



Escenarios climáticos: Cambios en los Extremos climáticos en el Perú al 2050

PE2021

Noviembre 2021



Escenarios climáticos: Cambios en los Extremos climáticos en el Perú al 2050

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú – SENAMHI

Ministerio del Ambiente

Ministro del Ambiente

Rubén José Ramírez Mateo

Revisión y Contribuciones:

Delia Acuña Azarte

Presidente Ejecutivo del SENAMHI

Ken Takahashi Guevara

Primera Edición:

Noviembre 2021

Dirección de Meteorología y Evaluación Ambiental Atmosférica

Gabriela Teófila Rosas Benancio

Hecho el Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú N° : 2021-12450

Estudio disponible en:

<https://hdl.handle.net/20.500.12542/1469>

Subdirección de Modelamiento Numérico de la Atmósfera

Delia Acuña Azarte

Editado por:

©Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, SENAMHI.

Jr. Cahuide 785, Jesús María, Lima-Perú.

Teléfono: (01) 6141414

Autor:

Gustavo De la Cruz Montalvo

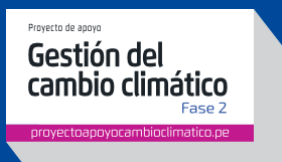
www.gob.pe/senamhi

Todos los derechos reservados

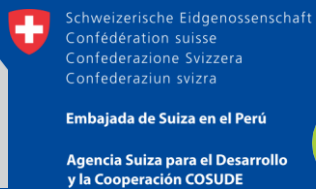
Prohibida la reproducción de este estudio por cualquier medio, total o parcialmente, sin permiso expreso.

Publicación realizada en el marco del Proyecto Apoyo a la Gestión del Cambio Climático - Fase 2. Una iniciativa del gobierno peruano, liderado por el Ministerio del Ambiente y el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. Financiado por la Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación – COSUDE, ejecutado por Libélula Instituto para el cambio Global y South South North.

Implementado por:



Financiado por:



En alianza



ÍNDICE GENERAL

I.	INTRODUCCIÓN	8
1.1.	Objetivo General	8
1.2.	Objetivos específicos.....	8
II.	MARCO TEÓRICO	9
2.1.	Cambio Climático	9
2.2.	Modelos de Circulación General.	10
2.4.	Extremos climáticos	13
III.	MATERIALES Y MÉTODOLOGÍA.....	16
3.1.	Área de estudio	16
3.2.	Datos empleados.....	17
3.3.	Metodología	19
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIONES	22
4.1.	Cambios de extremos de precipitación.....	22
4.2.	Cambios de extremos de temperaturas máximas y mínimas.	24
4.3.	Incertidumbre asociada a los cambios de extremos.....	26
4.4.	Cambios de extremos anuales por sector climático.	31
V.	CONCLUSIONES	33
VI.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	35
VII.	ANEXO:	38

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Anomalías anuales y decenales de temperaturas a nivel mundial, extensión de hielo mariano y nivel medio global del mar. Fuente: IPCC, 2014.	10
Figura 2. Esquema de cálculos de un modelo de Circulación General en un paso de tiempo y para cada grilla. Fuente: adaptado de Gettelman & Rood (2016).	11
Figura 3. Cambios futuros en temperatura media global de acuerdo a escenarios de emisión. Fuente: IPCC (2014).	13
Figura 4. Cambios en el promedio y variabilidad de temperaturas. Fuente: Neri & Andulce (2012) adaptado de IPCC (2007).	14
Figura 5. Cambios futuros en extremos de precipitación y temperaturas sobre Sudamérica. Fuente: Adaptado de IPCC-AR6-WG1 (2021).	15
Figura 6. Mapa topográfico de Perú y delimitación de sectores climáticos según SENAMHI (2021) usados para el presente estudio. Fuente: elaboración propia.	16
Figura 7. Procesos conducentes para la generación de datos Escenarios Climáticos para la estimación de los Cambios en los extremos climáticos a futuro. Fuente: SENAMHI/DAA, 2021.	18
Figura 8. Cambios anuales en el periodo 2036-2065 con respecto al periodo 1981-2005 para índices de extremos de precipitación. Promedio de los tres modelos. Fuente: elaboración propia.	23
Figura 9. Cambios anuales en el periodo 2036-2065 con respecto al periodo 1981-2005 para índices de extremos de temperaturas. Promedio de los tres modelos. Fuente: elaboración propia.	25
Figura 10. Cambios de índices de extremos de frecuencias de precipitación (de arriba abajo: CDD, CWD, R10 y R20) para los tres modelos. Las líneas continuas indican el rango de valores de los tres modelos. Los resultados son promedios para cada sector climático. Fuente: elaboración propia.	27
Figura 11. Cambios de índices de extremos de intensidad de precipitación (de arriba a abajo: PRCPTOT, RX1day, SDII y R95pTOT) para los tres modelos. Las líneas continuas indican el rango de valores de los tres modelos. Los resultados son promedios para cada sector climático. Fuente: elaboración propia.	28
Figura 12. Cambios de índices de extremos relacionados a temperaturas (de arriba a abajo: TN10p, TN90p, TX10p y TX90p) para los tres modelos empleados. Las líneas continuas indican el rango de valores de los tres modelos. Los resultados son promedios para cada sector climático. Fuente: elaboración propia.	30

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características sobre información de escenarios climáticos usados en el presente estudio. Fuente: Elaboración propia.....	17
Tabla 2. Índices de extremos determinados en el presente estudio. Fuente: Elaboración propia.....	20
Tabla 3. Cambios promedios de los índices de extremos de precipitación. Las celdas rojas indican cambios promedios mayores a 10% y además incremento en los tres modelos. Las celdas azules indican cambios promedios menores a -10% y reducciones en los tres modelos. Fuente: elaboración propia.....	32
Tabla 4. Cambios promedios de los índices de extremos de temperaturas. Las celdas rojas indican aumentos en los tres modelos. Las celdas en azul disminuciones en los tres modelos. Fuente: elaboración propia.....	32
Tabla 5. Rango de Variación de los índices de extremos climáticos proyectados 2036-2065 en el Perú resultado del Multimodelo	38

RESUMEN

El cambio climático no solo provoca alteraciones en el promedio del clima, sino también cambios en su variabilidad y extremos. Los extremos meteorológicos y climáticos generan pérdidas de vidas humanas, impactos sociales y cuantiosas pérdidas económicas en diferentes partes del mundo. Dado que nuestro país presenta una gran diversidad de climas y marcadas regiones naturales como Costa, Andes y Amazonia; es afectado por diferentes extremos relacionados a precipitación y temperatura. Es por ello que en el presente estudio se analiza los posibles cambios futuros de estos extremos usando como base la información de escenarios climáticos regionalizados de SENAMHI. La metodología consistió en estimar y analizar los cambios de los extremos climáticos en el periodo 2036-2065 relativo al periodo de referencia 1981-2005. Para ello se utilizaron como base información de tres modelos climáticos globales (HadGEM2-ES, MPI-ESM-LR y ACCES1-0) regionalizados con el modelo climático regional WRF y que además pasaron por un proceso de corrección estadística, obteniéndose información a una resolución espacial de 5 km. El análisis de extremos estuvo basado en la estimación de un grupo de índices establecidas por el ETCCDI. Se estimaron un total de 21 índices a nivel anual, los cuales caracterizan eventos extremos relacionados a precipitación, temperaturas máximas y temperaturas mínimas. Los resultados evidencian que para los extremos de precipitación tanto en su frecuencia e intensidad existen incrementos superiores a 15% en la costa norte. En la costa centro y sur, dos de los tres modelos analizados presentan incrementos en intensidad y frecuencia. En los Andes, se ha identificado en la vertiente oriental incrementos mayores a 10% en la intensidad y frecuencia de los eventos extremos de precipitación, principalmente en la sierra sur oriental. En contraste, la Amazonia proyecta reducciones de 10% en los días húmedos consecutivos y en el número de días con precipitaciones intensas, mientras que los eventos de precipitaciones intensas presentan mayormente ligeros incrementos y de reducciones de $\pm 10\%$ con lo cual no se puede inferir una señal de cambios consistente. En relación a los escenarios de extremos de temperaturas, existe consenso de los tres modelos en proyectar cambios con aumentos en más de 1.5°C en costa, y de 2°C en los Andes y Amazonia. Por otro lado, los índices de frecuencia de noches cálidas y días cálidos indican aumentos por encima de 50%; siendo estos más acentuados en la región andina, mientras que las noches frías y días fríos se encuentran en disminución general en todo el país, al igual que los eventos de heladas en la región andina.

Palabras claves:

Extremos meteorológicos y climáticos, Índices de extremos de temperatura y precipitación, cambios futuros.

I. INTRODUCCIÓN

El cambio climático está caracterizado por el incremento de las temperaturas como respuesta a un aumento en la concentración de los gases de efecto invernadero (IPCC, 2014). Esto provocaría alteraciones en las condiciones promedias de diferentes variables climáticas. Este proceso presenta grandes retos que no están únicamente relacionados a las variaciones del clima promedio, sino también en las variaciones de los extremos climáticos. Diferentes investigaciones relacionadas a cambios históricos en variables climáticas han demostrado mayor variabilidad en las últimas décadas. Dichas variabilidades se han manifestado en cambios relacionados a las frecuencias e intensidades, así como en los riesgos de peligros climáticos (Shiru *et al.*, 2020; Salman *et al.* 2018; Shiru *et al.*, 2018). Todas estas manifestaciones de cambios en la variabilidad pueden generar severos impactos en la sociedad y en la economía a nivel global, es por ello que el análisis de los posibles cambios en los eventos extremos es de fundamental importancia. En este contexto, el Perú presenta una fuerte variabilidad espacial de sus climas debido a la presencia de la Cordillera de los Andes, esto origina una variedad de extremos como son las heladas, las lluvias extremas, días cálidos, días fríos, entre otros. Estos eventos extremos ocasionan fuertes impactos de manera recurrente en distintas localidades. Por esta razón, es importante el análisis a escala local de los cambios no solo en las series promedio, sino también, en los valores extremos de precipitación y temperatura. En ese sentido, el presente estudio tiene como objetivo analizar los posibles cambios futuros en extremos climáticos usando como base información de escenarios climáticos regionalizados y la estimación de índices de extremos climáticos.

1.1. Objetivo General

Determinar índices de extremos climáticos para el Perú basado en escenarios climáticos con proyecciones al 2050

1.2. Objetivos específicos

- Determinar índices de extremos climáticos futuros a nivel nacional usando como base información de escenarios climáticos regionalizados.
- Analizar los cambios a futuros de los índices de extremos climáticos para el periodo 2036-2065 relativo al periodo 1981-2005.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Cambio Climático

De acuerdo al Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, 2018), el cambio climático hace referencia a una variación del estado del clima identificable (por ejemplo, mediante pruebas estadísticas) en las variaciones del valor medio o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante períodos prolongados, generalmente décadas o períodos más largos. Asimismo, se hace mención de que este cambio puede atribuirse a procesos internos naturales o a forzamientos externos, tales como modulaciones de los ciclos solares, erupciones volcánicas y cambios antropógenos persistentes de la composición de la atmósfera o del uso de la tierra. Por otro lado, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), en su artículo 1, define el cambio climático como “cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables”. Según el Cuarto Informe de Evaluación-AR4 del IPCC (2007) el sistema climático se está calentando y además esta anomalía es respuesta a la acción del hombre por el incremento de los gases de efecto invernadero. Posteriormente, en el Quinto Informe de Evaluación-AR5 (2014) evidencia un consistente aumento de la temperatura de la superficie terrestre y oceánica a nivel global de 0.85°C durante el periodo 1880-2012, y asimismo menciona que cada uno de los tres últimos decenios ha sido sucesivamente más cálido en la superficie de la Tierra que cualquier decenio anterior desde 1850.

