La investigación reportada en esta tesis es parte de los programas de investigación del CICESE (Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California).

La investigación fue financiada por el CONAHCYT (Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías).

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México). El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo o titular de los Derechos de Autor.

CICESE© 2024. Todos los derechos reservados

# Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California



# Maestría en Ciencias en Oceanografía Física

# Escenarios futuros de eventos extremos de precipitación y temperatura en México

Tesis para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de Maestro en Ciencias

Presenta:

Ernesto Ramos Esteban

Ensenada, Baja California, México 2024 Tesis defendida por

# **Ernesto Ramos Esteban**

y aprobada por el siguiente Comité

Dra. María Tereza Cavazos Pérez Codirectora de tesis Dra. Gabriela Colorado Ruíz Codirectora de tesis

Dr. Edgar Gerardo Pavía López

Dr. Rodrigo Méndez Alonzo



**Dra. María Tereza Cavazos Pérez** Coordinadora del Posgrado en Oceanografía Física

> **Dra. Ana Denise Re Araujo** Directora de Estudios de Posgrado

Copyright © 2024, Todos los Derechos Reservados, CICESE Prohibida su reproducción parcial o total sin la autorización por escrito del CICESE Resumen de la tesis que presenta **Ernesto Ramos Esteban** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Oceanografía Física.

#### Escenarios futuros de eventos extremos de precipitación y temperatura en México

Resumen aprobado por:

Dra. María Tereza Cavazos Pérez Codirectora de tesis Dra. Gabriela Colorado Ruíz Codirectora de tesis

Diferentes estudios a escala mundial indican un incremento en frecuencia de eventos climáticos extremos debido al calentamiento global y sugieren que podrían intensificarse en el futuro. El objetivo de este trabajo es analizar los posibles cambios de 12 índices climáticos extremos (ICE) de precipitación y temperatura en 15 regiones de México, el sur de los Estados Unidos y Centroamérica para un período histórico (1981-2010), un futuro cercano (2021-2040), un futuro intermedio (2041-2060) y un futuro lejano (2080-2099). Se utilizó el reanálisis ERA5 como referencia en la evaluación histórica de los modelos climáticos globales (MCG) y para las proyecciones se analizaron los ICE de diez MCG del Proyecto de Intercomparación de Modelos Climáticos, fase 6 (CMIP6), de acuerdo con dos escenarios de Vías Socioeconómicas Compartidas (SSPs), uno de bajas emisiones (SSP2-4.5) y otro de altas emisiones (SSP3-7.0). Los MCG reproducen muy bien los índices extremos de temperatura histórica y los días consecutivos secos, pero subestiman la lluvia promedio y la lluvia extrema en las zonas más lluviosas desde el centro de México hasta Centroamérica. Históricamente, se observaron tendencias positivas de las temperaturas extremas (TXx y TNn) en todas las regiones, pero sólo en algunas regiones fueron significativas, mientras que los índices de lluvia extrema (R95p, R10mm y R20mm) presentaron tendencias negativas, pero pequeñas. Las proyecciones indican que las temperaturas extremas podrían seguir incrementándose en el futuro, desde 2° C hasta 5° C a mitad y final de siglo, respectivamente. La contribución de la precipitación extrema arriba del percentil 95 (R95p) se podría incrementar entre un 10 % y 30 %, especialmente en la región subtropical, mientras que la precipitación podría disminuir en las regiones tropicales. Este estudio es el primero que analiza los cambios futuros de índices extremos del CMIP6 a escala regional (en 15 regiones) de México, el sur de Estados Unidos y Centroamérica.

Palabras clave: Centroamérica, CMIP6, escenarios SSP, extremos climáticos, intercomparación de modelos climáticos, México

Abstract of the thesis presented **by Ernesto Ramos Esteban** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Physical Oceanography.

# Future changes of precipitation and temperature extremes in Mexico

Abstract approved by:

Dra. María Tereza Cavazos Pérez Thesis Codirector Dra. Gabriela Colorado Ruíz Thesis Codirector

Global-scale studies indicate an increase in the frequency of extreme weather events due to global warming and suggest that they could further intensify in the future. This study aims to assess potential changes in 12 extreme climate indices (ECI) related to precipitation and temperature in 15 regions in Mexico, the southern United States, and Central America for different periods: a historical period (1981-2010), a near future (2021-2040), an intermediate future (2041-2060), and a far future (2080-2099). The ERA5 reanalysis was used as a reference for the historical evaluation of global climate models (GCMs), and ECI from ten GCMs of phase 6 (CMIP6) from the Coupled Model Intercomparison Project were employed for the projections and examined under two Shared Socioeconomic Pathways (SSPs) scenarios, one characterized by low emissions (SSP2-4.5) and another representing high greenhouse gas emissions (SSP3-7.0). The GCMs reproduce historical extreme temperature indices and consecutive dry days very well. However, they underestimate average and extreme rainfall from central Mexico to Central America in the wetter areas. Historically, positive trends in extreme temperatures (TXx and TNn) were observed across all regions. However, statistical significance was only present in certain regions, while extreme rainfall indices (R95p, R10mm, and R20mm) exhibited small negative trends. The projections suggest that extreme temperatures could continue to increase in the future, from 2°C to 5°C by the mid and late century, respectively. The contribution of extreme precipitation above the 95th percentile (R95p) could increase by 10% to 30%, particularly in the subtropical regions, while precipitation might decrease in tropical regions. This study is the first to analyze future changes in extreme indices from CMIP6 at a regional scale (across 15 regions) in Mexico, the southern United States, and Central America.

Keywords: Central America, climate extremes, CMIP6, intercomparison of climate models, Mexico, SSP scenarios

# Dedicatoria

A mi madre, a mis hermanas y al pueblo de México.

# Agradecimientos

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE) por permitirme estudiar una maestría en Oceanografía Física. En especial al departamento de Oceanografía Física por el apoyo económico brindado después de la conclusión de mi beca.

Al Consejo Nacional de Humanidades Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) por otorgarme apoyo económico para realizar mis estudios de maestría. No. de becario: CVU 1135405

A mis directoras, la Dra. María Tereza Cavazos Pérez y a la Dra. Gabriela Colorado Ruíz. Su dedicación y experiencia han sido esenciales para la escritura de esta tesis.

A mis sinodales el Dr. Edgar Gerardo Pavía López y al Dr. Rodrigo Méndez Alonzo por contribución para mejorar este trabajo.

A mi madre, mi abuela Antonia, mis hermanas Lucero y Yaneth, a mis tíos Gaudencio, Víctor, Julio y Ciria por todo su apoyo y por sus palabras de aliento.

A mis amigos, colegas y compañeros del posgrado por su apoyo en este camino.

A Miriel por tu apoyo incondicional en los momentos más difíciles. Y por nunca dejar que me rindiera ante una tormenta.

# Tabla de contenido

# Página

Resumen en español	ii
Resumen en inglés	iii
Dedicatoria	iv
Agradecimientos	v
Lista de figuras	viii
Lista de tablas	xii

Capítulo	1. Introducción	1			
1.1 Aı	ntecedentes	5			
1.1.1	Índices de extremos de temperatura y precipitación	5			
1.1.2	Escenarios de emisiones del CMIP (RCP y SSP)	5			
1.1.3	Simulaciones históricas y Proyecciones de temperatura	9			
1.2 Ju	stificación	10			
1.3 Pr	1.3 Preguntas científicas				
1.4 0	1.4 Objetivos 11				
1.4.1	Objetivo general	11			
1.4.2	Objetivos específicos	11			

Capítu	ulo 2.	Datos	13
2.1	Reaná	lisis ERA5	13
2.2	Índice	s climáticos extremos y modelos globales	13

Capítu	lo 3.	Metodología	15
3.1	Méti	ricas de evaluación	17
3.1.	.1	Sesgo promedio	17
3.1.	.2	Métrica de desempeño de Taylor (TS)	17
3.1.	.3	Variabilidad Relativa (RV)	18
3.1.	.4	Diagramas de cajas y bigotes (Boxplots)	18

3.2	Ten	dencia	19
3.2.	.1	Prueba no paramétrica de Mann-Kendall	19
3.2.	.2	Pendiente de Sen	20

Capítulo 4	. Resultados 21
4.1 An	álisis histórico de índices extremos
4.1.1	Índices de temperatura 21
4.1.2	Índices de precipitación
4.2 Eva	aluación del desempeño de los MCG 27
4.2.1	Índices de temperatura 27
4.2.2	Índices de precipitación 32
4.2.3	Resumen de métricas
4.3 Esc	enarios futuros de los índices climáticos
4.3.1	Escenarios de los índices de temperatura 39
4.3.2	Escenarios de los índices de precipitación 46
4.3.3	Tendencias históricas y futuras 53
4.3.4	Resumen regional de los cambios futuros 57
Capítulo 5	. Discusión
Capítulo 6	. Conclusiones
6.1 Tra	bajo futuro 67
Literatura	citada 69
Anexos	78

# Lista de figuras

Figura

- Página
- Tendencias espaciales observadas por década para varios índices de precipitación de acuerdo con los datos observados de CHIRPS para el verano boreal extendido (Jun-Oct, columna izquierda) e invierno (Nov-Abr, columna derecha) durante 1981-2010. Los índices y unidades aparecen en los mapas. Los puntos rojos indican significancia estadística al 90% (Figura tomada de Colorado-Ruiz y Cavazos, 2021). El significado de los índices se muestra en la Tabla 3......3
- Proyecciones de cambio global de temperatura con SSP en °C el periodo histórico 1950-2014 (línea negra) y durante el siglo XXI para los escenarios prioritarios SSP1-1.9 (línea cyan), SSP1-2.6 (línea azul marino), SSP2-4.5 (línea naranja), SSP3-7.0 (línea roja), SSP5-8.5 (línea roja intensa) respecto al periodo 1850-1900. El número a la derecha de los escenarios representa el número de modelos utilizados para el cálculo (Figura tomada de Chen et al., 2021)...........9
- Climatología histórica de a) Máximo anual de temperatura máxima (TXx), b) Mínimo anual de temperatura mínima (TNn) y c) Rango diurno de temperatura DTR) para ERA5 (izquierda) y la mediana del Ensamble de 10 modelos globales del CMIP6 (EnsMCG) (derecha). El contorno sólido en TXx representa la isoterma de 35° C. En el último mapa se muestran las regiones analizadas que aparecen en la Figura 4.

- 8. Mapas de calor del Sesgo (a, d, g), Variabilidad Relativa (b, e, h) y Taylor Skill (c, f, i) de tres índices de temperatura TXx, TNn y DTR, derivados de 10 modelos del CMIP6 y su Ensamble relativos al reanálisis ERA5 para el periodo 1981-2010 en las 15 regiones analizadas, más las

- 16. Proyecciones de Cambio promedio regional (eje X) de los índices anuales de temperatura TXx (a-f), TNn (g-l) y DTR (m-r) (° C) de acuerdo con cada modelo utilizado y el EnsMCG (eje Y) para

los escenarios SSP2-4.5 y SSP3-7.0 durante 2021-2040, 2041-2060 y 2080. Los cuadros grises indican que no hay datos. 42

- Cambios futuros de los índices de temperatura TX90p (a-f), TN10p (g-l)) y TN90p (m-r) anuales (° C) del EnsMCG bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP3-7.0 durante los periodos 2021-2040, 2041-2060 y 2080-2099.
- Cambios futuros de los índices PRCPTOT (a-f), RX5day (g-l)) y R95p (m-r) anuales (%) del EnsMCG de los modelos para los escenarios SSP2-4.5 y SSP3-7.0 durante 2021-2040, 2041-2060 y 2080-2099 con respecto al periodo histórico 1981-2010.

- 23. Series de tiempo de TXx (° C) de ERA5 y el promedio del EnsMCG de los modelos del CMIP6 para el periodo 1981-2010 (eje Y izquierdo) y los cambios futuros del 2020 al 2100 (eje Y derecho) para los escenarios SSP2-4.5 (azul) y SSP3-7.0 (rojo). La línea verde representa a ERA5, la línea negra al EnsMCG histórico de los modelos. Las líneas grises representan el espagueti de variación de todos los modelos. 54
- 24. Series de tiempo de PRCPTOT de ERA5 y el promedio del EnsMCG de los modelos del CMIP6 para el periodo 1981-2010 (eje Y izquierdo) y los cambios futuros del 2020 al 2100 (eje Y derecho) para los escenarios SSP2-4.5 (azul) y SSP3-7.0 (rojo). La línea verde representa a ERA5, la línea negra al EnsMCG histórico de los modelos. Las líneas grises representan el espagueti de variación de todos los modelos. Los valores históricos de CAM2 son más grandes que el límite del eje Y (> 2000 mm).
- 26. Mapa esquemático con el resumen de los cambios promedio del EnsMCG cuando hay un consenso en el signo (2/3 de los modelos con aumento o disminución) de los índices de

- 27. Proyecciones de cambio de a) temperatura máxima extrema (TXx) y b) precipitación extrema (R95p) para el periodo 2021-2099 para los escenarios SSP2-4.5 (arriba) y SSP3-7.0 (abajo).. 63

- Diagramas de cajas y bigotes con la anomalía de los índices de precipitación respecto al periodo histórico 1981-2010 para el escenario SSP2-4.5 para los periodos 2021-2040, 2041-2060, 2080-2099.
- Diagramas de cajas y bigotes con la anomalía de los índices de precipitación respecto al periodo histórico 1981-2010 para el escenario SSP2-4.5 para los periodos 2021-2040, 2041-2060, 2080-2099.

# Lista de tablas

# Tabla

1.	Distintos escenarios de vías socioeconómicas y emisiones de gases de efecto de invernadero SSP-RCP Tomada de Chen et al., (2021). Con negritas se resaltan los escenarios prioritarios. 7
2.	Modelos del CMIP6 y resolución horizontal de cada uno14
3.	Conjunto de índices de precipitación utilizados en este trabajo a escala anual y su significado. 
4.	Conjunto de índices de temperatura utilizados a escala anual y su significado
5.	Tendencias regionales históricas por década de ERA5 para los índices de temperatura y precipitación en el periodo 1981-2010. Los valores en negritas indican que la tendencia es significativa al 95 %
6.	Tendencias regionales históricas por década del Ensamble para los índices de temperatura y precipitación en el periodo 1981-2010. Los valores en negritas indican que la tendencia es significativa al 95 %
7.	Tendencias regionales futuras por década del Ensamble para los índices de temperatura y precipitación en el periodo 2021-2099 para el escenario SSP2-4.5. Los valores en negritas indican que la tendencia es significativa al 95 %
8.	Tendencias regionales futuras por década del Ensamble para los índices de temperatura y precipitación en el periodo 2021-2099 para el escenario SSP3-7.0. Los valores en negritas indican que la tendencia es significativa al 95 %
9.	Cambios regionales promedio proyectados de los índices de temperatura y precipitación de acuerdo al EnsMCG para en el periodo 2080-2099 bajo el escenario SSP2-4.5. Los valores en negritas indican un acuerdo en el signo del cambio de >2/3 de los modelos

 El Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) en sus 5° y 6° Informes de Evaluación de las Bases Físicas (Masson-Delmotte et al., 2021; Stocker et al., 2014) afirma que el calentamiento del sistema climático es un hecho inequívoco. Los reportes también mencionan que las variaciones en las condiciones climáticas suceden tanto en el corto como en el largo plazo y en diferentes escalas espaciales. Estos cambios, independientemente de su origen, afectan directamente a los ecosistemas, particularmente los cambios asociados a fenómenos hidrometeorológicos y climáticos extremos.

Los eventos extremos pueden generar desastres por lluvias intensas, inundaciones, deslaves, sequías, olas de calor, heladas, etc. Por lo que es muy relevante mejorar la calidad y disponibilidad de la información climática (tanto histórica como futura) y el desarrollo de indicadores de diferentes fenómenos para contribuir a la prevención y la mejora de los sistemas de alerta temprana. Estos son una herramienta crucial para los tomadores de decisión en la gestión de medidas de prevención, planeación y adaptación al cambio climático, las cuales si se implementan a tiempo podrían reducir los impactos negativos a la sociedad y a los servicios ecosistémicos.

Según el 6° Informe del IPCC (AR6) del 2021, la temperatura global aumentó 1.1° C durante 2011-2020 con respecto al periodo pre-industrial (1850-1900) y, de acuerdo con la Organización Meteorológica Mundial (WMO, por sus siglas en inglés, 2023), el 2023 es el año más caliente registrado con datos observados (1.4°C por arriba del periodo preindustrial). Además, más del 70% de la superficie de la Tierra (incluyendo a México) presenta una disminución en la ocurrencia anual de noches frías y un aumento en la frecuencia de las noches cálidas (Alexander et al., 2006; Donat et al., 2016; Dunn et al., 2020). Consistente con este resultado, durante los últimos 30 años la temperatura en Estados Unidos, México y Centroamérica también se ha incrementado; en particular, el noroeste de México y el suroeste de Estados Unidos muestran un aumento significativo de 0.3° C/década (Cavazos et al., 2020).

Adicionalmente, estas regiones podrían experimentar un incremento de temperatura de hasta 5° C a finales del siglo XXI debido al calentamiento global (Colorado-Ruiz et al., 2018), así como eventos de sequías más severas (Spinoni et al., 2020). Las temperaturas máxima y mínima también se han incrementado en México, principalmente durante la primavera y en el Noroeste de México; estos aumentos podrían estar ligados a la Oscilación Decenal del Pacífico (PDO) (Pavia et al., 2009).

También se ha encontrado que las precipitaciones extremas son cada vez más intensas a escala global, aunque muestran más diferencias regionales que las temperaturas (Donat et al., 2016). Algunos estudios indican que la precipitación diaria promedio ha disminuido en el noroeste del país y en algunas partes del oeste de Estados Unidos en los últimos 30 años y ha aumentado en el centro y en la costa del Golfo de México, pero sin una significancia estadística (Cavazos et al., 2020; Méndez González et al., 2008; Peterson et al., 2008). En el sur de México y Centroamérica los eventos extremos de precipitación se incrementaron entre 10 mm/dec y 18 mm/dec, pero con diferencias regionales (Aguilar et al., 2005). Mientras que, en el noroeste de México, algunos índices de precipitación extrema tienen tendencia anual positiva estadísticamente significativa, los cuales se han asociado al fenómeno de El Niño Oscilación del Sur (ENSO) y la Oscilación Decenal del Pacífico (Arriaga-Ramírez y Cavazos, 2010).

