET, 1980-2015) y línea gris corresponde a las simulaciones históricas (1976-2005). Líneas azul y roja son las proyecciones según los escenarios RCP2.6 y RCP8.5 (2008-2050), respectivamente.

Precipitación

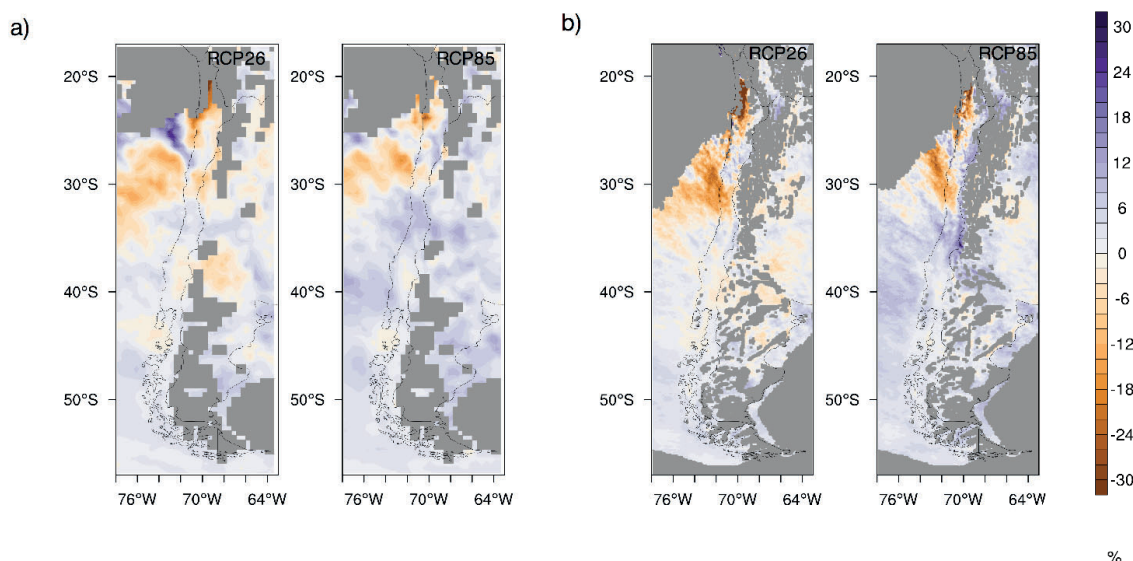


Figura 18: (a) Mapas de cambio de intensidad diaria de precipitación (% anual) para el periodo 2021-2050, con respecto al periodo 1976-2005 basado en las simulaciones de 50 km y (b) 10 km según los escenarios RCP2.6 y RCP8.5. El color gris corresponde a las áreas enmascaradas donde la precipitación diaria es menor que 5 mm.

En cuanto a la intensidad diaria de la precipitación anual, los resultados son heterogéneos y más acentuados (mayor amplitud) en la simulación a 10 km en comparación a la realizada a 50 km (Figura 18b comparada con Figura 18a).

Para Norte Grande, Norte Chico y, en menor medida, Altiplano, se proyecta una disminución de la intensidad diaria. Sin embargo, en el resto del territorio se observa un leve aumento en la intensidad diaria, sobre todo en la cordillera. Las simulaciones a 10 km según RCP8.5 indican que una gran parte del aumento en el promedio anual sobre la cordillera se debe al incremento en verano y primavera. Este resultado también se observa en la serie de tiempo promediado sobre las distintas macrozonas (Figura 19).