Adicionalmente, el AR5 presenta evidencias del incremento de la temperatura promedio de la superficie terrestre y en los océanos en los últimos años, lo cual está relacionado a una elevación del nivel medio del mar por deshielos y expansión térmica (figura 1). Es importante mencionar que la razón de aumento de la temperatura es mayor durante las últimas tres décadas y que está asociado al aumento de concentración de GEI. Asimismo, la extensión de hielo en los glaciares ha disminuido lo cual contribuiría al aumento del nivel del mar.

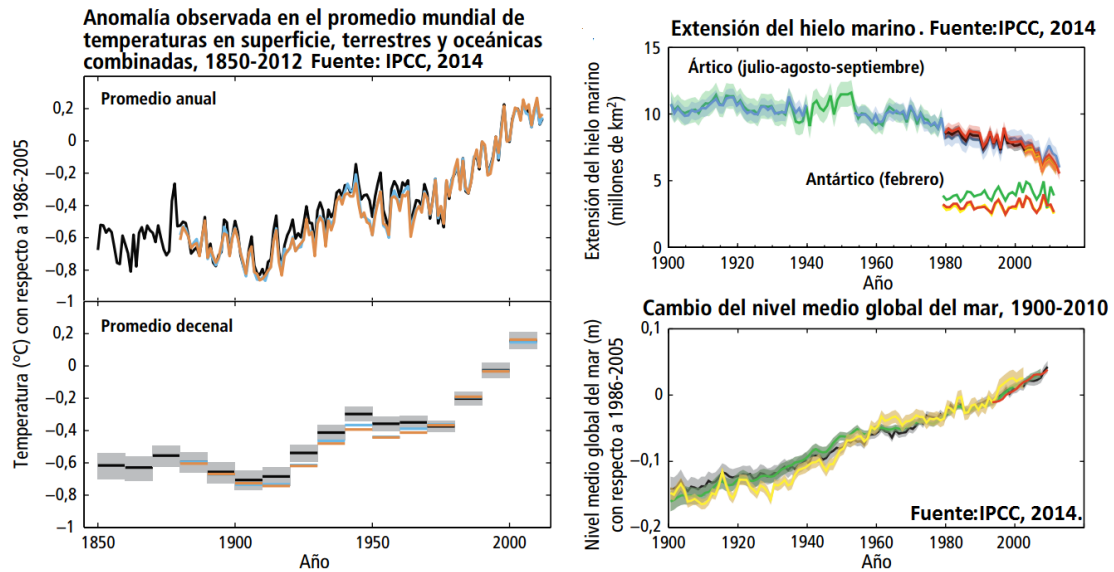


Figura 1. Anomalías anuales y decenales de temperaturas a nivel mundial, extensión de hielo mariano y nivel medio global del mar. Fuente: IPCC, 2014.

El IPCC (2018) menciona que las actividades humanas han causado un calentamiento global de aproximadamente 1,0 °C con respecto a los niveles preindustriales, con un rango probable de 0,8 °C a 1,2 °C. Es probable que el calentamiento global llegue a 1,5 °C entre 2030 y 2052 si continúa aumentando al ritmo actual (nivel de confianza alto).

2.2. Modelos de Circulación General.

Los modelos de circulación general (GCM por sus siglas en inglés) son representaciones matemáticas de procesos atmosféricos, oceánicos y continentales; así como también, las interacciones que ocurren entre ellos (Mekonnen *et al.*, 2019). Los GCM son capaces de simular las características promedio más importante del clima global (Zorita & Von Storch, 1999); sin embargo, están limitados por la complejidad e incertidumbre, así como las interacciones no lineales entre procesos océano-atmosféricos (Hillel & Rosenzwei, 1989).

La forma en la que trabajan los modelos climáticos es en separar la superficie de la tierra en una cuadrícula tridimensional de celdas. Los resultados de los procesos modelizados en cada celda son transferidos a las celdas cercanas para modelizar el intercambio de materia y energía sobre el tiempo (figura 2). El tamaño de las celdas de grilla define la resolución del modelo: mientras más pequeño sea el tamaño de celda, el modelo tiene un mayor nivel de detalle. Los modelos que cuentan con más detalles tienen más celdas de grilla, y por lo tanto, necesitan más recurso computacional para realizar las simulaciones (NOAA).

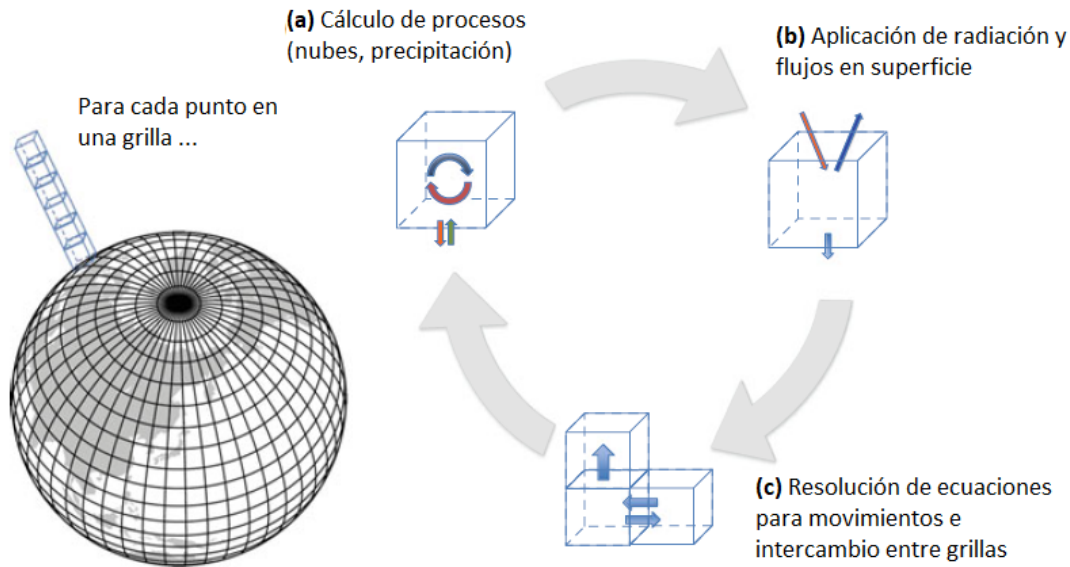


Figura 2. Esquema de cálculos de un modelo de Circulación General en un paso de tiempo y para cada grilla. Fuente: adaptado de Gettelman & Rood (2016).

Actualmente los GCM son las herramientas más prometedoras para proyectar las tendencias futuras del clima y variabilidad (Kharin *et al.*, 2007), pero previamente es crucial evaluar el desempeño de los modelos en simular variables climáticas sobre una región. Es por ello que, a pesar que se pueda tener una amplia disponibilidad de GCM debe ser realizado un proceso de validación que permita obtener un conjunto de modelos más confiables. Los GCM son generalmente seleccionados acordes a su habilidad para simular el clima histórico y también en su capacidad de simular procesos océano atmosféricos responsables de la variación del clima en una región (Salman *et al.*, 2020).

Dado que hay diferentes modelos climáticos desarrollados por diferentes grupos alrededor del mundo, el Proyecto de Inter-comparación de Modelos Acoplados (CMIP por sus siglas en inglés) fue establecido como un marco estándar para la evaluación, inter-comparación, documentación y acceso de los GCM. En el presente estudio se ha utilizado la información del CMIP5¹ el cual provee simulaciones de más de 50 GCM desarrollados por más de 20 grupos de modelamiento.

2.3. Escenarios climáticos.

El IPCC (2018) define un escenario como una descripción plausible de un futuro verosímil, basada en un conjunto coherente e internamente congruente de supuestos sobre las fuerzas motrices (por ejemplo, el ritmo del cambio tecnológico y los precios) y sobre las relaciones más importantes. Cabe resaltar también que los escenarios no son ni predicciones ni pronósticos,

¹ La información de escenarios del CMIP se encuentra disponible de libre descarga en: <https://esgf-node.llnl.gov>.

pero son útiles porque ofrecen un panorama de las consecuencias de la evolución de distintas situaciones y medidas.

Un escenario climático es una representación plausible del clima futuro los cuales han sido construidos para el uso explícito en investigar los potenciales impactos del cambio climático antropogénico. Los escenarios climáticos frecuentemente usan proyecciones climáticas (descripciones de la respuesta modelizada del sistema climático a concentraciones de gases de efecto invernadero y aerosoles) mediante el procesamiento de sus salidas y combinándolas con información observada (IPCC, 2018).

Por otro lado, el análisis de escenarios a partir de GCM no solo se limita al análisis de condiciones atmosféricas a largo plazo, sino también oceánicas. Así, por ejemplo, Ruela *et al.* (2020) realizó un análisis de cambios futuro para la variable de temperatura superficial del mar bajo escenarios de cambio climático, encontrando un calentamiento de esta variable a nivel global, siendo más intenso este calentamiento en las regiones tropicales y subtropicales.

La base para trabajar posibles condiciones climáticas futuras son los escenarios de emisiones. Estos escenarios son representaciones plausibles de rutas futuras de concentraciones futuras. Para el caso de grupos de modelos del CMIP5 se emplearon las Rutas de Concentraciones Representativas (RCP por sus siglas en inglés) los cuales definen posibles trayectorias de concentraciones de gases de efecto invernadero y aerosoles (expresado mediante valores de forzamiento radiativo² en el año 2100). Cada trayectoria representa un escenario de desarrollo de emisiones antropogénicas (NCCS). Existen cuatro RCP utilizados en los escenarios del CMIP5: un escenario de bajas emisiones (RCP 2.6), dos escenarios de emisiones moderadas (RCP 4.5 y RCP 6.0) y un escenario de altas emisiones (RCP 8.5). Así, por ejemplo, la figura 3 muestra escenarios de cambios futuros de temperatura media global hasta el año 2100, en el cual se distingue que en un escenario de bajas concentraciones (RCP 2.6) el promedio de los cambios es alrededor de 1°C. Por otro lado, en un escenario de altas concentraciones (RCP 8.5) el promedio de los cambios es de aproximadamente 4 °C hacia el año 2100.

² Variación, expresada en W/m⁻², del flujo radiativo neto (la descendente menos la ascendente) en la tropopausa o en la parte superior de la atmósfera, debido a una variación del causante externo del cambio climático por ejemplo, una variación de la concentración de dióxido de carbono (CO₂) o de la radiación solar (IPCC, 2018).

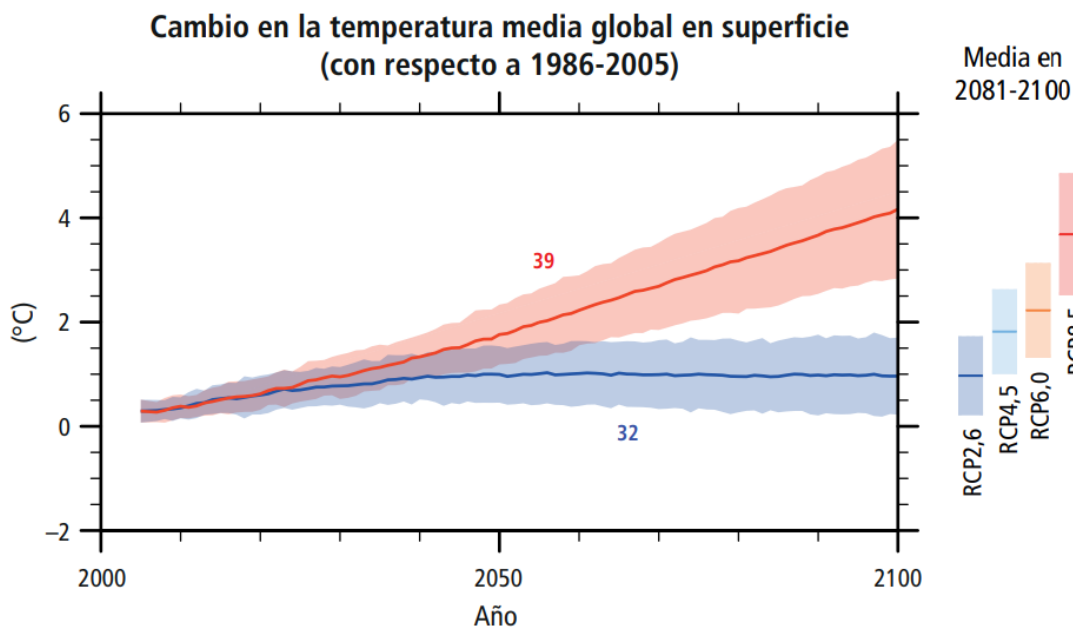


Figura 3. Cambios futuros en temperatura media global de acuerdo a escenarios de emisión.
Fuente: IPCC (2014).