El único estudio en México que ha analizado varios índices extremos de precipitación con diversas bases de datos observacionales para todo el país es el de Colorado-Ruiz y Cavazos (2021), el cual muestra que en los últimos 40 años, la lluvia extrema diaria de verano (> del percentil 95) se incrementó significativamente en Baja California Sur, el noreste de México y sureste de los Estados Unidos (Figura 1), en parte debido al incremento de ciclones tropicales y otros fenómenos convectivos posiblemente ligados a la fase positiva de la Oscilación Multidecenal del Atlántico (AMO, por sus siglas en inglés). Por otro lado, en el invierno se observaron tendencias negativas de la Iluvia extrema y estacional en el noroeste de México y el suroeste de Estados Unidos.

Los fenómenos hidrometeorológicos y climáticos extremos son un reto muy importante a nivel mundial; en México, como a escala global ha habido un incremento en el número de desastres relacionados con estos fenómenos que se han cuantificado en muertes, impactos económicos y declaratorias de desastres (Sánchez-Rodríguez y Cavazos, 2015).

En la literatura, los eventos extremos se han investigado con bases de datos observacionales, reanálisis y con salidas de Modelos Climáticos Globales (MCG) y modelos climáticos regionales (MCR). Las simulaciones de los MCG son parte del Proyecto de Intercomparación de Modelos Climáticos (CMIP, por sus siglas en inglés), los cuales se usan para generar escenarios del clima futuro y realizar experimentos de sensibilidad del sistema climático con diferentes forzamientos variando las concentraciones de gases de efecto invernadero, tanto en periodos históricos como en proyecciones futuras (Eyring et al., 2016). Cada reporte de evaluación del IPCC tiene asociada una versión del CMIP. Algunos estudios muestran que las versiones más recientes del CMIP reproducen mejor la precipitación extrema, posiblemente debido al incremento en la resolución espacial y a mejoras en la física de los modelos (Sillmann et al., 2013a); por

ejemplo, los modelos del CMIP6 simulan mejor los extremos de precipitación respecto al CMIP5, aunque aún tienden a subestimar la precipitación en Centroamérica y sur de México (Kim et al., 2020). No obstante, los MCG son la mejor herramienta que se tiene en la actualidad para mejorar el entendimiento de la dinámica atmosférica desde el punto de vista del sistema Tierra (o sistema climático) en su conjunto.



**Figura 1.** Tendencias espaciales observadas por década para varios índices de precipitación de acuerdo con los datos observados de CHIRPS para el verano boreal extendido (Jun-Oct, columna izquierda) e invierno (Nov-Abr, columna derecha) durante 1981-2010. Los índices y unidades aparecen en los mapas. Los puntos rojos indican significancia estadística al 90% (Figura tomada de Colorado-Ruiz y Cavazos, 2021). El significado de los índices se muestra en la Tabla 3.

Las proyecciones futuras generadas con los modelos del CMIP6, utilizan escenarios de emisiones y uso de suelo obtenidos con modelos de evaluación integrados (IAMs, por sus siglas en inglés) basados en trayectorias futuras de desarrollo social, trayectorias compartidas socioeconómicas (SSPs, por sus siglas en inglés) y Vías de Concentración Representativas (RCPs, por sus siglas en inglés) (O'Neill, et al. 2016). En la sección 1.1.2 se describirán dichos escenarios, los cuales proyectan a nivel global incrementos de temperatura para finales de siglo de 2° C para el escenario más conservador (SSP2-4.5) y hasta 7° C para el escenario más extremo en algunas regiones (SSP4-8.5) (Ajjur y Al-Ghamdi, 2021).

Dado que los MCG tienen resolución horizontal burda (>100 km), otra herramienta utilizada para analizar eventos climáticos extremos son los Modelos Climáticos Regionales (MCR) del Experimento Coordinado de Downscaling Climático (CORDEX, por sus siglas en inglés). Por ejemplo, Coppola et al. (2021) forzaron diversos MCR con modelos del CMIP5 y CMIP6 para analizar indicadores de peligro basados en temperatura y precipitación a escala global bajo diferentes escenarios de cambio climático. Los autores encontraron que a finales de este siglo (2081-2099) y bajo el escenario RCP-8.5 podría haber un incremento entre 40 y 50 días con temperatura máxima por encima de 35°C en todo México y una posible disminución de la precipitación por encima del percentil 90 en el sur del país.

En México se han investigado algunos índices extremos de precipitación o temperatura para diversas regiones y periodos históricos (Alexander et al., 2006; Cavazos et al., 2008; Arriaga-Ramirez y Cavazos, 2010; García-Cueto et al., 2014; Cavazos et al., 2020) y para todo México (Colorado-Ruiz y Cavazos, 2021). Con excepción del trabajo de García-Cueto et al. (2014) sobre cambios futuros de las temperaturas extremas en ciudades de Baja California, los demás estudios se han enfocado en analizar los extremos de precipitación regional en un periodo histórico. Sin embargo, hay muy pocos estudios enfocados en investigar cómo podrían cambiar los extremos de temperatura y precipitación a escala regional en México y Centroamérica. Los estudios de Zhao et al. (2023) y Ávila-Diaz et al. (2023) utilizan las proyecciones climáticas más recientes (CMIP6) para el siglo XXI para analizar los cambios futuros de extremos climáticos en Latín América.

Sin embargo, ambos estudios dividen a México y Centroamérica en dos grandes regiones, Norte de México (centro y norte) y sur de México y Centroamérica. Sus resultados sugieren incrementos entre 1° C y 1.5° C en la temperatura máxima extrema y un aumento de precipitación extrema (R95p) en más de 30 % con el escenario más extremo en México y Centroamérica. El trabajo de Ávila-Diaz et al. (2023) sugiere que la temperatura extrema podría incrementarse a mediados del siglo XXI y que los eventos de precipitación extrema podrían aumentar en el suroeste de México y en la zona del Monzón de Norteamérica.

Por todo lo anterior, el objetivo de este trabajo es analizar índices extremos de precipitación y temperatura a una escala más regional (en 15 regiones) en México y Centroamérica en un periodo histórico y sus posibles cambios en tres periodos futuros durante el siglo XXI con 10 MCG del CMIP6. Para las proyecciones futuras se utilizan dos de los nuevos escenarios de vías socioeconómicas y emisiones (SSP-RCP: SSP2-4.5 y SSP3-7.0) (Eyring et al., 2016).

# **1.1 Antecedentes**

## 1.1.1 Índices de extremos de temperatura y precipitación

De acuerdo con el IPCC (Pörtner et al., 2019), un evento extremo es cuando el valor de una variable climática o meteorológica sobrepasa (o cae por debajo) de un umbral cercano a los extremos superiores (o inferiores) del rango de valores observados para esa variable en una región dada. Cuando un patrón de condiciones meteorológicas extremas persiste durante un periodo prolongado, como una estación, puede ser clasificado como un evento climático extremo. Por simplicidad, los eventos meteorológicos y climáticos extremos se denominan "extremos climáticos" por analizarlos desde un punto de vista climatológico o de largo periodo.

Existen diferentes enfoques para definir los extremos; el método más común se basa en umbrales o métricas climáticas, como por ejemplo la lluvia por encima del percentil 95 o la temperatura por encima de 35° C (Masson-Delmotte et al., 2021). Sin embargo, también se puede utilizar la teoría de valores extremos, con diferentes distribuciones de probabilidad para la ocurrencia de los eventos (Alexander et al., 2006; Zhang et al., 2011).

Para poder comparar en una forma estandarizada los extremos climáticos a nivel global, el Grupo de Expertos en Detección e Índices de Cambio Climático (ETCCDI, por sus siglas en inglés) desarrolló un conjunto de índices de extremos de temperatura y precipitación (Zhang et al., 2011). En total definieron 26 índices, 16 de temperatura y 10 de precipitación que siguen las definiciones basadas en umbrales. En el presente trabajo se analizan 6 índices de cada variable considerando frecuencia e intensidad.

#### 1.1.2 Escenarios de emisiones del CMIP (RCP y SSP)

El objetivo del CMIP es entender los cambios del clima presente, pasado y futuro que pueden estar relacionados con la variabilidad natural o en respuesta a efectos antropogénicos; para lo cual se utilizan simulaciones de modelos climáticos generados por grupos de modelación de todo el mundo coordinados por el programa de investigación climática mundial (WRCP, por sus siglas en inglés) (Eyring et al., 2016). El CMIP surgió en 1995, hace más de 20 años, con la intención de tener un marco experimental estandarizado para estudiar y mejorar en forma continua las simulaciones de los MCG y así poder comprender los

elementos fundamentales de la ciencia del clima. Por cada reporte del IPCC hay nuevas fases del CMIP con versiones mejoradas de los modelos globales, tanto en resolución horizontal como en nuevos procesos físicos y ciclos biogeoquímicos; también se proponen nuevos escenarios de emisiones que se usan como forzantes para las proyecciones futuras de los MCGs. Las simulaciones del CMIP tienen un formato específico estandarizado con el fin de facilitar el análisis de múltiples modelos (Taylor et al., 2012). En el CMIP5 se implementaron las llamadas Vías de Concentración Representativas (RCP), las cuales consideran los forzamientos radiativos asociados a diferentes niveles de concentración de los gases de efecto invernadero generando cuatro escenarios futuros ordenados desde bajas a altas emisiones: RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5 (Moss et al., 2010). El forzamiento radiativo es la diferencia entre la radiación que entra y la que sale de la atmósfera debido a cambios en los gases de efecto invernadero y en cada escenario se considera un aumento lineal hacia finales del siglo XXI; por ejemplo, el RCP8.5 considera un aumento los de s.5 W/m2 en el 2100.

En una fase más reciente, el CMIP6 asoció el forzamiento radiativo a diferentes Vías Socioeconómicas Compartidas (SSP) agregando aspectos socioeconómicos relevantes como el crecimiento poblacional global, el nivel educativo, la urbanización, el progreso económico, el manejo de los recursos, el desarrollo tecnológico, entre otros aspectos (Eyring et al., 2016). Después, los datos se complementan con forzantes antropogénicos (aerosoles, ozono y nitrógeno); también se toma en cuenta la radiación solar y datos observados y proyecciones de gases de efecto invernadero y finalmente se obtienen forzantes que se introducen en los modelos (Chen et al., 2021). Es importante destacar que los escenarios no son pronósticos, sino que su objetivo es mejorar el entendimiento de los posibles cambios y las incertidumbres para poder tomar decisiones que sean robustas frente a una amplia gama de posibles cambios o escenarios futuros (Moss, et al. 2010).

Como ya se mencionó, los escenarios del CMIP6 son una combinación de los RCPs y los SSPs, por lo que los nombres de los escenarios se abrevian de la siguiente manera: SSPX-Y; donde X es el número de la familia socioeconómica SSP (1 a 5) que se usó para desarrollar la trayectoria de emisiones, y la Y indica la aproximación del forzamiento radiativo al 2100 (Chen et al., 2021). Los SSPs-RCPs se generaron gracias al trabajo conjunto de un equipo de expertos que discutieron y estandarizaron los aspectos socioeconómicos en datos cuantitativos y mediante un modelo de evaluación integrado (IAM) combinaron estas narrativas con posibles medidas para mitigar el cambio climático. Como se observa en la Tabla 1 y Figura 2, los escenarios van desde el SSP1-1.9 (el más optimista) que mantiene el calentamiento aproximadamente 1.5°C por arriba del periodo preindustrial con concentraciones de CO2 por debajo de 400 ppm, hasta

finales de siglo, hasta el escenario SSP5-8.5 (el más extremo) en el que las concentraciones se duplican desde mediados de siglo.

Escenario	Descripción desde una perspectiva de emisiones/concentraciones y posibles				
SSPX-Y	cambios de temperatura				
SSP1-1.9	9 Mantiene el calentamiento a aproximadamente 1.5°C por encima de los niveles				
	1850-1900 en el año 2100 después de un ligero sobrepaso y conlleva emisiones				
	netas de CO <sub>2</sub> cercanas a cero a mediados de siglo.				
SSP1-2.6	Permanece por debajo de un calentamiento de 2.0°C en relación con 1850-1900				
	con emisiones netas de CO₂ implícitamente en cero en la segunda mitad del siglo.				
	Desarrollo sostenible				
SSP4-3.4	Un escenario entre SSP1-2.6 y SSP2-4.5 en términos de forzamiento radiativo a				
	finales de siglo. Sobrepasa los 2.0°C en la mayoría de las simulaciones del CMIP6 en				
	comparación con 1850-1900				
SSP2-4.5	Un escenario de referencia intermedio, las emisiones de CO <sub>2</sub> permanecen				
	alrededor de los niveles actuales hasta mediados de siglo. Las proyecciones de				
	temperatura se sitúan entre 2.7°C y 3.4°C para el año 2100. Resulta en un				
	calentamiento estimado de alrededor de 2.7°C para fines del siglo XXI en relación				
	con 1850-1900.				
SSP4-6.0	El nivel de forzamiento radiativo nominal de 6.0 W m- <sup>2</sup> a finales de siglo puede				
	considerarse un escenario de referencia "sin políticas climáticas adicionales".				
SSP3-7.0	Un escenario de referencia intermedio a alto que resulta de la ausencia de				
	políticas climáticas adicionales. Las emisiones de CO2 se duplican				
	aproximadamente con respecto a los niveles actuales para el año 2100. Tiene altas				
	emisiones de gases distintos al CO <sub>2</sub> , incluyendo emisiones elevadas de aerosoles.				
SSP5-8.5	Un escenario de referencia alto sin políticas climáticas adicionales, con desarrollo				
	basado en combustibles fósiles. Las emisiones de CO2 se duplican				
	aproximadamente para el año 2050 desde los niveles actuales. Los niveles de				
	emisión tan altos como los del SSP5-8.5 no son alcanzados por los modelos de				
	evaluación integrada (IAMs) bajo ninguno de los SSPs excepto la vía de desarrollo				
	socioeconómico basada en combustibles fósiles del SSP5.				

**Tabla 1.** Distintos escenarios de vías socioeconómicas y emisiones de gases de efecto de invernadero SSP-RCPTomada de Chen et al., (2021). Con negritas se resaltan los escenarios prioritarios.

En la Figura 2 se muestra cómo se comporta el CO<sub>2</sub> para cada uno de los SSPs-RCPs que considera el CMIP6, en donde se observa que el SSP3-7.0 (línea amarilla) es un escenario más extremo que el SSP2-4.5 (línea cian). Mientras que el primero muestra un incremento continuo en las emisiones del dióxido de carbono hasta el 2100, en el segundo se observa que después del 2060, las emisiones de CO<sub>2</sub> se estabilizan. Lo anterior se debe a que el SSP2-4.5 es un escenario en el que se considera que los gobiernos toman algunas medidas para la mitigación y adaptación al cambio climático, pero no las suficientes por lo que se queda a "medio camino". Por otro lado, el SSP3-7.0 exhibe un crecimiento económico limitado y un avance tecnológico más lento, además de no implementar medidas adecuadas de mitigación y adaptación. Este escenario se considera como aquel con las emisiones más altas de metano y de sustancias precursoras de la contaminación atmosférica (Meinshausen et al., 2020; O'Neill et al., 2017). En esta tesis se analizan dos escenarios intermedios: uno de bajas emisiones (SSP2-4.5) y otro de altas emisiones (SSP3-7.0).



**Figura 2.** Concentraciones de CO<sub>2</sub> para los SSPX-RCPY en comparación con las concentraciones de RCP (líneas quebradas). Los escenarios anteriores de RCP se muestran en líneas negras más gruesas y en varios estilos de línea. Escenarios generados con la nueva versión del modelo climático MAGICC7 utilizada para los SSPX-RCPY, donde se destacan con letras grandes los escenarios prioritarios del AR6 (Figura tomada de Meinshausen et al., 2020).

# 1.1.3 Simulaciones históricas y Proyecciones de temperatura

Una vez que se tienen los escenarios climáticos (SSP-RCP), esta información se usa como forzante inicial de los MCG para generar las simulaciones históricas y las proyecciones climáticas futuras producidas por el CMIP. Con las simulaciones históricas y futuras de los modelos, la información se hace pública para que los expertos puedan evaluar/analizar las simulaciones presentes y los cambios futuros de acuerdo con cada escenario y modelo. Las simulaciones de los modelos se utilizan para comprender cómo podría variar el clima y sus forzantes en el futuro en diferentes regiones del mundo (Chen, et al., 2021).

En la Figura 3 se muestran los cambios de la temperatura media global bajo distintos escenarios SSP-RCP de un ensamble promedio de los modelos del CMIP6 del último reporte del IPCC. Se observa que en el futuro cercano todos los escenarios proyectan incrementos similares, mientras que a partir de mediados de siglo (alrededor del año 20150), comienza a verse la diferencia entre los diferentes escenarios. El escenario SS2-4.5 muestra una razón de incremento menor después del periodo intermedio que el periodo cercano, con incrementos globales de hasta 3° C a finales de siglo. Por otro lado, el escenario SSP3-7.0 muestra un incremento casi constante, hasta 4° C en el 2100.



**Figura 3.** Proyecciones de cambio global de temperatura con SSP en °C el periodo histórico 1950-2014 (línea negra) y durante el siglo XXI para los escenarios prioritarios SSP1-1.9 (línea cyan), SSP1-2.6 (línea azul marino), SSP2-4.5 (línea naranja), SSP3-7.0 (línea roja), SSP5-8.5 (línea roja intensa) respecto al periodo 1850-1900. El número a la derecha de los escenarios representa el número de modelos utilizados para el cálculo (Figura tomada de Chen et al., 2021).