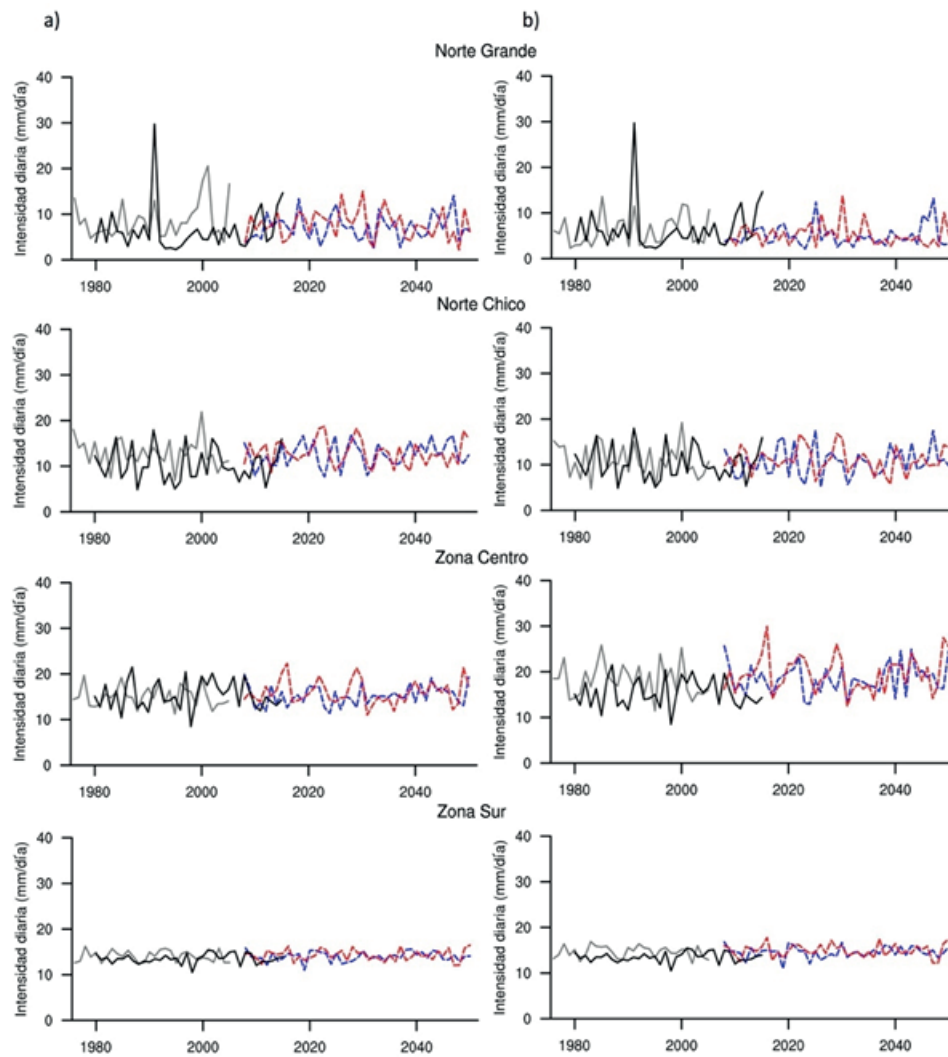


Figura 19: (a) Serie de tiempo de intensidad diaria de precipitación en las diferentes subregiones basado en las simulaciones de 50 km y (b) 10 km. Línea negra corresponde a las observaciones grilladas (CR2MET, 1980-2015) y línea gris corresponde a las simulaciones históricas (1976-2005). Líneas azul y roja son las proyecciones según los escenarios RCP2.6 y RCP8.5 (2008-2050), respectivamente.

3. REFERENCIAS

Dee, D. P., and Coauthors, (2011). The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 137, 553–597, doi:10.1002/qj.828.

Di Luca A, de Elia R, Laprise R. (2012) Potential for added value in precipitation simulated by high resolution nested regional climate models and observations. *Clim. Dyn.* 38: 1229–1247, doi: 10.1007/s00382-011-1068-3.

Dosio A, Panitz HJ, Schubert-Frisius M, Lüthi D. (2015). Dynamical downscaling of CMIP5 global circulation models over CORDEX-Africa with COSMO-CLM: evaluation over the present climate and analysis of the added value. *Clim. Dyn.* 44: 2637–2661, doi: 10.1007/s00382-014-2262-x.

Funk, Chris, Pete Peterson, Martin Landsfeld, Diego Pedreros, James Verdin, Shraddhanand Shukla, Gregory Husak, James Rowland, Laura Harrison, Andrew Hoell & Joel Michaelsen (2015) “The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes”. *Scientific Data* 2, 150066. doi:10.1038/sdata.2015.66.

Giorgi, F. and Coauthors (2012). RegCM4: Model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains. *Climate Res.*, 52, 7–29, doi:10.3354/cr01018.

Giorgi, F., Torma, C., Coppola, E., Ban, N., Schar, C., and Somot, S. (2016). Enhanced summer convective rainfall at Alpine high elevations in response to climate warming. *Nat. Geosci.*, 9, 584-589.

Mitchell and Jones (2005). An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. *Int. J. Climatology*, 25, 693-712.

Moss, R.H., J.A. Edmonds, K.A. Hibbard, M.R. Manning, S.K. Rose, D.P. van Vuuren, T.R. Carter, S. Emori, M. Kainuma, T. Kram, G.A. Meehl, J.F.B., Mitchell, N. Nakicenovic, K. Riahi, S.J. Smith, R.J. Stouffer, A.M. Thomson, J.P. Weyant and T.J. Wilbanks, 2010: The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, Vol 463j11 February 2010jdoi:10.1038/nature08823.

Peterson, TC, (2005). Climate Change Indices. *WMO Bulletin*, 54 (2), 83-86.



Santiago, 2018
Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)²
(FONDAP 15110009) Universidad de Chile