Un aspecto importante del análisis de los escenarios climáticos es considerar la cascada de incertidumbre inherente en esta información. Esta cascada incluye el desconocimiento de gases de efecto invernadero y aerosoles, la conversión de emisiones a concentraciones atmosféricas y forzamiento radiativo, la respuesta de los modelos climáticos a dichos forzamientos y los métodos de regionalización de los escenarios climáticos. Consecuentemente, es importante considerar un rango de escenarios climáticos para el análisis de impactos (IPCC, 2001).

2.4. Extremos climáticos

El IPCC (2018) define como extremo climático a la ocurrencia del valor de una variable meteorológica o climática por encima (o por debajo) de un valor de umbral cercano al extremo superior (o inferior) de la distribución de valores observados de la variable. En términos estadísticos un evento extremo meteorológico puede ser caracterizado a partir de los percentiles 10 o 90 de la función de distribución de probabilidad. En el caso que se utilicen valores absolutos estos pueden variar de un lugar a otro dependiendo de las condiciones climáticas en cada localidad. Asimismo, el IPCC también menciona que un comportamiento extremo del tiempo puede clasificarse como fenómeno climático extremo cuando persiste durante cierto tiempo (por ejemplo, una estación del año), especialmente si sus valores promediados o totales son extremos (ejemplo sequía o precipitación intensa a lo largo de una temporada). El análisis de eventos extremos meteorológicos y climáticos es bien importante para estudios de impactos del cambio climático. Tanto los cambios en ocurrencia e intensidad

de extremos deben ser incluidos en los estudios relacionados a escenarios climáticos. El cambio climático puede ocasionar cambios en los promedios y en la variabilidad lo cual puede ocasionar que la frecuencia y la intensidad de los extremos se alteren. Por ejemplo, la figura 4 muestra un posible aumento en el promedio y variabilidad de temperaturas lo cual se vería reflejado en una disminución de los eventos extremos fríos y un sustancial incremento de los extremos cálidos.

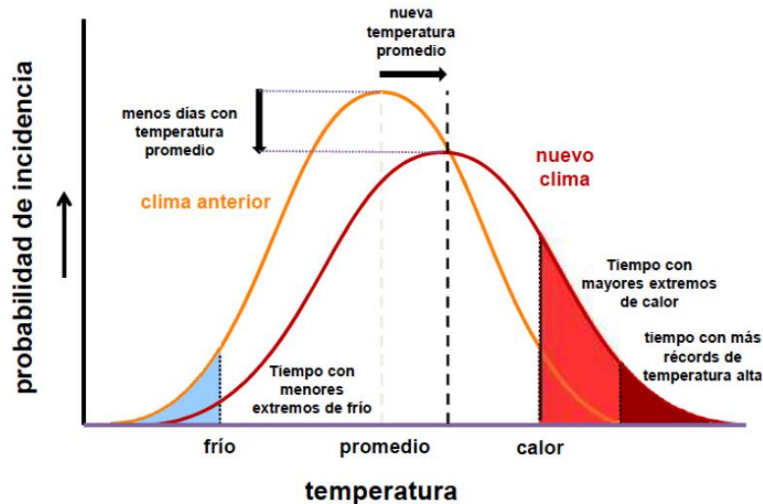


Figura 4. Cambios en el promedio y variabilidad de temperaturas. Fuente: Neri & Andulce (2012) adaptado de IPCC (2007).

En el Sexto Reporte del IPCC (IPCC-AR6-WG1, 2021) se menciona que los extremos cálidos (incluyendo olas de calor) se han vuelto más frecuentes e intensos sobre las regiones terrestres desde el año 1950. Por otro lado, los extremos fríos se han vuelto menos frecuentes y menos severos. Además, existe una alta confianza que el cambio climático inducido por el ser humano es el principal factor de estos cambios. En lo que respecta a los extremos de precipitación, la intensidad y la frecuencia de estos eventos se han incrementado desde 1950 sobre las áreas terrestres con una alta confianza, siendo probablemente el cambio climático inducido por el ser humano el principal factor. Asimismo, las sequías agrícola y ecológica en algunas regiones han presentado incrementos debido al aumento de la evapotranspiración terrestre.

La Figura 5 muestra resultados del IPCC-AR6-WG1 (2021) sobre Sudamérica y América Central para cuatro índices de extremos y considerando tres niveles de calentamiento global. Se aprecia un evidente incremento de las temperaturas máximas anuales sobre Sudamérica, siendo este cambio mayor en la Amazonia. La precipitación máxima en 5 días presenta cambios con incrementos en la región noroccidental y suroriental de Sudamérica y disminuciones en la región central de Chile. Siendo estos valores más intensos para un escenario de calentamiento de 4°C.

En relación a los días secos consecutivos se aprecian incrementos en la Amazonía oriental y reducción en la región occidental sobre la costa de Perú y norte de Chile.

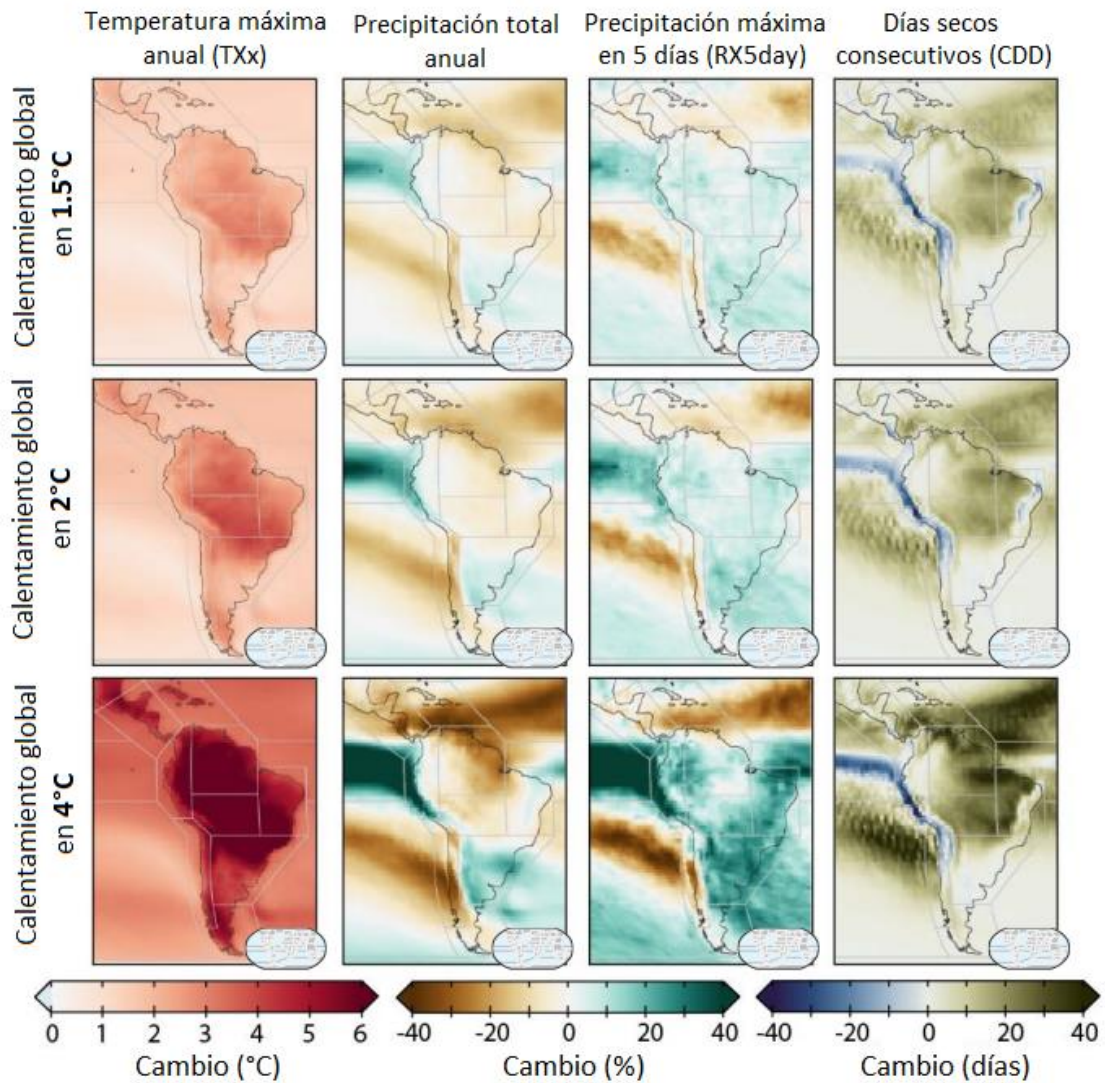


Figura 5. Cambios futuros en los extremos de precipitación y temperaturas sobre Sudamérica. Fuente: Adaptado de IPCC-AR6-WG1 (2021).

III. MATERIALES Y METODOLOGÍA

3.1. Área de estudio

El área de estudio comprende el territorio peruano el cual está localizado en la parte occidental de América del Sur y cuenta con una superficie total de 1, 285, 215.9 km². A lo largo del territorio cruza la Cordillera de los Andes el cual le otorga una variedad de climas, habiendo un total de 38 tipos de clima (SENAMHI, 2020) que son resultados de la combinación entre factores y elementos climáticos (García, 1994), donde tiene un rol fundamental su ubicación en la zona tropical. Entre los climas que cuentan con mayor extensión destacan el árido y templado en costa, lluvioso y frío en la sierra y muy lluvioso y cálido en la selva. Para propósitos del presente estudio se ha empleado la sectorización climática definida por SENAMHI (2020) y mostrado en la Figura 6.



Figura 6. Mapa topográfico de Perú y delimitación de sectores climáticos según SENAMHI (2021) usados para el presente estudio. Fuente: elaboración propia.

3.2. Datos empleados

El análisis de los cambios en los extremos asociado al cambio climático involucra el uso de información de modelos de circulación general, pero con una óptima resolución que permita realizar un análisis local. Es por ello que para el presente estudio se ha empleado un conjunto de datos de escenarios a partir de tres GCM que considera un escenario de altas emisiones de la Ruta de Concentración Representativa 8.5. Estos datos pasaron por un proceso de regionalización usando el modelo climático regional WRF³. La información generada pasó por un proceso de corrección del error sistemático basado en el método de Linear Scaling (Mekonnen *et al.*, 2019) usando como referencia la base de datos PISCO. Posteriormente, se aplica el proceso de reducción de escala de tipo geostadística con lo cual se obtuvieron datos a 5km de resolución espacial (Figura 7). Todo el proceso de la regionalización mediante WRF, corrección y reducción de escala fue realizada por la Subdirección de Modelamiento Numérico de la Atmósfera en el marco del proyecto Apoyo a la Gestión del Cambio Climático – Fase 2 (SENAMHI,2021). Las características de esta información se encuentran detalladas en la tabla 1.

Tabla 1. Características sobre información de escenarios climáticos usados en el presente estudio. Fuente: Elaboración propia.