# 1.2 Justificación

En las últimas décadas se han reportado incrementos significativos de temperatura tanto en invierno como en verano para todo el país (Cavazos et al., 2020), los cuales podrían incrementarse aún más en el futuro bajo el escenario de altas emisiones (RCP8.5) (Colorado-Ruiz y Cavazos, 2021; Masson-Delmotte et al., 2021). Aunque las tendencias históricas de la precipitación estacional son pequeñas (Cavazos et al., 2020) y las de eventos extremos sólo son significativas en algunas regiones (Alexander et al., 2006; Colorado-Ruiz y Cavazos, 2021), se sabe que con el calentamiento global los extremos de lluvia podrían aumentar en frecuencia y/o en intensidad (Seneviratne et al., 2012) y que podrían ser más abruptos para las regiones tropicales (Almazroui, et al., 2021a). Los únicos trabajos que analizan eventos extremos futuros con las simulaciones del CMIP6 y que incluyen a México y Centroamérica son el estudio global de Almazroui et al. (2021b), el de Zhao et al. (2023) para Norteamérica y el de Avila-Diaz et al. (2023) para Latinoamérica y el Caribe. Sin embargo, estos trabajos utilizan las regiones propuestas por el IPCC que dividen a México y Centroamérica en dos grandes áreas, la zona norte (NCA) y la zona sur (SCA) que incluye al sur de México y Centroamérica (ver NCA y SCA en la Figura 4).



**Figura 4.** Topografía (m) y las 15 regiones climáticas analizadas en esta tesis, identificadas por 3 letras y polígonos irregulares. Sur de Baja California (SBC), el desierto de Sonora (DES), sur de California y noreste de Baja California (CAs), Arizona-Nuevo México (ANM), el núcleo del Monzón de Norteamérica (MNZ), altiplano (HPL), Centro Oeste de México (CWM), Suroeste de México (SWM), Península de Yucatán (PYU), Sureste de México (SEM), Noreste de México (NEM), Texas (TEX), Sur de los Estados Unidos (SUS), y Centroamérica Norte (CAM1) y Centroamérica sur (CAM2). Los dos polígonos con líneas quebradas negras representan las regiones de Norte de Centroamérica (NCA) y Sur de Centroamérica (SCA) del IPCC.

Por lo anteriormente mencionado es necesario un trabajo que analice las proyecciones de eventos extremos de manera más regional. Para llenar este hueco científico, uno de los objetivos de esta tesis es analizar los eventos extremos históricos y sus posibles cambios en las 15 regiones que se muestran en la Figura 4, más las dos grandes regiones del IPCC para comparar con los estudios citados.

# 1.3 Preguntas científicas

¿Qué eventos extremos climáticos muestran tendencias significativas en México, el sur de Estados Unidos y Centroamérica durante 1981-2010?

¿Cómo y qué tanto podrían cambiar su intensidad y frecuencia durante el siglo XXI debido al calentamiento global?

# 1.4 Objetivos

# 1.4.1 Objetivo general

Analizar las proyecciones climáticas y posibles cambios de índices extremos de temperatura y precipitación a escala regional con simulaciones de modelos globales del CMIP6 durante el siglo XXI.

# 1.4.2 Objetivos específicos

- Descargar los datos de seis índices de temperatura y seis de precipitación de los diferentes modelos y homogeneizarlos a una misma malla (remallar a 50 km de acuerdo con el punto de malla más cercano) tanto para el periodo histórico como los futuros.
- Calcular y analizar los mismos índices del punto anterior a escala regional para un periodo histórico (1981-2010) con el reanálisis de ERA5 como aproximación a los datos observados para México, el sur de Estados Unidos y Centroamérica.

- 3. Calcular el Ensamble promedio regional de los MCGs (EnsMCG) para el periodo histórico y para cada índice.
- 4. Analizar los patrones espaciales y temporales de los índices regionales con ERA5 durante el periodo histórico (1981-2010) y compararlos con los patrones obtenidos con los MGC y su EnsMCG.
- 5. Calcular diferentes métricas para evaluar el desempeño de los MCGs relativos a ERA5.
- Calcular los escenarios futuros del área de estudio y de cada una de las 17 regiones, los porcentajes de cambio de cada índice y modelo (y el EnsMCG) bajo dos escenarios de cambio climático (SSP2-4.5 y SSP3-7.0) para tres períodos del siglo XXI: futuro cercano (2021-2040), futuro intermedio (2041-2060) y futuro lejano (2080-2099) con respecto al periodo histórico.

# 2.1 Reanálisis ERA5

Los reanálisis atmosféricos combinan observaciones meteorológicas de varias fuentes de diversas variables (como temperatura, humedad, viento y presión) para forzar a un modelo meteorológico global utilizando asimilación de datos; con lo que se mejoran las simulaciones y proporciona una representación continua de los campos horizontales, verticales y temporales del estado del tiempo. Las mismas variables que se asimilan (Roca et al., 2019) pueden utilizarse en forma reanalizada como aproximación a las observaciones en una malla continua.

ERA5 es la quinta generación de reanálisis atmosféricos producido por el Centro Europeo para Pronósticos Meteorológicos de Mediano Alcance (ECMWF) y remplaza al ERA-Interim, que tenía menor resolución horizontal y temporal. ERA5 incorpora los avances más recientes de la física y ciencia de datos (Hersbach et al., 2020). ERA5 tiene una malla regular (lat x lon) a una resolución horizontal de 0.25° x 0.25° y con información horaria, disponible en: <u>https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels</u>. Se descargó la información cada hora tanto de lluvia como de temperatura y posteriormente se procesaron para obtener la lluvia acumulada diaria, la temperatura máxima y la temperatura mínima diaria para el periodo 1981-2010. Con esta información diaria posteriormente se calcularon los índices de extremos. En esta tesis se considera al ERA5 como la base de datos de referencia ya que Colorado-Ruiz y Cavazos (2021) mostraron que ERA5 tuvo un buen desempeño al reproducir diversos índices extremos de lluvia en casi todo México durante el mismo periodo utilizando diversas bases de datos.

# 2.2 Índices climáticos extremos y modelos globales

En este trabajo se utiliza la base de datos de índices extremos (Sandstad et al., 2022) del Servicio de Cambio Climático de Copernicus (C3S) de la Unión Europea para diez MCGs del CMIP6 disponibles en el sitio web: <u>https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/sis-extreme-indices-cmip6?tab=doc</u> del almacén de datos climáticos (CDS, por sus siglas en inglés). Se escogieron seis índices de precipitación y seis de temperatura de 10 modelos globales (Tabla 2) que han presentado buen desempeño en la región (Almazroui et al., 2021a; Colorado-Ruiz et al., 2018) Los datos disponibles de los modelos del CMIP6 abarcan el periodo de 1850-2100, pero en este trabajo se utiliza el periodo histórico o de referencia de 1981-2010 y los periodos futuros cercano (2021-2040), futuro intermedio (2041-2060) y futuro lejano (2080-2099).

Los índices disponibles en la página de Copernicus se calcularon con el lenguaje de programación R y la paquetería "climdex.pcic" (<u>https://github.com/pacificclimate/climdex.pcic</u>) y fueron desarrollados por Sandstad et al. (2022). Esta base de datos cuenta con datos históricos y cuatro escenarios futuros: SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5. En el siguiente capítulo se explican los índices de precipitación y temperatura (Tablas 3 y 4) que se usan en este trabajo. Se utilizó solo una simulación de cada MCG.

Modelos del CMIP6	Resolución horizontal (lat x lon)
ACCESS–CM2	1.9° × 1.3°
BCC–CSM2–MR	1.1° × 1.1°
CNRM-CM6-1	1.4° × 1.4°
EC–Earth3	0.7° × 0.7°
GFDL–ESM4	1.3° × 1°
HadGEM3-GC31-LL	1.875°x1.25°
MPI-ESM1-2-LR	1.9° × 1.9°
MRI–ESM2–0	1.1° × 1.1°
NorESM2–MM	0.9° × 1.3°
UKESM1–0–LL	1.9° × 1.3°

Tabla 2. Modelos del CMIP6 y resolución horizontal de cada uno.

Los índices de extremos diarios de precipitación a escala anual que se utilizan en esta tesis se muestran en la Tabla 3 y para temperatura en la Tabla 4. Para cada variable se escogieron índices de frecuencia (con unidades de días para precipitación y porcentaje de días en los índices de temperatura) y de intensidad (en mm o °C). Para los 10 MCG empleados se descargaron los índices directamente de la página de Copernicus, mientras que para ERA5 (base de datos de referencia) se calcularon los mismos índices con la paquetería de operadores de datos climáticos (CDO, por sus siglas en inglés). Cabe aclarar que la resolución horizontal de los modelos del CMIP6 es mucho mayor (> 100 km) que la de ERA5 (aproximadamente 31 Km), por lo que no se espera que los modelos logren reproducir la intensidad de los eventos extremos, sino que sean capaces de capturar el signo de las anomalías históricas de los índices extremos del ERA5 y los patrones espaciales promedio en diferentes regiones del área de estudio.

Nombre	Nombre corto	Unidades	Descripción
Días secos consecutivos	CDD	Días	Número máximo de días seguidos con precipitación < a 1 mm en un año.
Precipitación total en días húmedos	PRCPTOT	mm	Precipitación total anual sumada en días con precipitación ≥ 1 mm.
Días con precipitaciones intensas	R10mm	Días	Número de días por año con 10 mm o más de precipitación.
Días con precipitaciones muy intensas	R20mm	Días	Número de días al año con 20 mm o más de precipitación.
Lluvia acumulada arriba del P95	R95p	mm	Precipitación acumulada por año en días con precipitación por encima del percentil 95.
Precipitación máxima de 5 días	Rx5day	mm	Precipitación máxima en cinco días consecutivos al año.

Tabla 3. Conjunto de índices de precipitación utilizados en este trabajo a escala anual y su significado.

Todas las bases de datos se interpolaron a una malla común de 0.45°x 0.45° (aproximadamente 50 km) con el método del punto del vecino más cercano (con CDO). Una vez estandarizada la resolución horizontal de los modelos del CMIP6 se calculó la mediana para obtener el EnsMCG, ya que la mediana es menos

sensible a datos atípicos, en comparación con el promedio en el cual un valor alto podría sesgar el resultado (Gleckler et al., 2008; Mehran et al., 2014). Se calcula el Ensamble, porque éste suele mostrar un mejor desempeño que los modelos individuales (Fan et al., 2020; Kim et al., 2020).

Nombre	Nombre corto	Unidades	Descripción
Rango de temperatura diurna	DTR	°C	Diferencia diaria media anual entre temperatura mínima y máxima
Valor máximo de la temperatura máxima diaria	ТХх	°C	Máximo de temperatura máxima diaria anual.
Valor mínimo de la temperatura mínima diaria	TNn	°C	Mínimo de temperatura mínima diaria anual.
Noches cálidas	TN90p	%	Porcentaje de días con temperatura mínima por encima del percentil 90 de temperatura mínima.
Noches frías	TN10p	%	Porcentaje de días con temperatura mínima por debajo del percentil 10 de temperatura mínima.
Días cálidos	ТХ90р	%	Porcentaje de días con temperatura máxima por encima del percentil 90 de temperatura mínima.

Tabla 4. Conjunto de índices de temperatura utilizados a escala anual y su significado.

Para el análisis regional se utilizaron 13 regiones propuestas por Colorado-Ruiz y Cavazos (2021) para México y Estados Unidos, más 2 dos regiones para Centroamérica. Adicionalmente, se utilizaron las dos grandes regiones del IPCC que dividen la región estudio en dos partes: Norte de Centroamérica (NCA) y Sur de Centroamérica (SCA) (Figura 4). Por lo que, de cada base de datos se extrajeron series de tiempo históricas y futuras de cada una de las 15 regiones. Los índices se analizaron también por punto de malla para posteriormente analizar mapas climatológicos anuales históricos y futuros que muestran el comportamiento espacial de los índices extremos de precipitación y temperatura en México, el sur de Estados Unidos y Centroamérica. Con los mapas históricos se evaluó el desempeño de los modelos globales con referencia a las observaciones de ERA5 (ver Sección 3.2). Mientras que con la información futura se calcularon y analizaron las proyecciones de cambio de los índices extremos para el EnsMCG y los modelos individuales bajo los dos escenarios de cambio climático (SSP2-4.5 y SSP3-7.0) y para los tres períodos del siglo XXI seleccionado con respecto al periodo histórico.

# 3.1 Métricas de evaluación

Para evaluar los MCG se utilizaron diversas métricas que se han registrado en la literatura, como el sesgo promedio, la métrica de desempeño de Taylor, la variabilidad relativa y la tendencia. Estas métricas se describen a continuación.

#### 3.1.1 Sesgo promedio

El sesgo o error medio es la diferencia entre los datos de una variable del modelo y los datos observados. Un valor positivo significa que el modelo sobrestima los datos observados; por el contrario, un valor negativo quiere decir que el modelo subestima los datos de referencia (Wilks, 2011).

$$Sesgo = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n} (Cm_k) - \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n} (Co_k) = \overline{Cm} - \overline{Co}$$
(1)

Donde  $Cm_k$  son los datos del modelo y  $Co_k$  son los datos observados durante un periodo de n años. Al calcular el sesgo, se debe de hacer con respecto a la climatología, ya que la cronología de los datos anuales de un modelo global no corresponde a los datos anuales observados por lo que no se espera que los modelos reproduzcan años específicos. No obstante, sí se espera que el modelo capture la climatología. Por tal motivo, en el presente trabajo, se calcula el sesgo entre la climatología de cada modelo y la de los datos observados de la serie de tiempo de los promedios regionales.

#### 3.1.2 Métrica de desempeño de Taylor (TS)

La métrica de desempeño de Taylor o Taylor Skill Score se ha utilizado en la literatura científica para evaluar a los MCG, ya que considera dos métricas importantes al evaluar los modelos, la correlación y la razón entre la varianza del modelo respecto a la varianza de los datos observados (Taylor, 2001). Tiene valores de 0 a 1, siendo S = 0 un bajo desempeño y S = 1 el desempeño ideal.

$$S = \frac{4(1+R)^{2}}{\left(\frac{\sigma_{m}}{\sigma_{o}} + \frac{\sigma_{o}}{\sigma_{m}}\right)^{2} (1+R_{0})^{2}}$$
<sup>(2)</sup>

Donde R es el coeficiente de correlación de Pearson,  $\sigma_m \gamma \sigma_o$  representa la desviación estándar del modelo y los datos observados, respectivamente, y R<sub>0</sub> es el coeficiente de correlación máximo; las métricas se calculan de forma horizontal, es decir de todos los puntos de malla entre modelo y observaciones. Mientras que otros índices evalúan la variabilidad temporal, este índice evalua la variabilidad espacial/horizontal.

#### 3.1.3 Variabilidad Relativa (RV)

Se define como la razón entre los coeficientes de variación del modelo y los datos observados. El coeficiente de variación temporal es la razón entre la desviación estándar y la media de una variable (Griffiths, 1967). RV = 1 indica que la variación del modelo y los datos observados es la misma, RV > 1 significa que el modelo sobrestima la variación de los datos observados y RV < 1 el modelo subestima la variación de los datos observados y RV < 1 el modelo subestima la variación de los datos observados.

$$RV = \frac{CV_m}{CV_2} \tag{3}$$

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{x}} \tag{4}$$

Donde  $CV_m \vee CV_o$  son el coeficiente de variación del modelo y de los datos observados, respectivamente.  $\sigma$  es la desviación estándar y  $\bar{x}$  la media temporal. Esta métrica se calcula para las series de tiempo de los índices de extremos en cada una de las 17 regiones analizadas.

# 3.1.4 Diagramas de cajas y bigotes (Boxplots)

El boxplot también conocido como diagrama de cajas y bigotes, es una herramienta gráfica de amplio uso que proporciona una visión rápida de la distribución de los datos (Wilks, 2011). Se compone de cinco cuartiles de muestra: el valor mínimo, el primer cuartil (Q1), la mediana (Q2), el tercer cuartil (Q3) y el

valor máximo. La caja central representa el rango intercuartil (IQR), que es la diferencia entre Q3 y Q1, abarcando el 75 % al 25 % de los datos. La línea interna de la caja indica la mediana. Los "bigotes" se extienden desde la caja hacia los valores extremos. Los valores atípicos se representan mediante puntos que sobrepasan los máximos en el diagrama (Figuras 10 y 13).

# 3.2 Tendencia

La tendencia se calculó para las series temporales anuales de todos los índices en cada uno de los puntos de la malla y en los promedios de cada una de las 15 regiones de la Figura 4 usando en forma independiente el reanálisis ERA5, los 10 MCG y EnsMCG. Se utilizó la pendiente de Sen (Sen, 1968) para calcular la tendencia y la prueba no paramétrica de Mann-Kendall (Kendall, 1948; Mann, 1945) para su significancia estadística al 95 % (valores de p <0.05). La prueba de Mann-Kendall y la pendiente de Sen se utilizaron en trabajos previos que analizan eventos extremos debido a que al ser no paramétrica es menos sensible a valores atípicos que los métodos más usados como el método de regresión por mínimos cuadrados (Cornes y Jones, 2013; Donat et al., 2013).

#### 3.2.1 Prueba no paramétrica de Mann-Kendall

La prueba estadística para la tendencia de Mann-Kendall se define como:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} sgn(x_j - x_i)$$
(5)

Donde *xi* y *xj* representan los valores consecutivos de los datos y n es el número total de datos en una serie de tiempo.

$$sgn(\Delta x) = \begin{cases} 1, \Delta x > 0 \\ 0, \Delta x = 0 \\ -1, \Delta x < 0 \end{cases}$$
(6)

La ecuación (5) toma valores positivos cuando el signo de la tendencia (ec. 6), representada por la sumatoria de los cambios, es creciente y cuando es negativa indica una tendencia descendente. La variabilidad de la pendiente (S) en una serie de tiempo está dada por:

$$Var(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^{m} t_i (t_i - 1)(2t_i + 5)}{18}$$
(7)

donde n es el número de datos, m es el número de valores repetidos y  $t_i$  el número de valores repetidos en el grupo i-ésimo. Un grupo empatado es un conjunto de datos de muestra que tienen el mismo valor. En los casos en que el tamaño de la muestra sea n > 10, se puede considerar el estadístico de prueba normal estándar Z (Wilks, 2011) para la significancia de S:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{Var(s)}}, & S > 0\\ 0, & S = 0\\ \frac{S+1}{\sqrt{Var(s)}}, & S < 0 \end{cases}$$
(8)

20

Para probar una tendencia monótona creciente o decreciente en un nivel de significancia, se rechaza H<sub>0</sub> (la hipótesis nula de no cambio) si el valor absoluto de  $Z_{p/2}$ , donde *p* representa el nivel de significancia elegido (normalmente 5 %, con  $Z_{0.05/2}$ ); la hipótesis nula es invalida, lo que significa que la tendencia es significativa y no ocurrió por casualidad.

#### 3.2.2 Pendiente de Sen

Se calculan las pendientes de puntos  $X_i$  y  $X_j$  y posteriormente se calcula la mediana de las pendientes siguiendo la siguiente ecuación:

$$M_{ij} = \left(\frac{X_j - X_i}{j - i}\right) \tag{9}$$

En esta ecuación,  $X_i$  y  $X_j$  representan valores en el tiempo j e i, donde j es después del tiempo i. La mediana de los n valores de  $M_{ij}$  es la pendiente de Sen (Sen, 1968).

# 4.1 Análisis histórico de índices extremos

# 4.1.1 Índices de temperatura

En esta sección se presenta el análisis histórico (1981-2010) de los patrones espaciales de los índices de temperatura extrema de ERA5 y del EnsMCG de los 10 modelos del CMIP6 analizados en este trabajo. En la figura 5a, índice TXx, se grafica la isoterma de 35° C, ya que se considera como el umbral a partir del cual podría representar un riesgo para la salud humana (Willett y Sherwood, 2012).

La temperatura máxima anual (TXx) observada con ERA5 (Figura 5a izquierda) muestra valores menores a 35°C en las regiones tropicales (HPL, CWM, CAM1 y CAM2), mientras que se observan valores arriba de este umbral en la región subtropical del dominio, en el norte de México y sur de Estados Unidos (CAs, DES, SBC, MNZ, ANM, HPL, TEX, NEM y SUS), especialmente en el Desierto de Sonora/Arizona (DES) y cerca de Mexicali donde TXx > 45°C. El EnsMCG (Figura 5a derecha) captura el patrón espacial de la isoterma de 35°C que delimita el norte de México y el Altiplano de la zona más tropical hacia el sur, aunque sobreestima la isoterma en Texas (TEX) y DES.

ERA5 muestra un patrón espacial norte/sur en el índice del mínimo anual de la temperatura mínima (TNn, Figura 5b izquierda), con TNn< -12° C en las Montañas Rocosas cerca de Arizona-Nuevo México (ANM) en el límite norte del dominio, mientras que en las zonas costeras tropicales de México y Centroamérica se observan TNn por encima de 10°C. En el centro del país se observan valores cercanos a 0° C y en Centroamérica y Cuba se alcanzan las temperaturas máximas de TNn (>20°C). El EnsMCG (Figura 5b derecha) subestima la TNn en ANM y la sobreestima en SBC, pero en general captura el patrón observado de esta variable en el dominio. Las temperaturas mínimas extremas pueden deberse a sistemas de baja presión (vaguadas) asociadas a la interacción de la corriente de chorro subtropical (Brito-Castillo et al., 2010) y al paso de frentes fríos (Luna-Niño et al., 2021).

El patrón espacial observado del rango diurno de temperatura (DTR Figura 5c izquierda) muestra rangos mayores hacia el oeste del dominio y menores al este. El reanálisis ERA5 tiene DTRs por encima de 12° C

en la Península de Baja California, el Suroeste de los Estados Unidos, la zona de la Sierra Madre Occidental y parte del Centro Oeste de México, es decir en las zonas semiáridas del dominio (SBC, DES, CAs, ANM, MNZ, HPL y CWM). Esto se debe en parte a la influencia de las altas subtropicales, en particular al sistema de alta presión del Pacífico Norte, lo que promueve días despejados y altas temperaturas durante el día; durante la noche el calor se escapa al espacio si no hay nubes que lo atrapen provocando temperaturas mínimas bajas, promoviendo así un amplio DTR (Donald Ahrens y Henson, 2009). Por otro lado, en la costa del Golfo de México, el sureste de los Estados Unidos, la Península de Yucatán y en la región caribeña de Centroamérica los contrastes son menores a 10° C.



**Figura 5.** Climatología histórica de a) Máximo anual de temperatura máxima (TXX), b) Mínimo anual de temperatura mínima (TNn) y c) Rango diurno de temperatura DTR) para ERA5 (izquierda) y la mediana del Ensamble de 10 modelos globales del CMIP6 (EnsMCG) (derecha). El contorno sólido en TXx representa la isoterma de 35° C. En el último mapa se muestran las regiones analizadas que aparecen en la Figura 4.

22
En las regiones tropicales o cercanas al Golfo de México el aire húmedo retiene el calor y emite una parte a la superficie de la Tierra en forma de radiación infrarroja, lo que mantiene las temperaturas mínimas más altas. Además, las zonas costeras generalmente tienen menores variaciones de DTR en comparación con las regiones tierra adentro, debido al vapor de agua adicional en el aire y a la capacidad del agua de calentarse y enfriarse más lentamente que el continente (Donald Ahrens y Henson, 2009). Por ejemplo, la región CAM2 está rodeada por mares cálidos por lo que es la región con menor DTR, es decir que hay poca diferencia entre la Tmax y Tmin. El EnsMCG (Figura 5c derecha) subestima el DTR en SBC, ANM y el CWM, pero captura el patrón espacial promedio observado de DTR.

# 4.1.2 Índices de precipitación

La precipitación anual (PRCPTOT, Figura 6a izquierda) muestra que las regiones con menor lluvia acumulada (PRCPTOT < 500 mm) con respecto a ERA5 son las regiones semiáridas (CAs, SBC, DES, ANM y HPL). Mientras que las zonas con mayor precipitación anual son las regiones tropicales (CWM, SWM, SEM) y el sureste de Estados Unidos con PRCPTOT >1500 mm. Cabe resaltar que la Península de Yucatán, a pesar de estar en la región tropical presenta valores de PRCPTOT menores a 1000 mm, debido a que es una región plana y muy cerca de la influencia del alta subtropical del Atlántico Norte (NASH, por sus siglas en inglés). En el otro extremo, la región de las Californias (CAs) se caracteriza por un clima mediterráneo semiárido por lo que sólo recibe lluvias en invierno (Pavia et al., 2006) y es la segunda región más seca después de DES. Los frentes fríos originados en las latitudes altas se desplazan hacia las latitudes tropicales durante otoño e invierno, generando vientos fuertes que soplan en dirección con componente norte en el norte de México y a lo largo de la costa del Golfo de México (Magaña et al., 2003; Luna-Niño et al., 2021). Estos eventos pueden traer gran contenido de humedad generar eventos extremos, especialmente en las regiones del Golfo de México (Luna-Niño y Cavazos, 2018).

El EnsMCG (Figura 6a derecha) reproduce los patrones espaciales de precipitación, tanto en las regiones secas y húmedas del dominio; se aprecia claramente la lengüeta de lluvia asociada al monzón, el déficit de lluvia en las regiones semiáridas y en el altiplano (HPL). No obstante, el EnsMCG subestima la lluvia anual en las zonas montañosas en México y Centroamérica, excepto en Panamá, donde se observan valores similares a los de ERA5.

La precipitación acumulada anual arriba del umbral P95 (R95p, Figura 6b izquierda) presenta patrones similares que los de PRCPTOT, en donde las regiones con menos lluvia acumulada por extremos son CAs,

SBC, DES y HPL (R95p < 200 mm). Por otro lado, el sureste de México y Centroamérica tienen zonas con lluvia extrema > 400 mm, mientras que en el sureste de los Estados Unidos (SUS) varía entre 200 y 400 mm. En estas últimas regiones, los eventos extremos de precipitación pueden asociase a distintos sistemas convectivos. Por ejemplo, en el verano las ondas del este, que a su vez son un mecanismo precursor de los ciclones tropicales, transportan una gran cantidad de humedad y pueden contribuir cerca del 50% de la precipitación acumulada en las costas de México y Centroamérica (Dominguez et al., 2020; Magaña et al., 2003).

Se ha observado que, en las regiones tropicales, los eventos extremos ocurren de forma más frecuente durante los veranos de períodos negativos de ENSO (La Niña) y durante la fase positiva de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) (Peralta-Hernández et al., 2009). Adicionalmente, La NASH induce vientos alisios en las zonas tropicales del Atlántico, el Caribe y el Golfo de México; en verano tiene una influencia importante en la intensidad del Jet del Caribe de Bajos Niveles (CLLJ, por sus siglas en inglés) y en primavera en la del Jet de las Grandes Planicies (GPLLJ). Esta interacción de la NASH con las corrientes de chorro regionales provoca un transporte (advección) de humedad hacia el continente, hacia Centroamérica, NEM, Texas y sureste de Estados Unidos, lo que influye parcialmente en la distribución de la precipitación extrema en algunas regiones (Durán-Quesada et al., 2017; Wang y Lee, 2007). Estos mismos autores y otros resaltan que las corrientes de chorro producen lluvias en las salidas del jet (como en las costas caribeñas de Centroamérica y a los lados de las Grandes Planicies), pero la inhiben a su paso las sombras orográficas. El EnsMCG (Figura 6b derecha) muestra patrones de R95p similares a ERA5 en todo el dominio, con mayor lluvia extrema en las zonas tropicales y menor en las zonas semidesérticas, pero como es de esperarse por ser modelos con resoluciones mayores a 100 km, subestima los valores máximos de lluvia en las regiones tropicales y con topografía montañosa en México y gran parte de Centroamérica.

La precipitación acumulada en 5 días/año (RX5day, Figura 6c izquierda) muestra patrones parecidos a las variables anteriores, pero con una mayor extensión territorial, y no tan localizado como en el caso de R95p. El EnsMCG (Figura 6c derecha) de los modelos logra capturar mucho mejor esta variable que el R95p, aunque sobrestima la lluvia en algunas regiones del centro de México y Sierra Madre del Sur. Se ha documentado que los eventos de El Niño tienden a favorecer la actividad de ciclones tropicales en el Pacífico norte (Martínez-Sánchez y Cavazos, 2014) y por lo tanto los extremos de lluvia. Además, los ríos atmosféricos de invierno contribuyen a los extremos en CAs, DES y AMN (Cavazos y Rivas 2004; Gershunov et al., 2019; Swain et al., 2018), así como la combinación de El Niño y la fase positiva del patrón Pacífico/Norteamérica (Luna-Niño et al., 2021).

# 1981-2010



**Figura 6.** Climatología histórica de a) Precipitación total (PRCPTOT), b) Precipitación por encima del percentil 95 (R95p) y c) Precipitación máxima de 5 días (Rx5day) para ERA5 (izquierda) y la mediana del Ensamble de 10 modelos globales del CMIP6 (EnsMCG) (derecha). En el último mapa se muestran las regiones analizadas que aparecen en la Figura 4.

El EnsMCG (Figura 7a derecha) reproduce muy bien los patrones espaciales de CDD; se aprecia claramente la división entre las zonas más secas y húmedas hacia el este y sur del dominio, aunque subestima los CDD en el CWM y los sobreestima en CAs y SBC. ERA5 muestra que las regiones semiáridas (CAs, DES, SBC, ANM) tienen más de 20 días con lluvias arriba de 10 mm (R10mm, Figura 7b izquierda), mientras que las regiones tropicales y más húmedas (MNZ, CWM, SWM, SEM, PYU y CAM) y el sureste de Estados Unidos tienen R10mm> 40 días. El EnsMCG (Figura 7b derecha) muestra patrones de días R10mm similares a ERA5 en todo el dominio, pero con más días de R10mm en las zonas tropicales y menos en las zonas semiáridas, mientras que subestima en la región del del monzón (MNZ). Por último, los días con lluvia muy intensa (R20mm, Figura 7c derecha) se presentan con baja frecuencia (< 10 días) en las regiones subtropicales, mientras que en las zonas tropicales se observan con el doble de frecuencia (R20mm > 20 días). El EnsMCG (Figura 7c izquierda) subestima los valores en SEM y los sobreestima en el centro-oeste de México (CWM).



**Figura 7.** Climatología histórica de a) Días Secos Consecutivos (CDD), b) Días con precipitación arriba de 10mm (R10mm) y c) Días con precipitación arriba de 20mm (R20mm). En el último mapa se muestran las regiones analizadas que aparecen en la Figura 4.

El patrón de PDO puede influir en la distribución de la precipitación en México; durante la fase positiva se produce un flujo de humedad desde el Océano Pacífico hacia México y el sur de Estados Unidos que tiende a favorecer la precipitación (Englehart y Douglas, 2002; Méndez y Magaña, 2010; Mendoza et al., 2014; Pavia et al., 2006). Por otra parte, el noroeste de México y el suroeste de los Estados Unidos experimentan una disminución de la precipitación extrema, durante la fase positiva de la Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO), mientras que en las costas del Golfo de México se incrementa (Curtis, 2008; Enfield et al., 2001).

# 4.2 Evaluación del desempeño de los MCG

En esta sección se analizan cuatro métricas estadísticas (sección 3.1) para evaluar el desempeño individual de los 10 CMIP6 y el EnsMCG que se muestran en la Tabla 2 comparados con ERA5 para cada una de las 15 regiones estudiadas (Figura 4). Para cada ICE de temperatura y precipitación se describen el sesgo promedio, el puntaje de desempeño de Taylor (Taylor Skill Score), la variabilidad relativa (RV) y finalmente diagramas de cajas y bigotes.

# 4.2.1 Índices de temperatura

En casi todos los modelos los sesgos positivos más grandes (> 3° y 4° C) de TXx (Figura 8a) se observan en el norte del dominio desde CAs hasta SUS, con excepción del Noreste de México (NEM) donde los sesgos son menores a 1° C. Mientras que los sesgos más pequeños (< 1° C) se observan en las regiones tropicales. Los modelos con menos sesgo son CNRM-CM6-1, EC-Earth3 y GFDL-ESM4.

Los modelos y su EnsMCG subestiman por -4° C aproximadamente el índice de TNn (Figura 8d) en casi todas las regiones, pero en especial las regiones subtropicales (CAs, DES, SBC, ANM, MNZ, HPL, NEM y TEX) y por ende también en la región NCA del IPCC (que cubre casi todas estas regiones). Los modelos sobrestiman TNn ligeramente (más cálidos) en las regiones del sur, sureste de México (SEM) y Centro América (CAM1 Y CAM2). Casi todos los modelos tienden a subestimar el rango del ciclo diurno de temperatura (DTR, Figura 8g) en la mayoría de las regiones (DTR < -0.5° C), excepto en las regiones semiáridas (CAs, DES y SBC). Es interesante notar que los sesgos de los tres índices de temperatura (TXx, TNn y DTR) son mayores en la región NCA del IPCC que en SCA, posiblemente porque hay más contrastes de temperatura en el norte.

En la métrica de variabilidad relativa (Figura 8b, e y h) se observa que en general los modelos tienden a sobreestimar la variabilidad de TXx y DTR, mientras que la subestiman en TNn (principalmente en las regiones norte). Los modelos con menor variabilidad relativa (RV, Figura 8c) de TXx son el GFDL-ESM4 y el HadGEM3-GC3-LL con valores entre 0.8 y 1.2. El EnsMCG tiene en general un buen desempeño (VR cercano

a 1) excepto en CAs, MNZ y CMW (VR > 1.3). La región NCA del IPCC tiene valores entre 1.20 y 1.30 y SCA entre 0.9 y 1.10 en la mayoría de los modelos, excepto por BCC-CSM2-MR y MPI-ESM1-2-HR que tienen variabilidad 0.6 y 0.8.

Los modelos ACCESS-CM2, BCC-CSM2-MR, EC-Earth3 tienen el mejor desempeño con valores cercanos a 1. El modelo EC-Earth3 tiene mejor puntaje de desempeño (TS) al simular mejor a las temperaturas extremas (TXx y TNn) con valores mayores a 0.6 en casi todo el dominio (Figura 8c, f e i), mientras que el TS en los demás modelos varía de 0.4 a 0.6 en la mayoría de las regiones. Los modelos con desempeño más bajo de TXx son el ACCESS-CM2, BCC-CSM2-MR y UKESM1-0-LL. El EnsMCG mejora el rendimiento de los modelos individuales, con valores de 0.6 a 0.8 en más de la mitad de las regiones. Los modelos que tienen el mejor desempeño (TS >0.6, Figura 8 c, f e i) para simular TNn y DTR son CNRM-CM6-1, EC-Earth3 y GFDL-ESM4, mientras que ACCESS-CM2 y BCC-CSM2-MR de nuevo tienen los valores más bajos (< 0.6).

En general, en los índices de temperatura (TXx, TNn y DTR) se observa que los modelos tienen problemas en las regiones semiáridas de CAs, SBC, algunas regiones tropicales y Centro América. Aunque los modelos simularon bien el patrón promedio oeste-este del DTR (Figura 5), tienen problemas para simular adecuadamente su correlación espacial (Taylor Skill) y variabilidad con los datos observados; el mejor desempeño se observó en el NEM, TEX y SUS.

Aunque los modelos simularon bien el patrón promedio oeste-este del DTR (Figura 5), tienen problemas para simular adecuadamente su correlación y variabilidad (Taylor Skill) con los datos observados; el mejor desempeño se observó en el NEM, TEX y SUS.