GCM	Institución	Resolución	Modelo Regional SENAMHI	Resolución espacial a reducción escala	Periodo de información
MPI-ESM-LR	Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M)	1.8°x1.8°	WRF	5 km.	Histórico: 1981-2005 RCP 8.5: 2006-2065
HadGEM2-ES	Met Office Hadley Centre	1.2°x1.9°	WRF	5 km.	Histórico: 1981-2005 RCP 8.5: 2006-2065
ACCESS1-0	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO)	1.25°x 1.875°	WRF	5 km.	Histórico: 1981-2005 RCP 8.5: 2006-2065

³ Weather Research and Forecasting Model

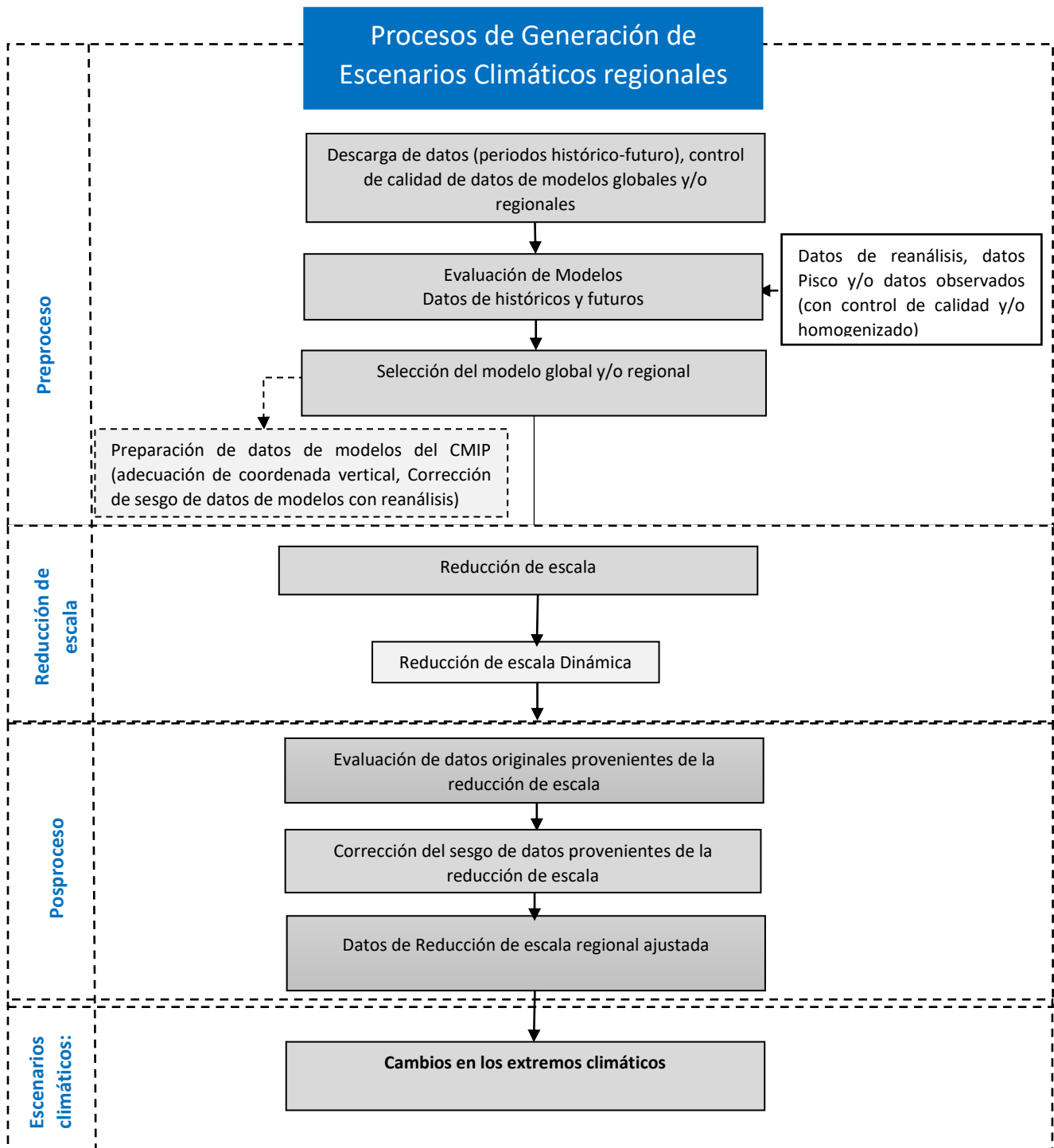


Figura 7. Procesos conducentes para la generación de datos Escenarios Climáticos y estimación de los Cambios en los extremos climáticos a futuro en el presente estudio. Fuente: SENAMHI/DAA, 2021.

3.3. Metodología

a) Estimación de índices de extremos

El análisis de extremos climáticos se ha basado en el cálculo de índices que permitan caracterizar estos eventos en términos de frecuencia, así como en intensidad. El Grupo de Expertos en Detección e Índices de Cambio Climático (ETCCDI⁴), ha venido impulsando a escala global el cálculo índice de extremos climáticos los cuales son usados ampliamente a nivel internacional para estudios de cambio climático. Estos índices se basan en utilizar variables observadas tales como precipitación, temperaturas máximas y temperaturas mínimas para calcular el número o porcentaje de eventos ocurridos en un tiempo determinado. Asimismo, estos índices han sido extensamente aplicados para el análisis de cambios en los extremos climáticos en escenarios climáticos futuros (ejemplos: Orłowsky & Senevirante, 2012; Chen et al. 2014; Eum & Canon, 2016).

Los índices empleados en el presente estudio se encuentran en la tabla 2, los cuales son considerados los más relevantes para obtener un buen panorama de los cambios en los extremos a nivel nacional.

El cálculo de estos índices fue realizado para cada modelo por separado a nivel anual y en el periodo 1981-2065. Adicionalmente, se promediaron los valores de los índices de los tres modelos con el fin de obtener series promedio representativos para el conjunto de los tres modelos. Por otro lado, para los índices que requieren de la estimación de umbrales basados en percentiles como son por ejemplo el Tx90p y Tx10p, sus umbrales fueron estimados en el periodo considerando el periodo histórico 1981-2005.

⁴ Mayor información del grupo, así como también más detalles de los índices se puede encontrar en: <http://etccdi.pacificclimate.org/>

Tabla 2. Índices de extremos determinados en el presente estudio. Fuente: Elaboración propia.

Variable utilizada para el cálculo	Siglas de índice	Nombre del índice	Definición	Unidades de tendencia	Tipo de índice
Temperatura	TN10p	Noches frías	Porcentaje de días en los que TN (temperatura mínima) <10 ^{mo} percentil	%	Frecuencia
	TX10p	Días fríos	Porcentaje de días en los que TX (temperatura máxima) <10 ^{mo} percentil	%	
	TN90p	Noches cálidas	Porcentaje de días en los que TN >90 ^{avo} percentil	%	
	TX90p	Días cálidos	Porcentaje de días en los que TX >90 ^{avo} percentil	%	
	FDO	Días con heladas	Conteo anual de días en los que TN (temperatura mínima diaria) < 0°C	días	Duración
	CSDI	Duración de periodos fríos	Conteo anual de días con al menos 6 días en los que TN <10 ^{mo} percentil	días	
	WSDI	Duración de periodos cálidos	Conteo anual de días con al menos 6 días en los que TX >90 ^{avo} percentil	días	
	TXx	Valor máximo de la temperatura máxima diaria	Valor máximo mensual o anual de la temperatura máxima diaria	°C	Intensidad
	TXn	Valor mínimo de la temperatura máxima diaria	Valor mínimo mensual o anual de la temperatura máxima diaria	°C	
	TNx	Valor máximo de la temperatura mínima diaria	Valor máximo mensual o anual de la temperatura mínima diaria	°C	
TNn	Valor mínimo de la temperatura mínima diaria	Valor mínimo mensual o anual de la temperatura mínima diaria	°C		
Precipitación	CDD	Días secos consecutivos	Máximo número de días consecutivos RR<1 mm	días	Duración
	CWD	Días húmedos consecutivos	Máximo número de días consecutivos con RR>=1 mm	días	
	R10	Número de días con precipitación intensa	Número de días con RR>=10 mm	días	Frecuencia
	R20	Número de días con precipitación muy intensa	Número de días con RR>=20 mm	días	
	SDII	Índice simple de intensidad diaria	Precipitación total anual dividida entre el número de días húmedos (definidos como PRCP>=1 mm) en un año	mm/día	Intensidad
	R95p	Días muy húmedos	Total anual de PRCP cuando RR>95^{avo} percentil	mm	
	R99p	Días extremadamente húmedos	Total anual de PRCP cuando RR>99^{avo} percentil	mm	
	PRCPTOT	Precipitación total de los días húmedos en un año	Total anual de PRCP en días húmedos (RR>=1mm)	mm	
	RX1day	Precipitación máxima acumulada en un día	Máximo de precipitación en 1 día	mm	
	RX5day	Precipitación máxima acumulada en cinco días	Máximo de precipitación en 5 días	mm	
RX7day	Precipitación máxima acumulada en siete días	Máximo de precipitación en 7 días	mm		

b) Estimación de cambios a futuro de índices de extremos

El análisis futuro de los índices de extremos se estimó a través del método delta (Raisanen, 2007), el cual consistió en estimar los cambios de los valores promedios de los índices de extremos proyectados en el período 2036-2065 con respecto al periodo base 1981-2005. Los valores positivos son indicadores de aumento de las variables señaladas, mientras que los valores negativos indican disminución. Para una mayor simplicidad en el análisis de los resultados, se expresaron los cambios en términos porcentuales en todos los índices, a excepción de los índices de extremos absolutos de temperaturas (TXx, TXn, TNn y TNx) los cuales fueron expresados en °C y los índices de periodos de temperaturas extremas (WSDI y CSDI) los cuales se mantuvieron en sus unidades originales de días. La formulación matemática es expresada en la ecuación 1 para cambios porcentual y en la ecuación 2 para cambios absolutos. Estos cálculos fueron realizados para los índices estimados de cada modelo, así como también para las series promedios de los tres modelos para cada índice.

$$\Delta Ind(\%) = \left(\frac{\overline{Ind}_{2036-2065} - \overline{Ind}_{1981-2005}}{\overline{Ind}_{1981-2005}} \right) \times 100\% \quad \dots\dots (1)$$

De donde:

$\Delta Ind (\%)$ = Cambio porcentual del índice en el periodo 2065-2065 con respecto al periodo 1981-2005.

$\overline{Ind}_{2036-2065}$ = Promedio de los valores del índice en el periodo 2036-2065.

$\overline{Ind}_{1981-2005}$ = Promedio de los valores del índice en el periodo de referencia 1981-2005.

$$\Delta Ind = \overline{Ind}_{2036-2065} - \overline{Ind}_{1981-2005} \quad \dots\dots (2)$$

ΔInd = Cambio del índice en sus unidades originales para el periodo 2036-2065 con respecto al periodo 1981-2005.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Cambios de extremos de precipitación.

La Figura 8 muestra los mapas de cambios a nivel anual de los índices de extremos de precipitación para el periodo 2036-2065 tomando como referencia el periodo 1981-2005. Los resultados de frecuencia (CDD, CWD, R10 y R20) para la costa norte indican un incremento en los días húmedos consecutivos y en el número de días con precipitaciones intensas (R10) así como muy intensas (R20). En la costa sur también se presentan incrementos de los días húmedos consecutivos en las zonas bajas de Arequipa y Moquegua. El incremento en las frecuencias de las precipitaciones para la costa norte y sur se ve acompañado de mayores intensidades de precipitaciones. Los resultados de los índices relacionados a intensidad como son el PRCPTOT, RX1DAY, SDII y R95PTOT proyectan incrementos en las intensidades de precipitaciones extremas para la costa norte del país, siendo estos cambios en los índices mayores al 20%. Por su parte, la costa sur cuenta con aumentos en las intensidades diarias (SDII).

En relación a los Andes, se evidencia reducciones sobre la vertiente oriental y en la sierra norte los periodos de días húmedos consecutivos (CWD), pero acompañado de aumentos en la frecuencia de días con precipitaciones intensas (R10) y muy intensas (R20). Asimismo, además de la frecuencia, las intensidades de precipitaciones incrementarían en zonas de Apurímac, Cusco y Puno, especialmente en los acumulados de precipitación durante los días húmedos (R95pTOT) y muy húmedos (R99PTOT) con valores de incremento mayores al 50% en ambos índices. Por el contrario, la vertiente occidental cuenta con reducciones en la frecuencia de días con precipitaciones intensas (R10) y muy intensas (R20), sobre todo en las regiones de Ayacucho, Arequipa, Moquegua y Tacna. Dichas regiones, además, presentarían reducciones de las precipitaciones totales durante los días húmedos (PRCPTOT).

En lo que respecta a la Amazonia, los cambios proyectados indican reducciones consistentes de los días húmedos consecutivos y en la frecuencia de días con precipitaciones intensas (R10) y muy intensas (R20) sobre las regiones de la selva centro y sur. La selva norte no cuenta con una señal clara de cambio sobre todo en la zona noroeste de Loreto. En cuanto a los índices de intensidades de precipitaciones, se presentan reducciones de las precipitaciones en los días húmedos (R95PTOT) en la selva central y parte de selva norte y sur. Los demás índices indican resultados variados y que se encuentran en el rango de $\pm 20\%$ por lo cual no permite identificar una señal clara de cambio en esta región.

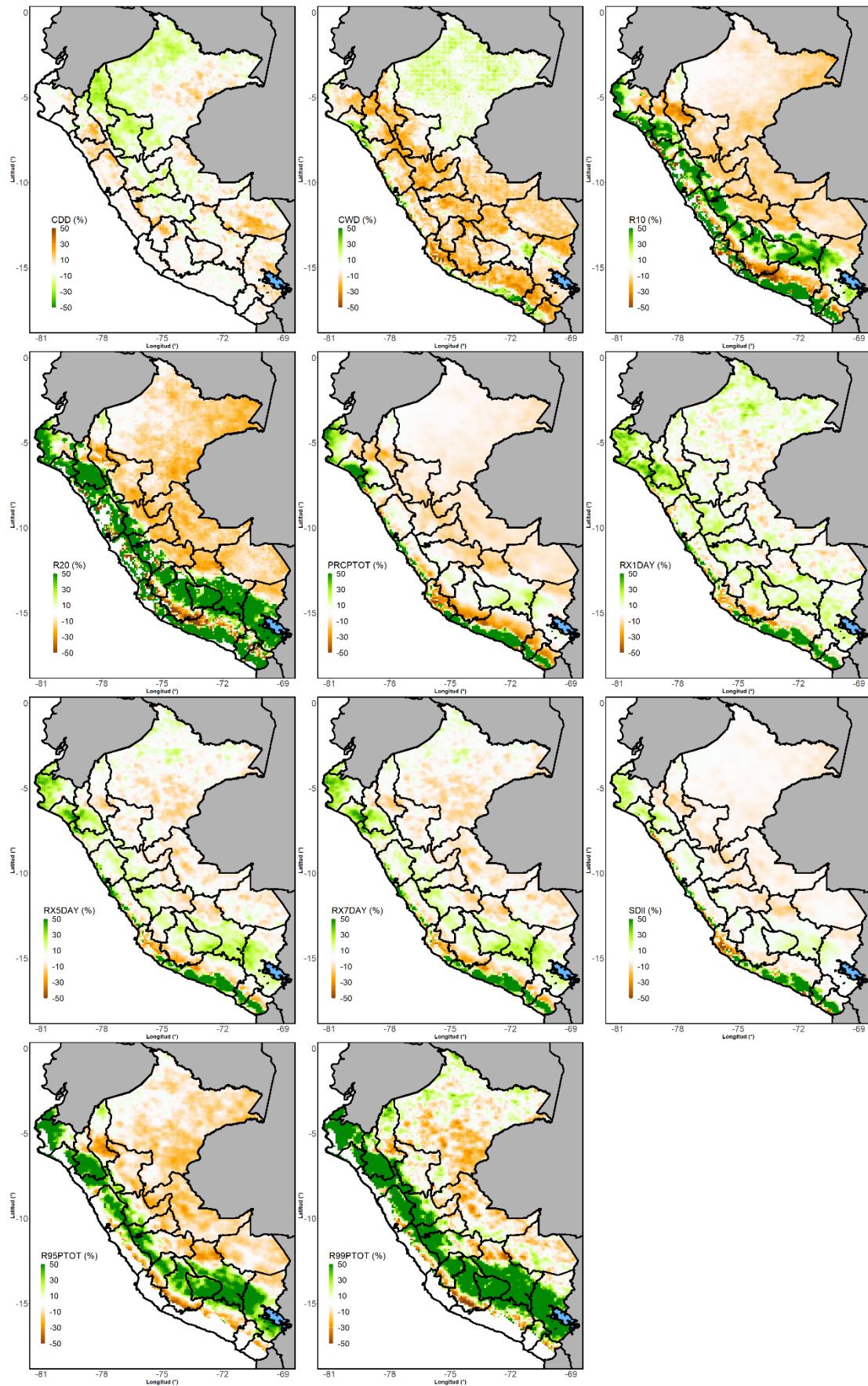


Figura 8. Cambios anuales en el periodo 2036-2065 con respecto al periodo 1981-2005 para índices de extremos de precipitación. Promedio de los tres modelos. Fuente: elaboración propia.

4.2. Cambios de extremos de temperaturas máximas y mínimas.

En la Figura 9 se aprecian los cambios anuales promedio para el periodo 2036-2065 de los índices de temperaturas máximas y mínimas. Para la Costa se aprecia que los valores más extremos de temperaturas máximas y mínimas al año (TXx, TXn, TNx y TNn) aumentan en más de un grado en toda la región. Estos aumentos serían más bajos en la costa norte para los índices de TXx y TXn, lo cual estaría asociado al incremento de las precipitaciones y nubosidad en la región y que atenuarían estos aumentos. Por otro lado, los días cálidos (TX90p) y noches cálidas (TN90p) también cuentan con aumentos en toda la región siendo menor en el sector de la costa norte. Por el contrario, las noches frías (TN10p) y días fríos (TX10p) presentan consistentes disminuciones, siendo estas más intensas en la costa central y sur.

En los Andes, las proyecciones indican aumentos en los valores más extremos de temperaturas en toda la región, siendo estos mayores a +2°C. Los aumentos más intensos se muestran en la vertiente occidental de la sierra sur para el índice de temperatura mínima más baja (TNn), en donde los aumentos superan los valores de +4°C y que estaría asociado a la disminución de precipitación y nubosidad. Asimismo, la región andina es donde se proyectan los mayores aumentos en los días cálidos (en más de 50%) así como también en el periodo consecutivo de días cálidos (WSDI). Se aprecian también aumentos de las noches cálidas y consistentes disminuciones de los días fríos y noches frías. Es importante mencionar también que la frecuencia de heladas al año (FD) presentarían disminuciones a lo largo de la región andina centro y sur, siendo estos valores de disminución menores a -50% en la sierra central.

En cuanto a la Amazonia, se observa un aumento de los valores extremos de temperaturas siendo más destacado los cambios de temperatura máxima (TXx) en más de 3°C para los sectores selva centro y sur del país. Por su parte, las noches cálidas y días cálidos cuentan también con aumentos en toda la región, mientras que los días fríos y noches frías presentan disminuciones en el rango de -5% a -20%.

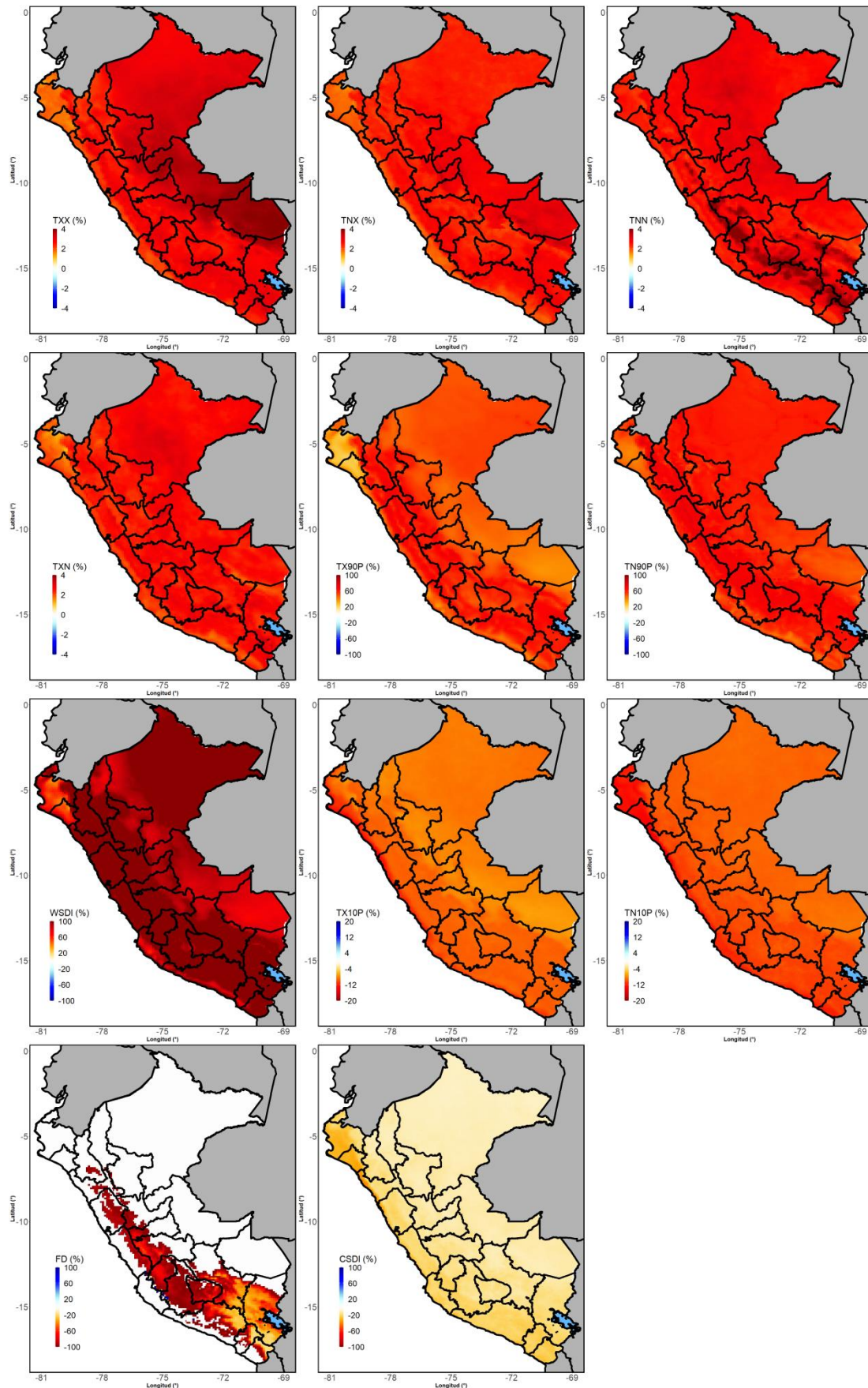


Figura 9. Cambios anuales en el periodo 2036-2065 con respecto al periodo 1981-2005 para índices de extremos de temperaturas. Promedio de los tres modelos. Fuente: elaboración propia.