Los sesgos de los índices de percentiles de días extremos de temperatura (Figura 9a, d y g) muestran un mayor acuerdo entre regiones y modelos que los índices anteriores. Los modelos sobrestiman el porcentaje de días extremos cálidos (TX90p >1 % de días, Figura 9d) en las regiones semiáridas (CAs, DES, SBC, ANM, MNZ, HPL) y en Centroamérica (CAM1 Y CAM2).

En el porcentaje de días con temperatura mínima arriba del percentil 90 (TN90p, Figura 9e) se observa que las regiones tropicales (SEM, CWM, SWM, PYU, CAM1 y CAM2) es en donde los modelos tienden a subestimar este índice y por tal motivo el sesgo promedio en SCA es negativo. Sin embargo, en las regiones subtropicales los sesgos son menores, pero sin acuerdo general, es decir, en las zonas semiáridas y desérticas (CAs, DES y SBC) los modelos sobreestiman, mientras en el resto subestiman (MNZ, ANM, ALT). En las regiones TEX y SUS tienen valores muy bajos, por lo que en NCA los sesgos son casi cero; estas

variaciones regionales son las que no podemos ver en las grandes regiones del IPCC. Los sesgos de mayor magnitud de TN90p se observan en PYU (< -1% de días) y en CAM1 (> 1.5 % de días).

Todos los modelos sobreestiman TN10p, aunque las regiones con mayores sesgos (>1.5% de días del 10%) son las monzónicas (MZN y ANM) y CAM2 en Centroamérica. La mayoría de los modelos subestima la RV de los índices de percentiles (Figura 9b, e y h) en varias regiones, principalmente en SBC, ANM y HPL y la sobreestima en las regiones tropicales y en Centroamérica.



**Figura 8.** Mapas de calor del Sesgo (a, d, g), Variabilidad Relativa (b, e, h) y Taylor Skill (c, f, i) de tres índices de temperatura TXx, TNn y DTR, derivados de 10 modelos del CMIP6 y su Ensamble relativos al reanálisis ERA5 para el periodo 1981-2010 en las 15 regiones analizadas, más las dos grandes regiones del IPCC (NCA y SCA). Los errores más pequeños en la primera columna son los colores más claros, en la segunda columna los rojos y azules más fuertes y en la tercera columna los rojos intensos.

Los modelos MPI-ESM1-2-HR y MRI-ESM2-0 son los que tienen más regiones con variabilidad relativa cercana a 1. La métrica de Taylor de los índices de percentiles (Figura 9c, f e i) muestra que los MCG no logran capturar los patrones espaciales de forma adecuada (TS< 0.4), lo que es consistente con resultados a escala global y para otras regiones del mundo (Fan et al., 2020; Zhu et al., 2020). Por lo tanto, los resultados de percentiles y sus escenarios futuros podrían tener más incertidumbre que los otros índices.



**Figura 9.** Mapas de calor del Sesgo (a, d, g), Variabilidad Relativa (b, e, h) y Taylor Skill (c, f, i) de tres índices de percentiles TX90p, TN90p y TN10p, derivados de 10 modelos del CMIP6 y su Ensamble relativos al reanálisis ERA5 para el periodo 1981-2010 en las 15 regiones analizadas, más las dos grandes regiones del IPCC (NCA y SCA). Los errores más pequeños en la primera columna son los colores más claros, en la segunda columna los rojos y azules más fuertes y en la tercera columna los rojos intensos.

Los diagramas de caja de la Figura 10 complementan las Figuras anteriores (8 y 9) facilitando la comparación de los valores promedio, la mediana y extremos de cada índice de temperatura en cada región y en cada base de datos. Los diagramas muestran que en general el EnsMCG (rojo) reduce significativamente la dispersión y los valores atípicos (diamantes rojos) de los errores individuales de los modelos (verde) y se acerca más a las observaciones de ERA5 (azul), aunque el EnsMCG sigue teniendo los sesgos que se mencionaron en los mapas anteriores. En las regiones de PYU, SEM, NEM la mediana del EnsMCG, de los modelos y de ERA5 coinciden. En contraste, la zona donde se presentan más datos anómalos es nuevamente en las regiones semiáridas (mediana >35° C), mientras que en las regiones tropicales está por debajo de 35° C, excepto PYU donde TXx está cerca de 38° C. Por lo que, en las dos regiones del IPCC, NCA tiene temperaturas máximas extremas entre 35° C y 37° C, mientras que en SCA varía entre 31° C y 34° C y lo mismo se observa en el EnsMCG, aunque algunos de los modelos alcanzan los 35° C.

En general, la mediana de TNn (Figura 10c) del EnsMCG y los modelos es menor a la de ERA5. Las zonas con más valores atípicos son las regiones desde CAs hasta SUS, con excepción de MNZ, mientras que en el trópico donde es más cálido y húmedo hay un buen acuerdo con ERA5. En las regiones del IPCC se observa que las medianas de TNn son más frías en el norte que en el sur (cercanas a 0° C y >15° C, respectivamente). Las mayores variaciones de DTR (Figura 10e) se observan en el noroeste (DES, ANM y MNZ) (>10° C) y las menores variaciones se presentan en CAM (<5° C). Los datos más anómalos se observan en ANM y HPL.

La media de los índices de los percentiles representa el 10% superior de los días más calientes de Tmax (TX90p Figura 10b) o de Tmin (TN90p Figura 10d), o los más fríos de Tmin (TN10 Figura 10f). Lo que se observa es que la mediana de las observaciones y de los modelos varía ligeramente por arriba o por debajo del 10 %. Los modelos individuales (Figura 10b, d y f) (cajas verdes) presentan muchos datos atípicos en todas las regiones, lo que indica que los modelos tienden a sobrestimar los percentiles de estas variables.



**Figura 10.** Diagramas de cajas y bigotes del de los seis índices de temperatura para las 15 regiones analizadas y las dos grandes regiones del IPCC (NCA y SCA) durante el periodo 1981-2010 con las 3 bases de datos. La primera caja (azul) representa a ERA5, la caja del centro (roja) al EnsMCG de 10 modelos del CMIP6 y la tercera caja (verde) la distribución de todos los modelos. Los marcadores horizontales en rojos representan la mediana y los diamantes los valores atípicos. Los diagramas de la derecha son con respecto al 10% de los días extremos analizados.

# 4.2.2 Índices de precipitación

En esta sección se analizan las métricas para evaluar el desempeño individual de los modelos y el EnsMCG para simular los índices climáticos regionales de precipitación comparados con las observaciones (ERA5). Como en la sección anterior, primero se muestra el sesgo promedio, luego el puntaje de desempeño de Taylor (TS) y la Variabilidad relativa (RV) y después los diagramas de cajas y bigotes de todos los índices de precipitación.

Los modelos presentan principalmente sesgos positivos de la precipitación total anual (PRCPTOT, Figura 11a) en las zonas subtropicales; es decir, los modelos sobreestiman los datos observados. Por otro lado, en las zonas tropicales, donde llueve más, se observan sesgos negativos, especialmente en SEM, CAM1 y CAM2 donde la mayoría de los modelos subestiman la precipitación hasta en 600 mm/año. Las regiones CAs y DES son las zonas con menores sesgos (< 200 mm), pero esto es relativo porque son las regiones más secas del dominio. En la región NCA se observa que hay sesgos positivos mayores a 200 mm y en la región SCA la mayoría de los modelos tiene sesgos negativos y en algunos modelos son < -400 mm como BCC-CSM2-MR y CNRM-CM6-1.

Los sesgos asociados al índice RX5day (Iluvia máxima acumulada en 5 días, Figura 11 d) indican que los modelos sobrestiman en las regiones semiáridas (CAs, DES, SBC, MNZ, HPL) y subestiman en las regiones más húmedas del sur y sureste de México y Centroamérica. MPI-ESM1-2-HR y EC-Earth3 tienen los sesgos de mayor magnitud < -100 mm.

El índice R95p (Figura 11 g) los MCG tienen en general sesgos bajos (R95p < 80 mm), siendo las regiones tropicales en donde se observan los valores más grandes, especialmente CAM1 y CAM2 en las que se observan la mayor subestimación, es decir, subestiman los procesos asociados a la lluvia convectiva en esa región. Algunos modelos como el MRI-ESM2-0, MPI-ESM1-2-HR y BCC-CSM2-MR tienen sesgos de hasta - 120 mm. Es decir, que los MCG-CMIP6 tienden a subestimar los eventos extremos de precipitación en las zonas tropicales y a sobreestimarlos en regiones subtropicales en comparación con ERA5.

De acuerdo con la métrica de Variabilidad Relativa muestra un buen resultado (RV cercana a 1) para PRCPTOT (Figura 11 b) en casi todos los modelos en las regiones subtropicales. Los modelos con el mejor desempeño son el BCC-CSM2-MR, EC-Earth3, GFDL-ESM4 y HadGEM3-GC31-LL con RV entre 0.9 y 1.1. En la zona tropical, los modelos también tienen un buen desempeño en CAM2 con RV entre 0.9 y 1.0. El índice RX5day (Figura 11e) tiene menor variabilidad en DES, SUS y SWM (entre 0.9 y 1.1). R95p (Figura 11h)

muestra menor RV (< 0.5) en las regiones semiáridas (CAs, DES, ANM y MNZ). En general el EnsMCG mejora la variabilidad en comparación con los modelos individuales.

La última métrica, el desempeño de Taylor (Figura 11c, f e i) muestra que los modelos reproducen mejor los patrones espaciales de precipitación en las regiones DES, ANM, MNZ, HPL, TEX y PYU, mientras que tienen más problemas en las regiones tropicales y SUS donde llueve más (TS < 0.4). En el índice PRCPTOT (Figura 11c) los modelos tienen un buen desempeño (TS>0.6) en las regiones subtropicales. El peor desempeño lo tuvieron ACCESS-CM2, BCC-CSM2-MR y UKESM1-0-LL. Los modelos reproducen adecuadamente los patrones espaciales de RX5day (TS >0.6; Figura 11f) en las regiones DES, SBC, MNZ y TEX, pero no (TS <0.4) en las regiones más húmedas del dominio (SUS, SEM, SWM, PYU, CAM1 y CAM2). R95p (Figura 11i) muestra el mismo patrón espacial que los anteriores índices. El mejor modelo es nuevamente EC-Earth3 y el que tiene menor desempeño es MPI-ESM1-2. El EnsMCG mejora el desempeño de los modelos individuales con Taylor de 0.6 a 0.8 en las regiones más secas, por lo que la región NCA del IPCC tiene el Taylor Skill más alto en la mayoría de los modelos (0.6 a 0.8) en comparación con SCA (0.2 a 0.4) donde el desempeño es malo.



**Figura 11.** Mapas de calor de Sesgo (a, d, g), Variabilidad Relativa (b, e, h) y Taylor Skill (c, f, i) de tres índices de precipitación, PRCPTOT, RX5day y R95p derivados de 10 modelos del CMIP6 y su Ensamble relativos al reanálisis ERA5 para el periodo 1981-2010 en las 17 regiones analizadas. Los errores más pequeños en la primera columna son los colores más claros, en la segunda columna los rojos y azules más fuertes y en la tercera columna los rojos intensos.

Los índices de frecuencia (CDD, R10mm y R20mm, Figura 12a, d y g) siguen un patrón parecido a los índices de intensidad, ya que los modelos tienden a sobreestimar los días asociados a estos índices en las regiones subtropicales, excepto CDD en CAs donde la mayoría de los modelos lo subestiman en 30 días. Los índices R10mm y R20mm tienen sesgos negativos (<-5 días) en las regiones subtropicales.

La mayoría de los modelos subestiman los días asociados a las lluvias acumuladas de R10mm y R20mm en las regiones tropicales, pero especialmente los modelos BCC-CSM2-MR, EC-Earth3, GFDL-ESM4 y HadGEM3-GC31-LL. En las regiones del IPCC el índice R10mm, NCA tiene sesgos positivos cercanos a 5 días y en SCA los modelos subestiman en 5 días. En R20mm las regiones del IPCC tienen sesgos cercanos a 0 días.

Los modelos sobrestiman ligeramente la variabilidad de CDD (Figura 12b) en las zonas tropicales (RV=1.1); el peor desempeño de los modelos se observa en las regiones semiáridas (CAs, DES y SBC, RV>1.3). La variabilidad de R10mm y R20mm (Figura 12e y h) se sobrestima ligeramente en las regiones tropicales y se subestima en las zonas semiáridas (CAs, DES), donde los eventos son menos frecuentes que en los trópicos. En las regiones del IPCC SCA tiene mejor desempeño que NCA.

El desempeño de Taylor (Figura 12c, f e i) indica que los modelos reproducen mejor los patrones espaciales en las regiones subtropicales (TS >0.6), mientras que tienen dificultades en las regiones más húmedas del dominio (TS < 0.4). En el índice CDD (Figura 12c) los MCG tienen un desempeño de Taylor entre 0.6 y 0.8 con EC-Earth3, CNRM-CM6-1 y HadGEM3-GC31-LL en los subtrópicos (excepto en CAs). El peor desempeño lo tuvieron ACCESS-CM2, BCC-CSM2-MR y NorESM2-MM.

El EnsMCG mejora el desempeño de los modelos individuales, con valores de 0.6 a 0.8 en la mayoría de las regiones. La región subtropical NCA presenta valores de TS>0.6, mientras que la región húmeda (SCA) TS <0.6.

Los índices R10mm y R20mm (Figura 11f e i) reproducen los patrones espaciales adecuadamente del desempeño de Taylor (TS >0.6) en las regiones subtropicales (DES, SBC, MNZ y TEX), pero no reproducen la distribución espacial (TS <0.4) en las regiones con mayor precipitación (SUS, SEM, SWM, PYU, CAM1 y CAM2) ni en la región ANM. El mejor modelo es nuevamente EC-Earth3 y el que tiene peor desempeño es BCC-CSM2-MR.

En las regiones resumen del IPCC los índices R10mm y R20mm presentan valores de TS mayores en la región NCA (>0.6) que en SCA (<0.6). El EnsMCG tiene un mejor desempeño que los modelos individuales en la mayoría de las regiones.

En general los índices de frecuencia (CDD, R10mm y R20mm) muestran un mejor desempeño en las regiones subtropicales que en las regiones más húmedas de las regiones tropicales, con excepción de la región de las Californias (CAs) y el Sur de Estados Unidos.



**Figura 12.** Mapas de calor de Sesgo (a, d, g), Variabilidad Relativa (b, e, h) y Taylor Skill (c, f, i) de tres índices de frecuencia, CDD, R10mm y R20mm derivados de 10 modelos del CMIP6 y su Ensamble relativos al reanálisis ERA5 para el periodo 1981-2010 en las 17 regiones analizadas. Los errores más pequeños en la primera columna son los colores más claros, en la segunda columna los rojos y azules más fuertes y en la tercera columna los rojos intensos.

Los diagramas de cajas indican que en general los modelos individuales y el EnsMCG sobrestiman la PRPCTOT (Figura 13a) en las zonas subtropicales, mientras que en el trópico (SEM, PYU, CAM1 y CAM2) la subestiman, excepto en CWM donde el reanálisis ERA5 tiene lluvia acumulada anual menor que los modelos y el EnsMCG. La mediana del EnsMCG coincide con ERA5 en las regiones CAs, ANM y SUS.

La mediana de PRCPTOT en la zona tropical del dominio varía de 1500 a 2000 mm, con excepción de PYU y CWM, que es menor. En las dos regiones del IPCC se observa el claro contraste de menos a más lluvia entre las regiones subtropicales y tropicales del domino.

Los modelos tienden a sobrestimar el Índice RX5day (Figura 13c) en todas las regiones del dominio, pero donde se presentan más valores atípicos es en NEM y TEX. Los modelos capturan bien la mediana de R95p (Figura 13e) en las regiones desérticas del dominio, pero las regiones más húmedas los modelos la subestiman en más de 100 mm.

La mediana de los índices de frecuencia (Figura 13b, d y f) del EnsMCG coincide con las observaciones en la mayoría de las regiones, aunque el EnsMCG subestima los días secos (Figura 13 b) en SBC y CWM; R10mm y R10mm (Figura 13 d y f) coinciden en la mediana en las regiones subtropicales, pero los días se subestiman en SEM, SWM y CAM1 y se sobreestiman en CWM.



**Figura 13.** Diagramas de cajas y bigotes de los índices de precipitación para las 15 regiones y las dos del IPCC durante el periodo 1981-2010 con las 3 bases de datos. La caja azul representa a ERA5, la caja roja al EnsMCG de los modelos y la caja verde los datos de todos los modelos. La línea roja dentro de las cajas representa la mediana y los diamantes rojos los valores atípicos.

#### 4.2.3 Resumen de métricas

Resumir la evaluación de los 10 MCG-CMIP6 y su ensamble con las métricas de desempeño es compleja por el número de regiones (17) analizadas con los 12 índices de temperatura y precipitación. Sin embargo, este ejercicio es importante para determinar cuáles son los mejores modelos para el área de estudio y qué variables y regiones son más problemáticas para simular. Por lo tanto, en esta sección se muestra un resumen cuantitativo del desempeño espacial y temporal de los 12 índices, así como un promedio del desempeño de los seis índices de temperatura y los seis índices de precipitación y el promedio de los 12 índices. Este ejercicio es importante para determinar los "mejores" modelos en la región de acuerdo con las métricas y variables utilizadas.

Para construir el promedio regional de desempeño se utilizaron las métricas del sesgo, Desempeño de Taylor (TS) y la variabilidad relativa (VR). Se calculó en qué regiones los modelos y el EnsMCG tuvieron métricas más cercanas a las observaciones, considerando los siguientes umbrales de buen desempeño: sesgo < 2 desviaciones estándar, TS > 0.6 y VR entre 0.75 y 1.25. Posteriormente se calculó el porcentaje de las 15 regiones analizadas donde los modelos cumplieron con estos umbrales de calidad (o umbrales de buen desempeño). Los resultados se muestran en el mapa de calor de la Figura 14.