4.3. Incertidumbre asociada a los cambios de extremos.

La Figura 10 muestra los cambios futuros de los índices de frecuencia de precipitación en base a cada modelo empleado y los promedios por cada sector climático delimitado por SENAMHI (2020). El orden de los sectores es de costa a selva (de izquierda a derecha). Los sectores correspondientes a la costa presentan valores promedios cercanos a cero en los días secos consecutivos y húmedos consecutivos lo cual indicarían que no existe una señal definida de cambios en estos índices. En relación al índice de precipitaciones intensas (R10) se aprecia que para los tres modelos y en toda la costa cambios con incrementos, siendo el modelo ACCES1-0 el cual presenta magnitudes más intensas. Si bien es cierto que en promedio para los sectores de la costa los modelos presentan incrementos en R10, hay que tener en cuenta que existen sectores en la costa donde no se presenta la ocurrencia de estos eventos como se puede observar en la Figura 7. En las costas de Tacna, Arequipa, Ica, Lima y Ancash no cuentan con información de estos eventos por la misma aridez de la región.

En los sectores de la sierra se aprecia que los modelos ACCESS1-0 y MPI-ESM-LR proyectan incrementos de los días secos consecutivos, mientras que el modelo HadGEM2-ES proyecta reducciones. En el caso de los días húmedos consecutivos, los tres modelos coinciden en para la mayoría de los sectores, mientras que en el índice R10 se aprecian incrementos en la sierra sur oriental por parte de dos modelos.

En los sectores de la selva, los tres modelos coinciden en reducciones de los días secos consecutivos para selva alta norte; sin embargo, en los demás sectores existen discrepancias en cuanto a la señal, dado que el modelo HadGEM2-ES presenta reducciones y los demás modelos cuentan con incrementos. Estos resultados indicarían que para este índice existe incertidumbre y no se puede establecer una señal clara de cambio. Caso contrario, ocurre con el índice de días húmedos consecutivos, ya que los tres modelos concuerdan con reducciones de los días húmedos en todos los sectores de la selva, a excepción de la selva norte baja. Caso similar ocurre con la frecuencia de días con precipitaciones intensas (R10) en el que los tres modelos proyectan reducciones en estos eventos para la selva.

Respecto a los índices relacionados a intensidades de precipitación (Figura 11) se aprecia que la costa norte es el único sector en el que los tres modelos proyectan incrementos en todos estos índices, por lo que se puede inferir que en este sector se proyectan incrementos en las intensidades y acumulados de precipitaciones extremas. En el caso de la costa centro y sur se presentan aun discrepancias entre los modelos, siendo más amplia la diferencia de resultados en la costa sur.

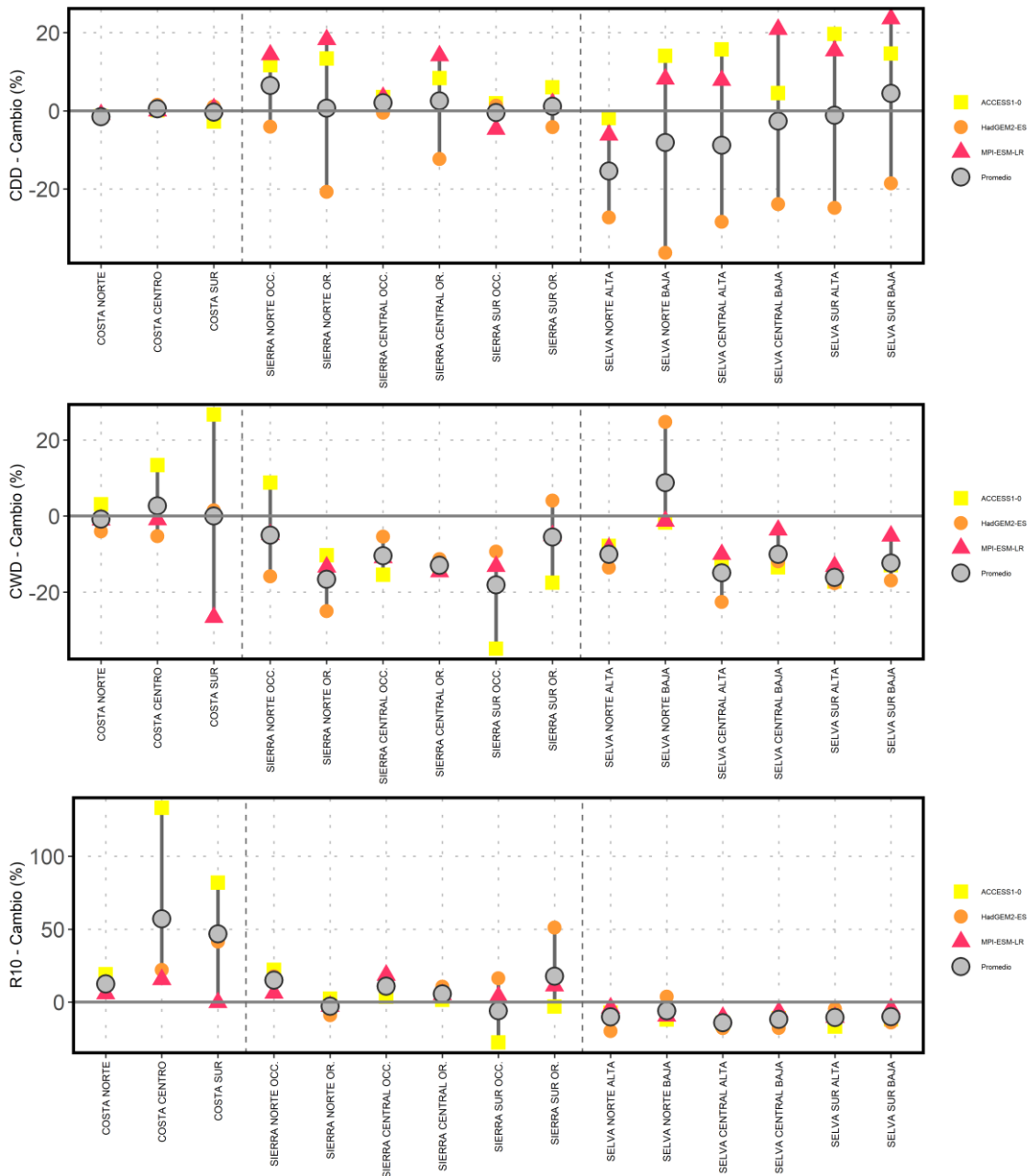


Figura 10. Cambios de índices de extremos de frecuencias de precipitación (de arriba abajo: CDD, CWD, R10 y R20) para los tres modelos. Las líneas continuas indican el rango de valores de los tres modelos. Los resultados son promedios para cada sector climático. Fuente: elaboración propia.

En los sectores de la sierra, los tres modelos sugieren incrementos en el índice RX1day en todos los sectores a excepción de la sierra central occidental y sierra sur occidental. De igual forma, existe también un consenso de incremento del índice R95PTOT en todos los sectores a excepción de la sierra sur occidental.

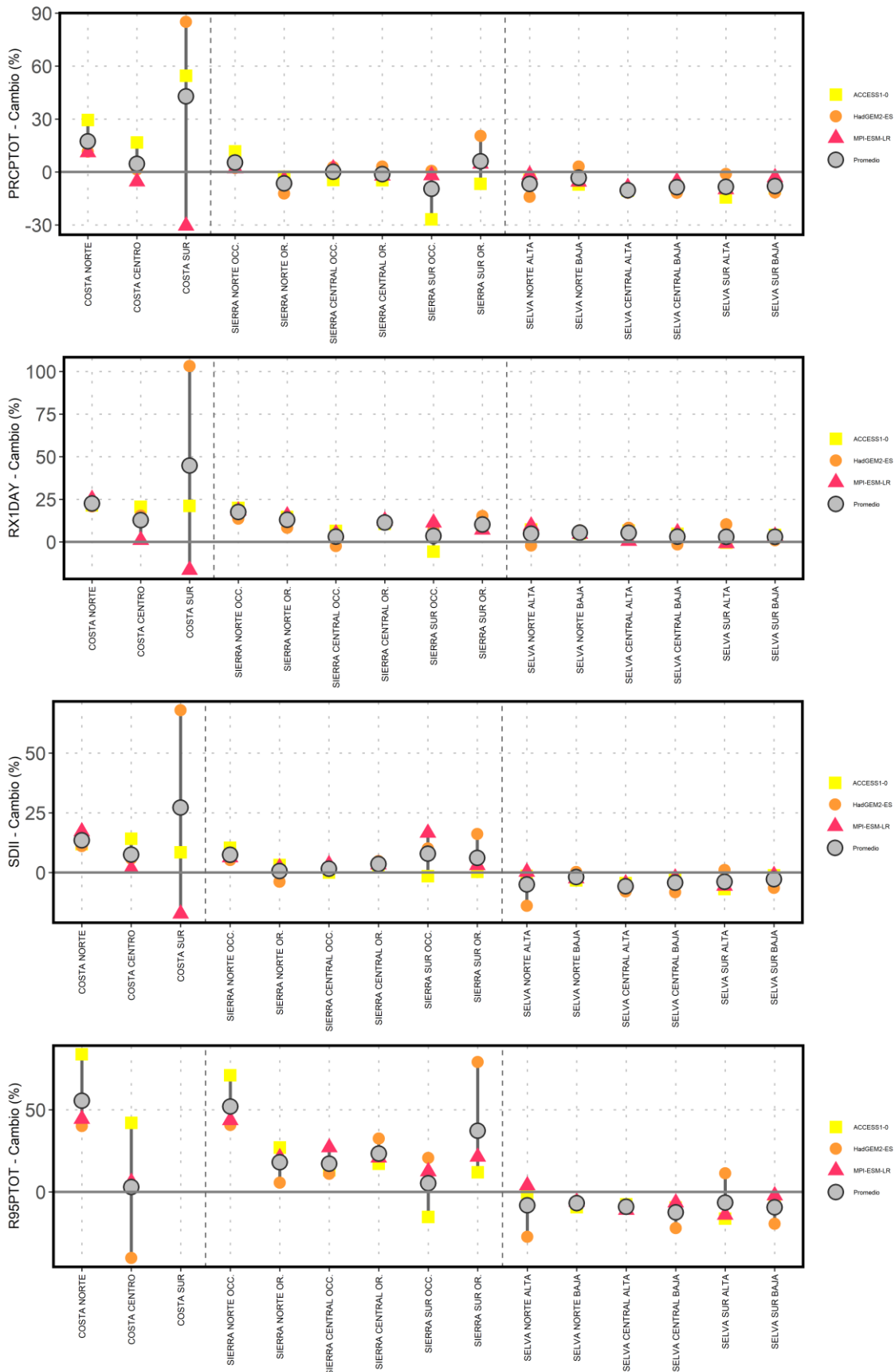


Figura 11. Cambios de índices de extremos de intensidad de precipitación (de arriba a abajo: PRCPTOT, RX1day, SDII y R95pTOT) para los tres modelos. Las líneas continuas indican el rango de valores de los tres modelos. Los resultados son promedios para cada sector climático. Fuente: elaboración propia.

En los sectores de la selva, los modelos indican reducciones del índice PRCPTOT en casi todos los sectores, pero con valores cercanos a cero. Los resultados para el índice RX1day presentan incrementos menores a +10%; mientras que para los índices SDII y R95PTOT los cambios proyectados indican reducciones menores a -20% para los tres modelos. En consecuencia, no se puede definir una señal clara de cambio en las intensidades de extremos de precipitación.

La Figura 12 presenta los resultados de los cambios promedios de los índices relacionados a temperaturas para cada sector climático. De manera general se aprecia que, en todos los casos, los tres modelos concuerdan en las señales de cambios de cada índice, por lo que la incertidumbre en estos resultados es menor. Los resultados de la costa indican coherentes disminuciones de los días fríos y noches frías, siendo el modelo HadGEM2-ES el que tiene las disminuciones más intensas (menores a -10%). Por el contrario, las noches cálidas y días cálidos estarían en aumento, siendo los valores de cambio más atenuados en la costa norte. En la mayoría de los casos, es el modelo HadGEM2-ES el que cuenta con los mayores calentamientos, mientras que el modelo MPI-ESM-LR tiene los menores.

Los resultados para los Andes muestran disminuciones de los días fríos y noches frías con valores de cambio muy próximos a -10% para los tres modelos empleados. En el caso de las noches cálidas y días cálidos los modelos indican un coherente aumento en todos los sectores de esta región; además, dichos aumentos son mayores a los que se presentan en la costa y Amazonia. Por lo tanto, se puede inferir que los Andes estarían sujetos a los mayores cambios de noches cálidas y días cálidos a comparación de la Costa y Amazonia.

Por último, los resultados para la selva cuentan con disminuciones de las noches frías y días con valores en el rango -10% a -9% aproximadamente para los tres modelos empleados. Por otro lado, las noches cálidas cuentan con cambios mayores a +40% siendo los valores más bajos en la selva sur baja. Similares resultados se muestran para los días cálidos, en el cual los cambios son mayores a +30% siendo el modelo MPI-ESM-LR el que cuenta con los valores más bajos, y el modelo HadGEM2-ES el que tiene los mayores cambios.

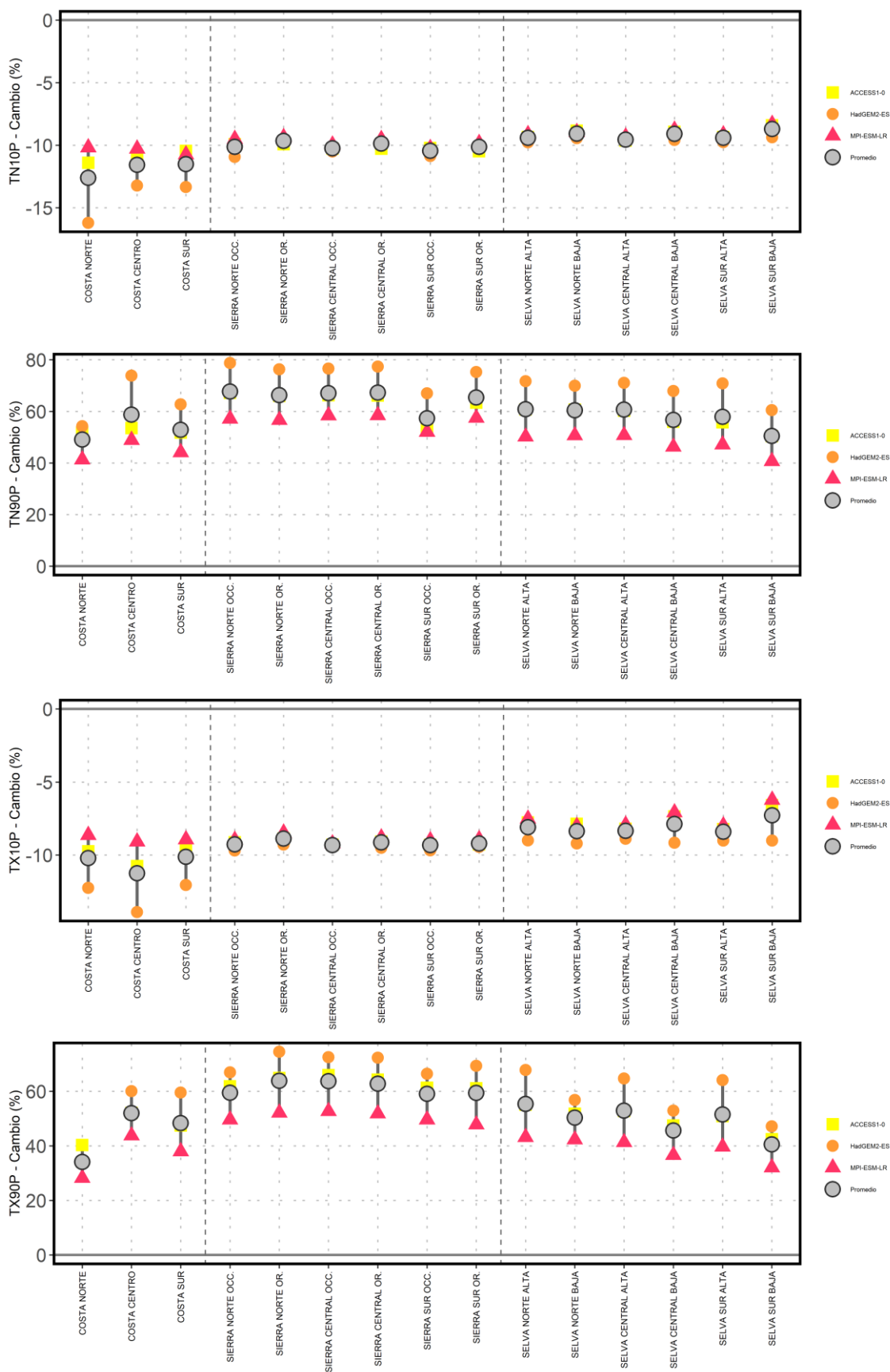


Figura 12. Cambios de índices de extremos relacionados a temperaturas (de arriba a abajo: TN10p, TN90p, TX10p y TX90p) para los tres modelos empleados. Las líneas continuas indican el rango de valores de los tres modelos. Los resultados son promedios para cada sector climático. Fuente: elaboración propia.

4.4. Cambios de extremos anuales por sector climático.

A manera de resumen, las Tablas 3 y 4 presentan los valores de cambios para los índices de precipitación y temperaturas respectivamente, promediados para cada sector climático. En la tabla 3, los valores sombreados en color rojo indican cambios promedios mayores a +10% y en el que los tres modelos tengan valores positivos; mientras que las celdas de color celeste indican disminuciones en -10% y valores negativos en los tres modelos. Bajo estos resultados, la costa norte presenta incrementos principalmente en los índices de intensidades de precipitación y que coinciden en los tres modelos. A su vez también, la costa centro presenta incrementos en los índices de acumulados máximos en 1 día, 5 días y 7 días (RX1day, RX5day, RX7day).

En relación a la sierra norte occidental y central occidental se presentan incrementos en los índices R10, R20, R95pTOT y R99pTOT; mientras que en la sierra oriental se aprecian aumentos en R95pTOT, R99pTOT y RX1Day. La sierra sur oriental cuenta con incrementos en la mayoría de los índices.

En relación a los sectores de la selva, se aprecian principalmente disminuciones menores a -10% en los índices relacionados a la frecuencia como son el CWD, R10 y R20. En lo que respecta a los demás índices, estos no presentan considerables cambios y además no existe consensos en los modelos.

Los cambios de los índices de temperatura (tabla 4) indican que hay consenso de los tres modelos en lo que respecta a las señales de cambios. Los índices asociados a extremos cálidos como son TX90p, TN90p, WSDI, TXX, TXN, TNX y TNN cuentan con aumentos en todos los sectores. Los índices asociados a extremos fríos como son TX10p, TN10p, CSDI y FD presentan consistentes disminuciones.

Tabla 3. Cambios promedios de los índices de extremos de precipitación. Las celdas rojas indican cambios promedios mayores a 10% y además incremento en los tres modelos. Las celdas azules indican cambios promedios menores a -10% y reducciones en los tres modelos. (*) Celdas gris claro indican que no hay cambios del índice en el futuro. Fuente: elaboración propia.

Regiones	Sectores climáticos	CDD (días)	CWD (días)	PRCPTOT (mm)	R10 (días)	R20 (días)	R95PTOT (mm)	R99PTOT (mm)	RX1DAY (mm)	RX5DAY (mm)	RX7DAY (mm)	SDII (mm/día)
Costa	COSTA NORTE	-1.5	-0.8	17.4	12.4	22.7	55.5	112.0	22.6	21.0	20.7	13.5
	COSTA CENTRO	0.5	2.7	4.6	57.1	286.2	2.9	55.1	12.8	14.5	14.0	7.5
	COSTA SUR	-0.4	0.0	42.9	46.8	155.6			44.8	39.3	38.0	27.2
	SIERRA NORTE OCCIDENTAL	6.5	-5.0	5.3	15.0	45.6	52.0	122.9	17.6	14.3	12.8	7.4
Andes	SIERRA NORTE ORIENTAL	0.7	-16.6	-6.5	-2.8	11.7	18.1	57.9	13.0	6.6	5.0	0.6
	SIERRA CENTRAL OCCIDENTAL	2.1	-10.4	0.0	10.9	21.3	17.2	36.6	3.1	3.8	3.4	1.6
	SIERRA CENTRAL ORIENTAL	2.6	-13.0	-1.2	5.7	6.1	23.3	58.6	11.3	9.9	9.0	3.6
	SIERRA SUR OCCIDENTAL	-0.4	-18.1	-9.6	-6.0	13.1	5.3	26.3	3.5	2.2	0.5	7.8
	SIERRA SUR ORIENTAL	1.2	-5.5	6.1	17.7	30.1	37.2	72.0	10.3	13.2	12.6	6.2
Amazonia	SELVA NORTE ALTA	-15.4	-10.1	-6.8	-10.1	-12.0	-8.1	3.9	4.8	-0.8	-2.0	-5.0
	SELVA NORTE BAJA	-8.1	8.8	-3.3	-6.0	-9.6	-6.9	0.2	5.4	0.2	-1.1	-1.9
	SELVA CENTRAL ALTA	-8.8	-14.9	-10.4	-14.2	-16.4	-9.0	6.8	5.3	-1.0	-2.4	-5.8
	SELVA CENTRAL BAJA	-2.6	-10.0	-8.6	-11.8	-15.2	-12.5	-4.1	3.1	-2.9	-4.2	-4.3
	SELVA SUR ALTA	-1.1	-16.1	-8.5	-10.6	-12.4	-6.5	6.8	2.9	-1.1	-1.7	-3.8
	SELVA SUR BAJA	4.5	-12.3	-8.0	-10.0	-12.3	-9.4	0.3	2.9	-0.8	-2.1	-2.8

Tabla 4. Cambios promedios de los índices de extremos de temperaturas. Las celdas rojas indican aumentos en los tres modelos. Las celdas en azul disminuciones en los tres modelos. Fuente: elaboración propia. (**) Celdas gris oscura indican que el índice no aplica en el sector climático.