Los modelos que tiene mejor desempeño en los índices de temperatura son el MPI-ESM1-2-HR, CNRM-CM6-1, EC-Earth3, MRI-ESM2-0, GFDL-ESM4 y ACCESS-CM2. En el caso de los índices de precipitación son EC-Earth3, GFDL-ESM4, ACCESS-CM2, HadGEM3-GC31-LL, NorESM2-MM y CNRM-CM6-1 (> 50% de las regiones).

El EnsMCG muestra un mejor desempeño que la mayoría de los modelos individuales tanto en los índices de precipitación como los de temperatura, similar a lo encontrado en otros trabajos (Srivastava et al., 2020). En promedio, el EnsMCG reproduce adecuadamente los índices de precipitación en el 56 % de las regiones (8 de 15 regiones) y un 64 % en los índices de temperatura (10 de 15 regiones).

En conclusión, los mejores modelos globales analizados para la región de estudios son: EC-Earth3, GFDL-ESM4, ACCESS-CM2, CNRM-CM6-1, HadGEM3-GC31-LL y MPI-ESM1-2-HR. El modelo EC-Earth3 resultó ser el mejor modelo y es el que tiene la resolución espacial más fina (0.7° × 0.7°).

Los índices en los que se obtuvieron los menores porcentajes de calidad fueron los índices de percentiles (TN90, TN10) y el rango diurno de temperatura DTR, es decir, que los modelos no reprodujeron



adecuadamente estos índices en más del 50% de las regiones, por lo que presentan mayores incertidumbres.

**Figura 14.** Mapa de calor con el desempeño promedio de cada modelo y el Ensamble, EnsMCG, (eje Y) para simular cada índice climático (eje X) con respecto a ERA5 en las 15 regiones analizadas. Las últimas tres columnas indican el porcentaje de regiones donde se cumplieron con los parámetros de buen desempeño para cada uno de los índices de temperatura, precipitación y el promedio de ambos.

# 4.3 Escenarios futuros de los índices climáticos

En esta sección se presentan los resultados de las proyecciones futuras y tendencias de los índices climáticos regionales de temperatura y precipitación para tres periodos del siglo XXI (2021-2040, 2041-2060 y 2080-2099) bajo dos escenarios climáticos de bajas emisiones (SSP2-4.5) y altas emisiones (SSP3-7.0). En la Sección 4.3.3 se describen las tendencias y se incluye el periodo histórico (1981-2010) para poner en perspectiva los cambios esperados en el siglo XXI. En la última Sección 4.3.4 se presentan mapas que resumen de forma cuantitativa los cambios de los índices en cada región del dominio.

## 4.3.1 Escenarios de los índices de temperatura

En esta sección se presentan las proyecciones de cambio de los seis índices de temperatura en formas de mapas y diagramas de calor. En el anexo B se muestran las Tablas 10 y 11 que indican los valores del cambio a finales de siglo para el EnsMCG.

Los cambios del índice de temperatura máxima extrema (TXx) (Figura 15a-f) en el futuro cercano (2021-2040) bajo los escenarios de bajas (SSP2-4.5) y altas (SSP3-7.0) emisiones podría incrementarse de 1° C a 2° C en casi toda la región, excepto en Texas (TEX) donde hay zonas con temperatura máxima extrema de hasta 3° C, en la isoterma de 35° se observa poca variación en ambos escenarios (línea punteada) respecto a la histórica (línea continua).

En el futuro a mediano plazo (2041-2060) los cambios que predominan en los dos escenarios de emisiones (Figura 15b y e) son de 2° C a 3° C en casi todo el dominio, excepto en algunas zonas del Monzón de Norteamérica (MNZ), el altiplano (HPL) y la península de Yucatán (PYU) donde se proyectan incrementos de 1° a 2° C, y en este periodo ya se observa una expansión en la isoterma de 35°C. Por otro lado, en el futuro lejano (2080-2099) se ven las mayores diferencias entre los dos escenarios SSP2-4.5 y SSP3-8.5 (Figura15 c y e), mientras el primero tiene proyecciones entre 3 y 4°C, en el segundo van de 4 a 6 °C, por lo que en este periodo se observa una reducción considerable del contorno de 35°C, siendo más abrupta en el escenario de altas emisiones.

El índice de temperatura mínima extrema (TNn) (Figura 15g-I) muestra un comportamiento e incrementos similares a TXx en ambos escenarios. En el futuro cercano (Figura 15g y j) los aumentos de TNn podrían ser entre 1° C y 2° C en todo el dominio para cada escenario. A mediano plazo en ambos escenarios se observan incrementos de 1 a 3 °C en casi todas las regiones (Figura 15h y k), aunque se observan mayores incrementos en TEX, ANM y HPL de más de 3° C para el escenario SSP3-7.0. En el futuro lejano nuevamente se observan las mayores diferencias entre los escenarios (Figura 15 i y l), mientras que en el escenario de bajas emisiones (SSP2-4.5) se observan incrementos <3° C en las zonas tropicales de México y Centroamérica y mayores a 4° en las regiones subtropicales (ANM, HPL, TEX y SUS), el escenario de altas emisiones SSP3-7.0 proyecta incrementos de 3 a 4° en las zonas tropicales y mayores de 5° C en las regiones del norte del dominio.

El índice del rango diurno de temperatura (DTR) (Figura 15m-r) sugiere decrementos de <-0.5° C en las regiones del monzón (MNZ) y el altiplano (HPL) para ambos escenarios en el futuro cercano, pero en el

futuro a mediano plazo muestra incrementos (>0.5°C) en las regiones tropicales (CWM, SWM, SEM, PYU y CAM). A finales de siglo las zonas de tropicales podrían tener incrementos de DTR en casi 1°C en ambos escenarios y decrementos de -0.5 a -1.5°C en algunas regiones semiáridas de México (CAS, DES y MNZ, HPL) y SUS.



**Figura 15.** Cambios futuros de los índices anuales de temperatura TXx (a-f), TNn (g-l) y DTR (m-r) (° C) del EnsMCG bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP3-7.0 durante los periodos 2021-2040, 2041-2060 y 2080-2099. En los mapas de TXx se indica la isoterma de 35° C histórica (línea continua) y la futura (línea quebrada).

Con los mapas se logran apreciar las proyecciones de cambio del EnsMCG y de manera general en todo el dominio. En cambio, con los mapas de calor de la Figura 16 se observan las proyecciones de cambio no sólo del EnsMCG, sino también de cada MCG y cada región en una forma más cuantitativa utilizando los mismos periodos y escenarios.

Las tablas asociadas a las proyecciones de cambio del EnsGCM se encuentran en el anexo B, Tabla 10 y 11. La mayoría de los modelos proyectan aumentos de temperatura máxima extrema (TXx, Figura 16a y d) entre 0.5° C y 2° C. En la zona tropical, algunos modelos proyectan cambios menores a 1° C, especialmente el modelo GFDL-ESM4 y el MPI-ESM1-2-HR en ambos escenarios. En el futuro a mediano plazo (Figura 16b y e) los aumentos podrían ser entre 2° C y 3° C para ambos escenarios. Las regiones que muestran los mayores aumentos son TEX y SUS, con incrementos superiores a los 3° C. Finalmente en el futuro lejano (Figura 16c y f), los mayores incrementos (>5° C) podrían ocurrir en las regiones al norte del dominio (ANM, TEX y SUS).

La temperatura mínima extrema (TNn, Figura 16g y j) muestra incrementos similares a los del índice TXx, cambios entre 1° C y 2° C en el futuro cercano. Sin embargo, en el noroeste y bajo el escenario de altas emisiones, varios modelos no proyectan cambios (GFDL-ESM4, MPI-ESM1-2-HR, MRI-ESM2-0, NorESM2-MM). En el futuro a mediano plazo (Figura 16h y k), los mayores incrementos se concentran en las regiones subtropicales, con cambios de TNn > 3° C en los modelos CNRM-CM6-1, EC-Earth3 y UKESM1-0-LL. En el futuro lejano (Figura 16i y I) algunas regiones subtropicales (SUS, TEX, NEM y HPL) podrían tener aumentos de hasta 5° C.

El rango diurno de temperatura (DTR) (Figura 16m y p) proyecta cambios entre -0.5° C y 0.5° C en el futuro cercano y a mediano plazo (Figura 16n y q) para ambos escenarios. En el futuro lejano (Figura 16r y s) se esperan una reducción de este rango, principalmente en las regiones semiáridas (CAs, DES y SBC), así como incrementos superiores a 0.5° C en CWM. La mediana del EnsMCG proyecta incrementos de DTR < 0.5° C en casi todo el dominio y en los tres periodos, excepto en las regiones semiáridas.

En los dos escenarios de TX90p (Figura 17a y d) predominan aumentos entre 10 % y 20 % de días extremos en el futuro cercano en gran parte del dominio, excepto en las regiones semiáridas donde no se ven cambios significativos. A mediano plazo (Figura 17b y e), el centro oeste y la costa del Pacífico proyectan aumentos de 30 % a 40 % de días cálidos, mientras que en CAM los cambios son superiores al 40 %. Finalmente, a largo plazo (Figura 17c y f) en el EnsMCG predominan aumentos de 20 % a 40 % de días cálidos en gran parte del territorio en el escenario de bajas emisiones y cambios superiores al 40 % en la costa del Pacífico y Centroamérica. En el escenario de altas emisiones más de la mitad de la región de estudio proyecta incrementos mayores al 40 % de días cálidos, excepto en CAs, DES, NEM, TEX y SUS con cambios entre 30 y 40%.



**Figura 16.** Proyecciones de Cambio promedio regional (eje X) de los índices anuales de temperatura TXx (a-f), TNn (g-l) y DTR (m-r) (° C) de acuerdo con cada modelo utilizado y el EnsMCG (eje Y) para los escenarios SSP2-4.5 y SSP3-7.0 durante 2021-2040, 2041-2060 y 2080. Los cuadros grises indican que no hay datos.

El índice TN10p o índice de noches frías bajo ambos escenarios en el futuro cercano (Figura 17g y j) podría presentar una disminución de -6 % a -5 % en las noches frías en gran parte del territorio, principalmente

en la costa del Pacífico y en Centroamérica. En el futuro a mediano plazo (Figura 17h y k), se proyecta un decremento uniforme de -8 % de días en ambos escenarios, excepto en TEX y SUS donde es > -8 % de días. Finalmente, en el futuro lejano (Figura 17i y o), ambos escenarios proyectan reducciones de más del -9 % en casi todo el territorio, excepto en HPL, TEX, SUS y NEM bajo el escenario SSP2-4.5 que varían entre -7 y -9%.

El EnsGCM muestra incrementos de noches cálidas (TN90p, Figura 17m y p) < 20% de días bajo ambos escenarios en casi todo el dominio, excepto en las zonas tropicales (TN90p>20% de días) y en las regiones semiáridas (TN90p< 10% de días). Para el futuro a mediano plazo (Figura 17n, q) los incrementos podrían ser > 30 % en las regiones tropicales (SEM, CWM, SWM, PYU) y CAM para ambos escenarios. Finalmente, en el futuro lejano (Figura 170 y r) los mayores incrementos (>50% de días) podrían ocurrir en las regiones tropicales de México y Centroamérica en ambos escenarios, mientras que en las regiones subtropicales se proyectan cambios de 30% a más de 40% bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP3-7.0 respectivamente.

Ahora pasando a los cambios por región y por modelo, se observa que la mayoría de los modelos muestran incrementos por región de acuerdo con los días cálidos (TX90p, Figura 18a y d) < 20% de días en la mayoría de las regiones, excepto en CAM2 (>20% de días) y en las regiones semiáridas donde son < 10% de días. En el futuro a mediano plazo (Figura 18b y e) los incrementos podrían ser > 30 % en las regiones tropicales (SEM, CWM, SWM, PYU) y CAM para ambos escenarios. Finalmente, en el futuro lejano (Figura 18c y f) los mayores incrementos (>50% de días) podrían ocurrir en las regiones tropicales de México y Centroamérica. Los modelos que proyectan menores incrementos en los tres periodos son el MPI-ESM1-2-HR, BCC-CSM2-MR y MRI-ESM2-0, por otro, los más cálidos son el ACCESS-CM2, UKESM1-0-LL y el EC-Earth3 que sugieren incrementos de mayor magnitud a la mayoría de los modelos.

El índice TN10p tiene cambios entre -7 % y -8% de noches frías en casi todas las regiones en el futuro a cercano y mediano plazo (Figura 18g, h, j y k) para ambos escenarios. Los modelos con cambios de menor magnitud al promedio son el GFDL-ESM4, MPI-ESM1-2-HR y el BCC-CSM2-MR. A finales de siglo (Figura 18i y I) en casi todas las regiones el cambio es <-10 % de días.

Finalmente, el índice de noches cálidas en ambos escenarios y en todo el periodo (TN90p, Figura 18m-r) sigue un patrón similar a los otros índices, pero con menor cambio en las latitudes más altas (CAs, DES, SBC, ANM, MNZ, etc.). Los MCG que sugieren menor cambio son el BCC-CSM2-MR, GFDL-ESM4 y el MPI-ESM1-2-HR.



**Figura 17.** Cambios futuros de los índices de temperatura TX90p (a-f), TN10p (g-l)) y TN90p (m-r) anuales (° C) del EnsMCG bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP3-7.0 durante los periodos 2021-2040, 2041-2060 y 2080-2099.

Los cambios en el futuro cercano y a mediano plazo (Figura 18m, n, p y q) en las regiones subtropicales sugieren aumentos de hasta 20 % de noches cálidas. En el futuro lejano (Figura 18o y r) las regiones del Golfo de México y Centroamérica tienen incrementos de más de 60 %; GFDL-ESM4 es el único modelo que proyecta cambios <50 % en casi todas las regiones en el futuro en el escenario de bajas emisiones.



**Figura 18.** Proyecciones de cambio promedio regionales (eje X) de los índices anuales de temperatura TX90p (a-f), TN10p (g-l) y TN90p (m-r) (% días) de acuerdo con cada modelo utilizado y el EnsMCG (eje Y) para los escenarios SSP2-4.5 y SSP3-7.0 durante 2021-2040, 2041-2060 y 2080. Los cuadros grises indican que no hay datos.

Los modelos en la Figura 18 muestran un claro acuerdo en el signo de los cambios de los índices de los percentiles en los tres periodos futuros y se observa un patrón similar al del EnsMCG de la Figura 17 en donde los cambios mayores estaban en las regiones de la costa del Pacífico y el sur del dominio.

#### 4.3.2 Escenarios de los índices de precipitación

Esta sección muestra los escenarios de cambio de los índices de precipitación. Los cambios de PRCPTOT para ambos escenarios en el futuro cercano (2021-2040, Figura 19a) son muy pequeños (-5 % a 5 %) en casi toda la región de estudio, excepto en CAs, DES, MNZ y HPL para el escenario de altas emisiones (>15%). En el futuro a mediano plazo (2041-2060, Figura 19b y e), podría haber incrementos > 10 % en CAs, DES y SUS, caso contrario a las regiones tropicales (SWM, SEM, PYU y CAM) que proyectan cambios de -10 % a 5 % en algunas zonas. En el futuro lejano (2080-2099, Figura 19c y f), los cambios que podrían ocurrir son mayores, con incrementos en HPL y SUS (>15%) y decrementos (<-15%) en las regiones tropicales para el escenario de altas emisiones.

El índice RX5day en ambos escenarios del futuro cercano (Figura 19g y j) muestra incrementos entre 5 % y 10 % en casi todo el dominio, excepto en algunas regiones como SUS, TEX y en partes de HPL en donde hay cambios negativos. En el futuro a mediano plazo (Figura 19h y k), el escenario de bajas emisiones produce aumentos de RX5day >30 % de días en DES, parte del altiplano y NEM, mientras que el escenario de altas emisiones genera los mayores incrementos en NEM y SUS. Finalmente, en el futuro lejano (Figura 19i y l), el escenario de bajas emisiones proyecta cambios positivos en casi toda la región; en SBC y NEM podría haber incrementos >30 % de lluvia intensa acumulada en 5 días. En el escenario de altas emisiones se observan incrementos >30 % en CAs, DES, HPL y SUS y cambios negativos cercanos a 0 en las regiones tropicales y Centroamérica, excepto en Panamá (>30 %).

Parcialmente consistente con los resultados anteriores, los dos escenarios de la lluvia acumulada extrema (R95p) muestran incrementos > 40% anual en CAs, el norte de DES y parte del altiplano en el futuro cercano y a mediano plazo (Figura 19m, n, p y q). En el escenario de bajas emisiones se observan más regiones en el centro y norte de México con valores >40% que en el escenario de altas emisiones. Finalmente, en el futuro a largo plazo (Figura 19o y r) los mayores incrementos (>40 %) de lluvias extremas podrían ocurrir en la península de Baja California, el altiplano y el sur de los Estados Unidos. En contraste, en el escenario de altas emisiones las regiones tropicales podrían experimentar una reducción < -20 % en este índice.

En general, la precipitación total podría disminuir en las regiones tropicales y la precipitación extrema (R95py RX5day) podrían incrementarse en más de la mitad del territorio, principalmente en la región subtropical y el altiplano de México.



**Figura 19.** Cambios futuros de los índices PRCPTOT (a-f), RX5day (g-l)) y R95p (m-r) anuales (%) del EnsMCG de los modelos para los escenarios SSP2-4.5 y SSP3-7.0 durante 2021-2040, 2041-2060 y 2080-2099 con respecto al periodo histórico 1981-2010.

Los diagramas de calor (Figura 20) complementan los mapas anteriores (Figura 19) al mostrar las proyecciones de cambio de cada modelo y región. Se observa que la PRCPTOT podría tener incrementos entre 5 % y 15 % en las regiones subtropicales (CAs, DES, SBC, ANM, MNZ) en el futuro cercano (Figura 20a y d) de acuerdo con ambos escenarios, mientras que las regiones tropicales (CWM, SWM, SEM, NEM, SUS

y CAM) podrían experimentar cambios negativos, pero muy pequeños (-5 %). En el futuro a mediano plazo (Figura 20b y e), nuevamente las regiones subtropicales muestran cambios positivos y las tropicales negativos. Finalmente, en el futuro a largo plazo (Figura 20c y f) casi todos los modelos tienen cambios negativos (<20%) en la mayoría de las regiones, excepto NorESM2-MM, UKESM1-0-LL y ACCES-CM2 que sugieren cambios positivos (>20%) en las regiones subtropicales y cambios negativos en las regiones tropicales. La región NCA muestra que a finales de siglo no hay un claro acuerdo entre los modelos, ya que la mitad sugiere un incremento y la otra mitad lo contrario, mientras que SCA muestra un mayor acuerdo hacía un decremento de precipitación total.

Para el índice RX5day se observan incrementos positivos (>5%) en el futuro a corto y mediano plazos (Figura 20g, h, j y k), aunque hay un menor acuerdo en el signo del cambio en las regiones de CAs, DES, SBC y Centroamérica (CAM1 y CAM2) en ambos escenarios. En el escenario de bajas emisiones (SSP2-4.5), los modelos modelo HadGEM3-GC31-LL, ACCESS-CM2 y UKESM1 muestran los incrementos más altos (>10%) en casi todas las regiones (Figura 20g, h y i). En el escenario de altas emisiones (SSP3-7.0) (Figura j, k y l) el modelo ACCESS-CM2 y BCC-CSM2-MR tienen las regiones con incrementos >20 %. Los desacuerdos en el signo del cambio se presentan en las regiones tropicales; MPI-ESM1-2-HR es el modelo que tiene decrementos en estas regiones, mientras que la mayoría de los modelos simulan incrementos. En el escenario de altas emisiones (Figura 20i, k y l) hay un mayor acuerdo en el signo del cambio; los de mayor magnitud (entre 15 % y 20 %) están en las regiones de CAs, DES, SBC y SUS. Finalmente, en el futuro a largo plazo (Figura 20c y f), los incrementos de RX5day se proyectan principalmente en las regiones subtropicales, pero en el escenario de altas emisiones (As pero de altas emisiones de RX5day se proyectan principalmente en las regiones subtropicales, pero en el escenario de altas emisiones hay un mayor desacuerdo en estas regiones. Los modelos MPI-ESM1-2-HR y MRI-ESM2-0 tienen zonas con cambios contrarios a los de la mayoría de los modelos.

La lluvia acumulada arriba del percentil 95 (R95p) también muestra incrementos (hasta 30%) en las regiones de CAs, DES y SBC en ambos escenarios y en el futuro cercano (Figura 20m y p), mientras que no hay un acuerdo en el signo del cambio en las regiones tropicales. En el futuro a mediano plazo (Figura 20n y q) las regiones de clima semiárido siguen teniendo incrementos similares al periodo anterior, pero MPI-ESM1-2-HR y EC-Earth3 sugieren decrementos, mientras que la mayoría de los modelos sugieren aumentos de R95p. Finalmente, a largo plazo (Figura 20o y r) casi todas las regiones subtropicales tienen un cambio positivo de 20 % a 30 % en la lluvia extrema acumulada (R95p) y en las regiones tropicales (< - 15 %) en algunos modelos del escenario de altas emisiones. Las regiones del IPCC, NCA muestran incrementos >20 % y SCA muestra discrepancias en el signo del cambio en los modelos.



**Figura 20.** Proyecciones de cambio (en %) promedio regional (eje X) de los índices anuales de precipitación PRCPTOT (a-f), RX5day (g-l) y R95p (m-r) de acuerdo con cada modelo utilizado y el EnsMCG (eje Y) para los escenarios SSP2-4.5 y SSP3-7.0 durante 2021-2040, 2041-2060 y 2080. Los cuadros grises indican que no hay datos.

En resumen, los escenarios de cambio de la precipitación muestran más incertidumbres (mayores desacuerdos) que los de temperatura. Podría haber incrementos pequeños en la precipitación total acumulada en las regiones subtropicales del dominio o cercanos a 0, aunque la mayoría de los modelos sugieren cambios negativos (> -10%). Los escenarios indican posibles incrementos de la lluvia máxima acumulada en 5 días (RX5day) en casi todas las regiones, pero el HadGEM3-GC31-LL tiene signo opuesto principalmente en las regiones tropicales. La precipitación extrema muestra cambios parecidos,

incrementos en las latitudes más altas y el centro de México, pero decrementos en el escenario de altas emisiones, sin un acuerdo en el signo del cambio. Lo que parece claro, es que, aunque en las regiones subtropicales los cambios en precipitación podrían ser pequeños, hay un mejor acuerdo en que las lluvias extremas podrían incrementarse.

Los cambios de los índices de frecuencia de precipitación en el escenario de bajas y altas emisiones sugieren que en el futuro cercano (Figura 21a y d) el índice de días secos consecutivos (CDD) podría incrementarse (>10 días) en HPL y CWM y reducirse en CAs (<-10 días). En el futuro a mediano plazo (Figura 21b y e) con el escenario de bajas emisiones en toda la costa del Pacifico podría aumentar la frecuencia de CDD (>10 días), mientras que en el escenario de altas emisiones el cambio de esta magnitud se extiende a otras regiones, excepto en SUS y TEX. Finalmente, a largo plazo (Figura 21c y f) en el escenario de bajas emisiones los días secos se incrementan (> 10 días) en casi todas las regiones del noroeste, centro y suroeste de México, excepto en CAs donde se siguen presentando decrementos <-10 días. En el escenario de altas emisiones del Golfo de México y la península de Yucatán.

Los dos escenarios muestran que en el futuro cercano el índice R10mm (Figura 21g y j) podría incrementarse >1 día en MNZ, CWM y CAM2 y en el mediano plazo (Figura 21h y k) > 2 días en SUS. En el Sureste de México y CAM predominan los cambios <3 días. Finalmente, en el futuro lejano (Figura 21i y l) SEM, CWM, PYU y CAM podrían tener reducciones de R10mm <-5 días. El índice R20mm muestra cambios pequeños (de -1 a 1 días) en casi toda la región de estudio y en los dos escenarios para el futuro cercano y al mediano plazo (Figura 21 m, n, p y q), mientras que en el futuro lejano (Figura 21o y r) el EnsMCG proyecta cambios <-4 días en CWM, PYU y CAM1.

En resumen, los dos escenarios proyectan incrementos en los índices de frecuencia de precipitación a finales de siglo, en los días secos consecutivos (CDD > 10 días) en casi toda la región de estudio, excepto en CAs donde se presentan decremento < -10 días. En el índice de días con precipitación arriba de 10 milímetros (r10mm) podría haber incrementos (> 5 días) en el escenario de bajas emisiones en el sureste de Estados Unidos y en CAM2 y decrementos (< -5 días) en el centro y sureste de México para ambos escenarios. Por último, SUS y CAM2 muestran los incrementos más altos (> 3 días) en el índice de días con precipitación por encima de 20 mm (r20mm) para el escenario de bajas emisiones, mientras que el escenario de altas emisiones muestra decrementos (< -4 días) en CWM y en CAM1.



**Figura 21.** Cambios futuros de los índices CDD (a-f), R10mm (g-l) y R20mm (m-r) anuales (días) del EnsMCG bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP3-7.0 durante 2021-2040, 2041-2060 y 2080-2099 con respecto al periodo histórico 1981-2010.

El diagrama de calor en el futuro cercano (Figura 22a y d) bajo ambos escenarios observan decrementos en el índice CDD en la mayor parte de las regiones, excepto en CAs. En las regiones tropicales hay un mayor acuerdo en el signo del cambio, con incrementos de hasta de 4 días. En el futuro a mediano plazo (Figura 22b, e) los modelos sugieren incrementos en CDD (> 4 días). Finalmente, en el futuro lejano (Figura 22c y f) los modelos proyectan cambios >10 días en ambos escenarios. R10mm en el futuro a corto plazo (Figura 22g y j) tiene cambios entre 0 y 1 días en la mayoría de las regiones. Conforme avanza el siglo, se nota un mayor contraste entre las regiones subtropicales al norte y las tropicales al sur. A finales de siglo (Figura 20i y l) en el escenario de altas emisiones predominan los decrementos entre -4 y -5 días, principalmente en SEM, CWM, SWM, PYU y en Centroamérica (R10mm <-5 días). Los escenarios del índice R20 mm muestran cambios similares al índice anterior. A finales de siglo (Figura 22o y r) en general se observan cambios entre 0 y 1 días para casi todos los periodos y todos los escenarios.



**Figura 22.** Proyecciones de Cambio (en días) promedios regionales (eje X) de los índices anuales de precipitación CDD (a-f), R10mm (g-l) y R20mm (m-r) de acuerdo con cada modelo utilizado y el EnsMCG (eje Y) para los escenarios SSP2-4.5 y SSP3-7.0 durante 2021-2040, 2041-2060 y 2080. Los cuadros grises indican que no hay datos.

En resumen, a finales de siglo los dos escenarios experimentan incrementos en los días secos consecutivos (>10 días) en casi toda la región de estudio, aunque en las regiones de las Californias no hay un acuerdo claro en el signo del cambio. En el índice de días con precipitación arriba de 10 milímetros podría haber decrementos (<-5 días) en el centro y sureste de México en ambos escenarios y el signo del cambio tiene un mayor acuerdo que en las regiones al norte del dominio. Por último, en el índice de días con precipitación por encima de 20 mm no hay un acuerdo claro en el signo del cambio, pero la mayoría de los modelos sugieren decrementos (<-3 días) en las regiones al sur, sureste de México y Centroamérica.

#### 4.3.3 Tendencias históricas y futuras

En esta sección se presentan las series de tiempo de los índices de temperatura extrema (TXx) y precipitación total (PRCPTOT) para de las 15 regiones analizadas. La primera mitad del eje X presenta los valores históricos del índice PRCPTOT (mm), a partir de 2021 se presentan las anomalías (%) respecto a la climatología histórica.

En la Figura 23 se muestra del lado izquierdo el espagueti de TXx de los modelos y su EnsMCG durante el periodo de referencia (1981-2010), así como el valor promedio de acuerdo con ERA5. Los modelos siguen una tendencia positiva en casi todas las regiones, similar a ERA5, pero en las regiones subtropicales sobrestiman el promedio observado. En las regiones DES, TEX, ANM y CAs se observan los valores más altos, donde la temperatura extrema promedio de ERA5 supera los 35° C, mientras que en las regiones más tropicales TXx <35° C. En la segunda parte de las series de tiempo se muestran los escenarios de cambio de TXx durante el siglo XXI, los cuales continúan aumentando especialmente con el escenario más alto. El escenario de bajas emisiones (SSP2-4.5) presenta posibles aumentos de TXx > 4° C para finales de siglo en las regiones del noroeste del dominio (DES, ANM, DES) y en el altiplano, mientras que con el escenario de altas emisiones (SSP3-7.0) el incremento podría llegar a ser >5° C en las mismas regiones. Los cambios de los dos escenarios son muy parecidos en todas las regiones hasta el 2070 aproximadamente, cuando los escenarios empiezan a separarse para producir aumentos entre 2.5 y 5.5° C entre las bajas y altas emisiones, respectivamente.

Las series temporales del índice PRCPTOT para el periodo histórico 1981-2010 y los escenarios de cambio para el siglo XXI se muestran en la Figura 24. En las regiones del noroeste del dominio se observa la menor precipitación total (<400 mm en CAs y DES).



**Figura 23.** Series de tiempo de TXx (° C) de ERA5 y el promedio del EnsMCG de los modelos del CMIP6 para el periodo 1981-2010 (eje Y izquierdo) y los cambios futuros del 2020 al 2100 (eje Y derecho) para los escenarios SSP2-4.5 (azul) y SSP3-7.0 (rojo). La línea verde representa a ERA5, la línea negra al EnsMCG histórico de los modelos. Las líneas grises representan el espagueti de variación de todos los modelos.

Las regiones más húmedas son las regiones de los trópicos en México y Centroamérica (> 1000 mm). No se observa un claro signo en la tendencia histórica en la mayoría de las regiones, excepto en DES, HPL, MNZ y AZN (entre -11%/dec y -18 %/dec, ver Tabla 5 Anexo B).

Los escenarios futuros sugieren anomalías negativas de entre -1 y -20 % en la mayoría de las regiones para el escenario de bajas emisiones, excepto en las regiones del noroeste (CAs, DES, SBC y ANM), pero con una alta variabilidad interanual. En el escenario de SSP3-7.0 los cambios son parecidos a los de SSP2-4.5 en las regiones subtropicales. La anomalía positiva más grande podría presentarse en CAs, DES y SBC (>20 %) con el escenario de altas emisiones, pero de nuevo con una alta variabilidad interanual. En las regiones tropicales la anomalía cambió de cerca de 0 en el escenario de bajas emisiones a <-20 % aproximadamente en el escenario de altas emisiones; este cambio se observa claramente en las Figuras 21 y 22.



**Figura 24.** Series de tiempo de PRCPTOT de ERA5 y el promedio del EnsMCG de los modelos del CMIP6 para el periodo 1981-2010 (eje Y izquierdo) y los cambios futuros del 2020 al 2100 (eje Y derecho) para los escenarios SSP2-4.5 (azul) y SSP3-7.0 (rojo). La línea verde representa a ERA5, la línea negra al EnsMCG histórico de los modelos. Las líneas grises representan el espagueti de variación de todos los modelos. Los valores históricos de CAM2 son más grandes que el límite del eje Y (> 2000 mm).

Las Tablas 5 y 6 (Anexo B) muestran los valores de las tendencias históricas de los índices de extremos y no extremos de temperatura y precipitación para el ERA5 y el Ensamble, respectivamente. A continuación, se resumen los resultados más importantes.

La base observada tiene tendencias positivas en la mayoría de las regiones para los índices TXx, TNn y DTR. La región HPL tiene una tendencia positiva y significativa en los 3 índices (0.4° C/dec, 0.6° C/dec y 0.3° C/dec respectivamente). Los índices de percentiles muestran una tendencia positiva (TX90p y TN90p) en la mayoría de las regiones y negativas para TN10p. Son significativas en MNZ y HPL, >2% / dec para TX90p y TN90p y < -1% para TN10p.

Los índices PRCPTOT y R95p muestran principalmente tendencias significativas negativas (<-10 %/dec) en ANM y MNZ y positivas (>7% /dec y >20%/dec para cada índice) en CAM2. RX5day muestra tendencias positivas (>9 %/dec) y significativas en CAM.

CDD sugiere tendencias positivas (1.9 de días/dec hasta 14 de días/dec) y significativas en la mayoría de las regiones. R10mm y R20mm tiene tendencias negativas (-0.3 de días/dec a 4 de días/dec) en casi todas las regiones, siendo significativas en ANM, MNZ; en CAM2 son positivas y significativas.

El Ensamble (Tabla 6, Anexo B) logra capturar las tendencias significativas de los índices de temperatura (TXx, y TNn) en todas las regiones. DTR tiene tendencias cercanas a 0 en la mayoría de las regiones. Los índices de percentiles sugieren tendencias significativas en todas las regiones; la principal diferencia es Tn10p que muestra tendencias negativas mayores a lo observado. En los índices de precipitación (PRCPTOT, R95p y RX5day) el Ensamble no muestran una significancia estadística. Los índices de frecuencia muestran tendencias positivas (aunque de menor magnitud) en CDD y negativas en R10mm y R20mm.

Las Tablas 7 y 8 (Anexo B) resumen los valores de las tendencias regionales de los índices de temperatura y precipitación para el escenario de bajas emisiones (SSP2-4.5) y altas emisiones (SSP3-7.0). En el primer escenario los índices TXx y TNn sugieren tendencias positivas y estadísticamente significativas en todas las regiones.

Las regiones ANM, HPL, NEM, TEX, SUS (>0.4° C/dec); DTR tiene tendencias positivas y significativas (>0.1° C/dec) en regiones tropicales de México (NEM, SEM, CWM y SWM). Los índices TX90p y TN90p muestran tendencias positivas y significativas >2 % de días/dec en todas las regiones. El índice TN10p presenta tendencias negativas y significativas en casi todas las regiones <-0.2 % de días. El escenario SSP3-7.0 (Tabla 7, Anexo B) indica tendencias de mayor magnitud en TXx y TNn son positivas (>0.5° C/dec) y estadísticamente significativas en todas las regiones. El DTR presenta una tendencia positiva y significativa (0.1 %/ dec) en SEM, SWM y CAM1. Los índices TX90p y TN90p muestran tendencias positivas y significativas y significativas (>4% de días/dec). El índice TN10p tiene tendencias negativas y significativas y significativas (<-0.4% de días).

La precipitación total para el escenario SSP2-4.5 (Tabla 6, Anexo B) muestra tendencias negativas en casi todo el dominio y significativas en las regiones tropicales (-1 % y -3 %/dec). R95p presenta tendencias en su mayoría positivas entre 1 %/dec y 2.9 %/dec y significativas en CAs, DES, HPL, NEM, TEX, SUS y PYU. Rx5day también muestra tendencias positivas y significativas > 0.7 %/dec en DES, SBC, ANM, MNZ, HPL, NEM, TEX y SUS. Los días secos (CDD) muestran incrementos en casi todas las regiones (>1.5 días/dec) y significativos en CAs, DES, SBC y SWM. Consistente con el incremento de días secos, R10mm presenta reducciones pequeñas (<-0.15 días/dec) y significativas en más de la mitad de las regiones; R20mm <-10 días/dec en SEM, CWM, SWM, PYU y CAM.

En el escenario SP3-7.0 las tendencias son < -2% en las regiones tropicales en el índice PRCPTOT; R95p y Rx5day muestran tendencias positivas y significativas(>1%/dec) en las regiones DES, HPL, NEM, TEX, SUS. CDD muestra tendencias positivas y significativas en todas las regiones. Los índices R10mm y R20mm sugieren tendencias negativas y cercanas a 0.