Regiones	Sectores climáticos	TX90P (%)	TX10P (%)	TN90P (%)	TN10P (%)	WSDI (días)	CSDI (días)	TXX (°C)	TXN (°C)	TNX (°C)	TNN (°C)	FD0 (días)
Costa	COSTA NORTE	34.1	-10.2	49.1	-12.6	113.5	-27.0	1.8	1.9	1.9	2.4	
	COSTA CENTRO	52.0	-11.2	58.7	-11.6	186.7	-22.9	2.1	2.2	2.0	2.3	
	COSTA SUR	48.3	-10.1	52.9	-11.5	173.6	-22.0	2.2	2.1	1.9	2.4	
	SIERRA NORTE OCCIDENTAL	59.4	-9.3	67.7	-10.1	220.5	-16.7	2.6	2.4	2.4	2.6	-94.4
Andes	SIERRA NORTE ORIENTAL	63.8	-8.9	66.3	-9.7	239.6	-13.4	2.4	2.5	2.3	2.6	-95.5
	SIERRA CENTRAL OCCIDENTAL	63.7	-9.3	67.1	-10.3	240.6	-18.5	2.7	2.6	2.6	2.8	-82.7
	SIERRA CENTRAL ORIENTAL	62.8	-9.1	67.3	-9.9	235.0	-14.7	2.7	2.5	2.5	3.0	-73.2
	SIERRA SUR OCCIDENTAL	59.1	-9.3	57.4	-10.4	221.1	-20.2	2.8	2.6	2.6	3.2	-36.9
	SIERRA SUR ORIENTAL	59.4	-9.2	65.4	-10.1	220.6	-15.9	2.7	2.6	2.5	3.1	-45.1
Amazonia	SELVA NORTE ALTA	55.4	-8.1	60.8	-9.4	199.0	-11.7	2.8	2.4	2.4	2.7	
	SELVA NORTE BAJA	50.3	-8.4	60.4	-9.1	180.1	-10.2	3.1	2.7	2.4	2.8	
	SELVA CENTRAL ALTA	52.9	-8.3	60.7	-9.6	189.2	-13.1	3.1	2.6	2.6	2.7	
	SELVA CENTRAL BAJA	45.7	-7.9	56.7	-9.1	156.6	-11.7	3.6	2.7	2.8	2.9	
	SELVA SUR ALTA	51.5	-8.4	57.9	-9.4	185.8	-13.4	3.2	2.4	2.6	2.4	
	SELVA SUR BAJA	40.5	-7.3	50.5	-8.7	136.1	-11.4	3.9	2.5	3.0	2.5	

V. CONCLUSIONES

Los cambios en los índices extremos de precipitación y temperatura en el periodo 2036-2065 relativo a 1981-2005, centrado en el año 2050. Estos índices fueron estimados a partir de tres modelos regionalizados (SENAMHI,20121) que considera el escenario de alta emisión de gases de efecto invernadero, siendo los resultados los siguientes:

a) Índice de extremos de precipitación

- En la costa norte se ha encontrado incrementos tanto en la frecuencia como en intensidad de la precipitación al 2050, lo cual es consistente por los tres modelos empleados. En las costas centro y sur, los promedios indican incrementos en frecuencia e intensidad. Sin embargo, son dos de los tres modelos que muestran dichos incrementos.
- En los andes, los cambios son de incrementos de la intensidad de precipitación principalmente en la sierra norte occidental, sobre todo en los índices de días muy húmedos (R95PTOT) y número de días con precipitaciones muy intensas (R20). En la sierra oriental se presentan incrementos los índices de intensidad y frecuencia, siendo más considerables estos cambios en la sierra sur oriental. Estos cambios son proyectados de forma consistente por los tres modelos analizados.
- En la Amazonia, se ha identificado la reducción de los días húmedos consecutivos y del número de días con precipitaciones intensas y muy intensas. Las reducciones de la intensidad de la precipitación son del 10% en promedio y caen dentro del rango de la variabilidad actual. Asimismo, todos los modelos empleados coinciden en sus proyecciones.

b) Índices de extremos de temperaturas

- En la costa se identifican incrementos de los índices de extremos de temperaturas en más de 1.5°, así como también en la frecuencia de las noches cálidas y días cálidos. En contraste, las noches frías y días fríos se encuentran en disminución. Todos estos cambios son más atenuados en la costa norte. Los cambios en índices de extremos de temperatura indican resultados consistentes por los tres modelos y en todos los índices.

- En los Andes, los cambios indican aumentos en la magnitud de los índices de extremos de temperaturas en más de 2°C, y a nivel país, es la que presenta aumentos mayores a 50% en la frecuencia de ocurrencia de noches cálidas y días cálidos. En contraste, la frecuencia de las noches frías y días fríos presentan disminución, y también los días con heladas que disminuyen en 45%.
- En la Amazonia, los incrementos de la magnitud de los extremos de las temperaturas son mayores a 3°C, principalmente para el índice de la temperatura máxima anual en la selva centro - sur. La frecuencia de las noches cálidas y días cálidos indican aumentos mayores al 40%, mientras que las noches frías y días fríos presentan disminuciones alrededor de 10%.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbasian, M., Moghim, S., & Abrishamchi, A. (2019). Performance of the general circulation models in simulating temperature and precipitation over Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 135(3–4), 1465–1483. <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2456-y>
- Chen H., Sun J., & Chen X. (2014). Projection and uncertainty analysis of global precipitation-related extremes using CMIP5 models. *Int. J. Climatol.* 34: 2730–2748, doi: 10.1002/joc.3871.
- Chen, H., & Sun, J. (2015). Changes in climate extreme events in China associated with warming. *International Journal of Climatology*, 35(10), 2735–2751. <https://doi.org/10.1002/joc.4168>
- Eum, H., & Cannon, A. (2017). Intercomparison of projected changes in climate extremes for South Korea: application of trend preserving statistical downscaling methods to the CMIP5 ensemble. *International Journal of Climatology*, 37(8), 3381–3397. <https://doi.org/10.1002/joc.4924>
- García, J. (1994). Principios físicos de climatología, Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Gettelman, A., & Rood, R. B. (2016). Simulating the Atmosphere. 61–85. https://doi.org/10.1007/978-3-662-48959-8_5
- Hillel, D., & Rosenzweig, C. (1989). The greenhouse effect and its implications regarding global agriculture. *Mass. Agric. Experiment Station*. 724.
- IPCC (2001): Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881pp.
- IPCC (2007) Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
- IPCC (2014) Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- IPCC. (2019). Calentamiento Global de 1,5 °C. In Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IPCC (2021) Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental

- Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
- Jahn, M. (2015). Economics of extreme weather events: Terminology and regional impact models. *Weather and Climate Extremes*, 10, 29–39.
<https://doi.org/10.1016/j.wace.2015.08.005>
- Kharin V., Zwiers F., Zhang X., & Hegerl G. (2007) Changes in temperature and precipitation extremes in the IPCC Ensemble of Global Coupled Model Simulations. *J Clim* 20:1419–1444.
<https://doi.org/10.1175/jcli4066.1>.
- Mekonnen, D., Moges, M., Mulat, A., & Shumitter, P. (2019). The impact of climate change on mean and extreme state of hydrological variables in Megech watershed, Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. In *Extreme Hydrology and Climate Variability: Monitoring, Modelling, Adaptation and Mitigation (Issue 2009)*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815998-9.00011-7>
- Neri, C. & Andulce, P. (2012). Importancia de la adaptación al cambio climático. Presentación realizada en Taller sobre el Índice de Utilidad de Prácticas de Adaptación (IUPA) 23-24 de Julio de 2012, Montevideo, Uruguay.
https://www.iai.int/admin/site/sites/default/files/uploads/Importancia_de_la_adaptacion_al_cambio_climatico.pdf
- Orlowsky B., & Seneviratne S. (2012). Global changes in extreme events: regional and seasonal dimension. *Climatic Change* 110, 669–696 (2012). <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0122-9>
- Raisanen, J. (2007). How reliable are climate models? *Tellus Series A - Dynamic Meteorology and Oceanography*. 59(1):2–29, DOI 10.1111/j.1600-0870. 2006.00211.x
- Ruela, R., Sousa, M., deCastro, M., & Dias, J.(2020). Global and regional evolution of sea surface temperature under climate change. *Global and Planetary Change*, 190(April), 103190.
<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2020.103190>
- Salman, S., Shahid, S., Ismail, T., Abd. Rahman, N., Wang, X., & Chun E. (2017). Unidirectional trends in daily rainfall extremes of Iraq. *Theoretical and applied climatology* 134, 1165–1177.
<https://doi.org/10.1007/s00704-017-2336-x>
- Salman, S., Nashwan, M., Ismail, T., & Shahid, S. (2020). Selection of CMIP5 general circulation model outputs of precipitation for peninsular Malaysia. *Hydrology Research*, 51(4), 781–798. <https://doi.org/10.2166/NH.2020.154>

- SENAMHI (2021). Escenarios climáticos al 2050 en el Perú: Cambios en clima promedio. Llacza A., Acuña D., Jácome G., De la Cruz G., Paredes J., Bruno J., Alvarez E., Flores W., Sulca S. Proyecto de Apoyo a la Gestión del Cambio Climático - Fase II.
- Seneviratne, S., Nicholls, Easterling, D., Goodess, C., Kanae, S., Kossin, J., Luo, Y., Marengo, J., McInnes, K., Rahimi, M., Reichstein, M., Sorteberg, A., Vera, C., & Zhang, X. (2012). Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment. In: *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, pp. 109-230.
- Shiru, M., Shahid, S., Alias, N., & Chung, E. (2018). Trend analysis of droughts during crop growing seasons of Nigeria. *Sustainability* 2018, 10(3), 871; <https://doi.org/10.3390/su10030871>
- Shiru, M. S., Shahid, S., Dewan, A., Chung, E. S., Alias, N., Ahmed, K., & Hassan, Q. K. (2020). Projection of meteorological droughts in Nigeria during growing seasons under climate change scenarios. *Scientific Reports*, 10(1), 1–18. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-67146-8>
- Xiao, D., Liu, D. L., Wang, B., Feng, P., Bai, H., & Tang, J. (2020). Climate change impact on yields and water use of wheat and maize in the North China Plain under future climate change scenarios. *Agricultural Water Management*, 238(April), 106238. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106238>
- Zhou, B., Xu, Y., Wu, J., Dong, S., & Shi, Y. (2016). Changes in temperature and precipitation extreme indices over China: Analysis of a high-resolution grid dataset. *International Journal of Climatology*, 36(3), 1051–1066. <https://doi.org/10.1002/joc.4400>
- Zorita, E., & von Storch, H. (1999). The Analog Method as a Simple Statistical Downscaling Technique: Comparison with More Complicated Methods, *Journal of Climate*, 12(8), 2474-2489. Retrieved Nov 4, 2021, from https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/12/8/1520-0442_1999_012_2474_tamaas_2.0.co_2.xml

VII. ANEXO:

Tabla 5. Rango de Variación de los índices de extremos climáticos proyectados 2036-2065 en el Perú resultado del Multimodelo

N	Índice	Unidad	DEF		MAM		JJA		SON		ANUAL	
			Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
1	CDD	días										
2	CWD	días	-6.0	2	-2.9	1.8	-1.0	0	-2	1	-5.5	3.0
3	FD	días	-2.7	0	-7.7	0	-9.8	0	-9.9	0	-0.1	-7.8
4	PRCPTOT	mm	<-90	48	-0.2	69	-0.4	47	-0	>90	<-90	>90
5	R10	Días	-3.4	1.1	-1.6	1.6	0	1	-1.4	0.9	-4.4	2.6
6	R20	Días	-1.8	0.8	-1.1	1.6	0	1	-0.8	0.2	-3.2	2.7
7	R95pTOT	mm	<-90	17	-38	30.6	0	18.7	-49.6	19.4	<-90	43.3
8	RX1day	mm	-2.8	23.8	-8.7	8.8	-1.0	11.7	-6.1	11.2	-6.7	15.9
9	RX5day	mm	-31	16.4	-9.4	9.2	-1.9	15.5	-18	7.2	-25.2	17.3
10	SDII	mm	-1.6	0.8	-0.8	1.2	-0.5	0.9	-0.9	0.7	-1.02	0.7
11	Tn10p	días	-1.0	0	-0.4	0	-1.0	0	-0.5	0	-0.5	0
12	Tn90p	días	4	20.6	8.5	22.2	6.6	19.4	7.8	18.2	8.2	18.6
13	TNn	°C	0	0.9	0.0	1.1	0	1.1	0.2	0.8	0.0	0.9
14	TXx	°C	0.3	0.7	0.4	0.8	0.3	1.1	0.0	0.8	0.2	1.0
15	Tx10p	días	-1.1	0	-1.3	0	-1.0	0	-1.2	0	-0.9	0
16	TX90p	días	9	17	0	17.5	6.7	16.3	0	18.1	10	17

El presente estudio ha sido elaborado bajo el Convenio Específico de Cooperación Interinstitucional entre el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú y Libélula Instituto para el Cambio Global (2019-2021), en el marco del Proyecto de Apoyo a la Gestión del Cambio Climático - Fase 2, gracias al financiamiento de la Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE), al apoyo de la Oficina de Tecnologías de la Información y Comunicación y de la Dirección de Redes de Observación y Datos del SENAMHI.

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú - SENAMHI
Subdirección de Modelamiento Numérico de la Atmósfera – SMN
Jr. Cahuide 785, Jesús María - Lima - Perú
atencionalciudadano@senamhi.gob.pe
Central telefónica: 614-1414

www.gob.pe/senamhi