# 4.3.4 Resumen regional de los cambios futuros

A continuación, se presentan mapas con diagramas que resumen los cambios del signo promedio proyectados para el futuro lejano (2080-2099) por el consenso del EnsMCG para los distintos índices de temperatura (Figuras 15 y 16) y precipitación (Figuras 17 y 18). La magnitud de estos cambios varía según se pueden encontrar en las Tablas 9 y 10 del Anexo B.

Los índices de temperatura sugieren cambios positivos de TXx y TNn en todas las regiones del dominio de estudio. DTR en el escenario SSP2-4.5 (Figura 25a) proyecta aumentos en todas las regiones excepto en CAs, DES. Algo similar se observa en el escenario SSP3-7.0 (Figura 25b), pero no hay consenso en las regiones MNZ, HPL y TEX.

Los cambios en la precipitación extrema (R95p) muestra un consenso de aumento en todas las regiones del dominio con el escenario de bajas emisiones (Figura 26a), lo que es consistente con los mapas de la Figura 23 y 24 las Tablas 9 y 10 del Anexo B.

La precipitación acumulada proyecta disminuciones en la mayoría de las regiones, excepto en las zonas semiáridas (CAs, DES, SBC, ANM) y PYU. Los días secos consecutivos podría aumentar en todas las regiones, excepto en CAs. En el escenario de altas emisiones (Figura 25b) también proyecta incrementos en la precipitación extrema, principalmente en las regiones subtropicales (CAs, DES, SBC, ANM, MNZ, HPL, NEM, TEX y SUS) y en el sur de Centroamérica. Por otro lado, podrían presentarse decrementos en la lluvia acumulada total en las regiones tropicales (CWM, SWM, SEM, PYU, CAM1 y CAM2), así como en algunas regiones del Golfo de México (SUS y NEM).



**Figura 25.** Mapa esquemático con el resumen de los cambios promedio del EnsMCG cuando hay un consenso en el signo (2/3 de los modelos con aumento o disminución) de los índices de temperatura (TXX, TNN, DTR) para el periodo 2080-2099 para los escenarios a) SSP2-4.5 y b) SSP3-7.0.


**Figura 26.** Mapa esquemático con el resumen de los cambios promedio del EnsMCG cuando hay un consenso en el signo (2/3 de los modelos con aumento o disminución) de los índices de precipitación (R95p, PRCPTOT, CDD) para el periodo 2080-2099 para los escenarios a) SSP2-4.5 y b) SSP3-7.0.

En esta tesis se hizo un análisis regional de 12 índices climáticos extremos de temperatura y precipitación con 10 modelos globales del CMIP6 y su ensamble (EnsGCMs) en 15 regiones para un periodo histórico y varios periodos del siglo XXI. Primero se realizó un análisis histórico y se evaluaron los 10 modelos globales, encontrando que los modelos simulan adecuadamente los patrones espaciales del clima promedio y los extremos climáticos de México, el sur de Estados Unidos y Centroamérica lo que es consistente con Almazroui et al. (2021a). Sin embargo, los modelos muestran algunas diferencias regionales con las observaciones que se discuten a continuación y que no se observan en estudios previos que se basan únicamente en dos grandes regiones del IPCC que cubren la región de estudio (e.g. Avila-Diaz et al., 2023; Gutiérrez et al., 2021).

En la evaluación histórica, se encontró que los modelos presentan sesgos positivos de TXx en Texas (TEX) y el sureste de Estados Unidos (SUS), consistente con Ajjur y Al-Ghamdi (2021) y Kim et al. (2020). Mientras que, en casi toda la región subtropical del dominio los modelos tienden a subestimar las temperaturas extremas frías (TNn) en similar a varios trabajos que utilizaron modelos del CMIP6 (Kim et al., 2020; Li et al., 2021). En general, los MCG tienen dificultades en capturar las colas de los extremos de los índices de percentiles de temperatura (TX90p, TN90p y TN10p), especialmente en regiones de topografía compleja, posiblemente debido a su baja resolución espacial. Respecto a los índices de precipitación, se observó que los modelos capturaron el patrón general, sin embargo, tienden a subestimar su intensidad en las zonas tropicales y a sobreestimarla en áreas subtropicales, principalmente la precipitación extrema, similar a lo reportado por Li et al. (2021). Además, los modelos presentan sesgos negativos de la PRCPTOT en el sur de Estados Unidos, lo que concuerda con los resultados de Srivastava et al. (2020). Dichas diferencias pueden ser debidas a que los modelos tienen distinta sensibilidad climática por lo que responden diferente a los mecanismos regionales de retroalimentación entre la Tierra y la atmósfera (Chen y Sun, 2015; Dong et al., 2015; Sillmann et al., 2014)

Respecto a los modelos, se muestra que los que tuvieron el mejor desempeño espacial y temporal en los índices de extremos de temperatura y precipitación son el EC-Earth3, GFDL-ESM4, ACCESS-CM2, CNRM-CM6-1, HadGEM3-GC31-LL y MPI-ESM1-2-HR. Cabe resaltar que, EC-EARTH3 es el modelo de más alta resolución espacial (0.7°x0.7°) y el que tuvo el mejor de desempeño, y los modelos que le siguieron fueron de mediana y baja resolución. Esto es consistente con la literatura, ya que el desempeño no está necesariamente relacionado con la resolución del modelo (Akinsanola et al., 2020; Avila-Diaz et al., 2023).

En general, la mediana del EnsMCG tiene un mejor desempeño que la mayoría de los modelos individuales para los 12 índices analizados, también consistente con otros resultados en la literatura (e.g. Srivastava et al., 2020).

Todos los MCG tienen sesgos, pero han ido disminuyendo con las nuevas fases del CMIP, con el aumento en la resolución espacial y la mejora de las parametrizaciones y los módulos físicos, especialmente los que se conocen como Modelos Sistema-Tierra (Earth System – ES). Aun así, se han documentado otros sesgos en los modelos del CMIP6 como el calentamiento excesivo en los océanos tropicales, especialmente del lado oriental debido a problemas en la representación de fenómenos como el afloramiento costero y la interacción entre las aguas superficiales y la atmósfera, afectando la estabilidad atmosférica y la formación de nubes (Abdelmoaty et al., 2021; Moreno-Chamarro et al., 2022).

Algunos modelos presentan una doble Zona Intertropical de Convergencia (ITCZ), identificados por dos máximos de precipitación a los lados del Ecuador en lugar de uno. Este error se relaciona con problemas en el presupuesto de energía, la convección atmosférica profunda y la temperatura de la superficie del mar (Tian y Dong, 2020). Sin embargo este sesgo ha ido disminuyendo en los MCG, particularmente en los modelos acoplados de alta resolución que han mejorado la interacción océano-atmósfera (Moreno-Chamarro et al., 2022).

En la literatura se ha documentado la detección del incremento de los eventos extremos de temperatura respecto a la media anual a escala global y en diferentes regiones del mundo. Esto es consistente con lo observado en nuestro dominio de estudio que muestra tendencias positivas históricas de los índices de temperatura en todas las regiones analizadas (Figura 23), aunque no todas son significativas (Tabla 5, Anexo B). Se encontraron tendencias positivas en los índices de percentiles (TX90p y TN10p) y TXx y negativas (TN10p) en latitudes tropicales consistente con otros trabajos (Aguilar et al., 2005; Zarazúa Villaseñor et al., 2014). También consistente con Peterson et al., (2008), las temperaturas extremas mínimas (TNn) están aumentando en las regiones subtropicales (Loikith y Broccoli, 2014). El índice DTR muestra pequeñas tendencias positivas en la mayoría de las regiones, algunos trabajos sugieren ligeros incrementos de este índice a escala global (e.g. Huang et al., 2023), pero dependiendo la región de estudio también se han encontrado decrementos(e.g. Guan et al., 2022).

En las regiones tropicales se encontraron tendencias históricas positivas de la precipitación extrema, pero no son significativas en la mayoría de las regiones, consistente con la literatura (Aguilar et al., 2005; Peralta-Hernández et al., 2009; Pérez-Morga et al., 2013). Estos aumentos podrían estar parcialmente relacionados con el Niño durante el invierno o con La Niña durante el verano (Pavia et al., 2006). Las tendencias positivas de PRCPTOT y R95p en el noroeste de México son consistentes con Arriaga-Ramírez y Cavazos (2010). Estos aumentos están parcialmente relacionados con la PDO y la precipitación extrema en la región occidental de México podría deberse al impacto de ciclones tropicales (Cavazos et al., 2008; Farfán et al., 2014).

Los escenarios futuros muestran tendencias positivas y significativos de TXx (> 0.3°/dec) y de otros extremos de temperatura máxima en la región de estudio durante el siglo XXI (Figuras 23 y 27 y Tabla 8 Anexo B). Se sabe que estos incrementos podrían derivar en un aumento de eventos de precipitación extrema, siguiendo la relación de Clausius Clapeyron que indica que por cada aumento de 1° C la precipitación se incrementa en un 7%, pero este incremento podría ser mayor en las latitudes más altas (Asadieh y Krakauer, 2015; Chen et al., 2011; Zhao et al., 2023).

Diversos estudios a escala global (e.g Sillmann et al., 2013b) y para otras regiones del mundo muestran que los modelos proyectan cambios positivos en los índices de temperatura extrema. A nivel mundial los cambios proyectados en la temperatura extrema (TXx) son de aproximadamente 5.5° C para el escenario de altas emisiones (SSP4-8.5) y de 20 mm a nivel global en el índice de RX5day (Almazroui et al., 2021b; Ajjur y Al-Ghamdi, 2021) para finales de siglo. Mientras que, a nivel regional, los cambios proyectados en esta tesis indican que el aumento de TXx < 4.5°C con el escenario SSP3-7.0. Los eventos extremos de temperatura máxima en el futuro a mediano plazo podrían incrementos entre 2° C y 3°C con el escenario SSP3-7.0 en las dos regiones del IPCC (Figura 27). Estos incrementos de TXx son mayores a lo encontrado por Avila-Diaz et al. (2023) en las mismas regiones, mientras que los cambios en R95p son consistentes con Zhao et al. (2023). Las ligeras discrepancias con los trabajos anteriores podrían deberse al periodo, escenario y modelos analizados, dado que estos autores se enfocan en periodos ligeramente diferentes al nuestro.

El EnsMCG muestra resultados similares a los del Atlas del IPCC (Gutiérrez et al., 2021): un acuerdo en los índices de TXx y TNn en toda la región de estudio y un acuerdo en la mayoría de los modelos con el decremento de PRCPTOT en zonas de SCA. De forma regional se observa un acuerdo en SWM y PYU (disminución de PRCPTOT). Por otro lado, como lo predice la teoría, la precipitación extrema (R95p) podría incrementarse especialmente en las regiones del norte del dominio (Figuras 27 y 28); en CAs, HPL y SUS podría aumentar más de 30%; mientras que la precipitación máxima de 5 días, RX5mm, podría incrementarse > 30 % en CAs, DES, HPL y SUS con el escenario SSP3.7. Aunque la Figura 27 indica un intenso calentamiento en todo el dominio en los últimos 20 años del siglo 21, el R95p no responde igual al aumento

de temperatura en las regiones subtropicales y tropicales; los cambios de R95p son más pequeños y hasta negativos en algunas regiones tropicales en donde se esperan reducciones de precipitación más generalizadas.

Es posible que la evaporación en las regiones tropicales no sea suficiente para saturar significativamente las nubes y generar extremos; además, se ha sugerido que, con el calentamiento, la base y el tope de las nubes altas en las regiones tropicales se elevará y su extensión horizontal se reducirá, lo cual también disminuiría la precipitación; estos cambios se asocian con la posible expansión de la Celda de Hadley y un debilitamiento en la celda de Walker (Chadwick et al., 2013; Lu et al., 2007; Ma y Xie, 2013; Su et al., 2017).

En el futuro cercano la mayoría de las regiones en la Figura 27 muestra aumentos entre 1° C y 2° C de TXx y entre -20% y 20% en R95p para ambos escenarios. A final de siglo la temperatura extrema podría incrementarse entre 3° C y 4° C, y > 4°C con el escenario de altas emisiones. Como era de esperarse, R95p muestra una gran variabilidad interanual durante todo el siglo, pero se observa que los incrementos de R95p son mayores en las regiones subtropicales (entre 10 y 20%) y los decrementos en las regiones tropicales como se ve más claramente en el promedio de las dos regiones del IPCC (NCA y SCA). El incremento de R95p en la región subtropical es consistente con los trabajos antes mencionados y se observa más claramente en la Figura 28 con el escenario más alto (SSP3.7) a finales de siglo.



**Figura 27.** Proyecciones de cambio de a) temperatura máxima extrema (TXx) y b) precipitación extrema (R95p) para el periodo 2021-2099 para los escenarios SSP2-4.5 (arriba) y SSP3-7.0 (abajo).

La respuesta regional de algunos factores regionales al calentamiento global podría explicar la disminución

de proyectada de precipitación en la región tropical de nuestra región de estudio. Diferentes modelos de varias fases del CMIP sugieren un fortalecimiento del CLLJ en el futuro, lo que podría explicar por qué las regiones tropicales tienden a una disminución en la precipitación (Bustos Usta y Torres Parra, 2023; Campbell et al., 2021; Durán-Quesada et al., 2020; Torres-Alavez et al., 2021). Algunos MCGs también sugieren un incremento en la alta subtropical del Atlántico Norte (Li et al., 2012; Song et al., 2018; Zhou et al., 2021). Este cambio favorecería la intensificación del CLLJ, pero también podría favorecer el transporte de humedad desde el Golfo de México hacia el continente, lo que podría explicar parcialmente el aumento de eventos extremos en el sur y sureste de Estados Unidos y posiblemente en el Noreste de México. Cuando la alta del Atlántico Norte fortalece el GPLLJ se transporta más humedad desde el Golfo de México hacia el contore en sextremos de precipitación (Song et al., 2018; Zhou et al., 2021).



**Figura 28.** Cambios promedio para el índice TXx (eje x) y el índice R95p (eje y) para los escenarios de bajas emisiones (SSP2-4.5) y altas emisiones (SSP.3-7.0) y para los tres periodos futuros. Los marcadores indican las regiones y la barra de colores el futuro cercano (2021-2040), futuro mediano plazo (2041-2060) y futuro lejano (2080-2099).

Por último, es importante resaltar que el aumento de los eventos extremos puede afectar a más de un sector de la población. Múltiples trabajos han descrito el impacto que un aumento en las temperaturas extremas podría tener en la salud humana al favorecer las condiciones para la propagación de enfermedades (e.g. Berberiana y Rosanovaa, 2012; Bezirtzoglou et al., 2011; Lambrechts et al., 2011), aumentar las muertes relacionadas con enfermedades gastrointestinales y cardiovasculares (e.g. Javadinejad et al., 2020) y afectar el desarrollo de cultivos (e.g. Hatfield y Prueger, 2015). Particularmente, para nuestra región de estudio, el noroeste de México es una zona que por sus características climáticas

podría ser de las más susceptibles al cambio climático (Martinez-Austria y Bandala, 2017). El incremento en la intensidad de las lluvias extremas puede provocar un aumento tanto en la frecuencia como en la severidad de las inundaciones, lo que conlleva importantes afectaciones en los ecosistemas, los asentamientos humanos y la economía (Tabari, 2020). En este trabajo se investigaron dos preguntas científicas: ¿qué eventos muestran tendencias significativas en México, el sur de Estados Unidos y Centroamérica durante 1981-2010? Y, ¿qué tanto podrían cambiar su intensidad y frecuencia durante el siglo XXI debido al calentamiento global? Para responder a estas preguntas primero se analizaron las observaciones históricas (ERA5) y se hizo una evaluación de 10 MCG del CMIP6 en 15 regiones para el periodo 1981-2010. Posteriormente se analizaron las proyecciones de cambio bajo dos escenarios (SSP2-4.5 y SSP3-7.0) para tres periodos futuros.

De acuerdo con las métricas de desempeño utilizadas (Sesgo, TS y VR), los modelos que simularon mejor los patrones espaciales y temporales de los índices climáticos en la mayoría de las regiones del dominio (>55%) son: EC-Earth3, GFDL-ESM4, ACCESS-CM2, CNRM-CM6-1, HadGEM3-GC31-LL y MPI-ESM1-2-HR.

En el periodo histórico (ERA5) se observaron tendencias positivas de TXx y TNn en todas las regiones, pero muy pocas mostraron significancia estadística. Las mayores tendencias se registraron en las regiones subtropicales (>0.2° C/dec). Las noches frías (Tn10p) mostraron tendencias negativas, lo que concuerda con el aumento en los demás índices de temperatura. El EnsMCG capturó el signo de la tendencia en la mayoría de los índices de temperatura, los cuales mostraron significancia estadística en casi todas las regiones.

La precipitación y sus extremos mostraron más variabilidad y sólo algunas regiones semiáridas del noroeste de México y suroeste de Estados Unidos mostraron tendencias negativas. Los modelos subestimaron la lluvia promedio y sus extremos en las regiones más lluviosas desde el centro de México hasta Centroamérica. Las regiones subtropicales presentaron tendencias negativas (<-10%/dec) en la precipitación extrema (R95p). Además, el índice de los días consecutivos secos (CDD) mostró un patrón oeste (más días) – este (menos días) tanto en las observaciones como en los modelos. Los índices R10mm y R20mm mostraron principalmente tendencias negativas y cercanas a 0.

Las proyecciones de cambio climático sugieren que todos los índices de intensidad de temperatura seguirán aumentando durante el siglo XXI, especialmente con el escenario SSP3-7.0; en forma consistente, el índice de noches frías (TN10p) muestra una tendencia negativa, es decir menor porcentaje de días fríos con los dos escenarios futuros.

Los modelos proyectan una disminución de la precipitación en las latitudes tropicales, pero sugieren incrementos entre 10% y 30% en los índices extremos de intensidad de lluvia (R95p y Rx5day) en las zonas subtropicales y el Altiplano Mexicano.

Las proyecciones futuras sugieren aumentos en los índices de las temperaturas extremas desde 2° C hasta 5° C a mitad y final de siglo, respectivamente, particularmente con el escenario de altas emisiones. Los cambios mostrados en las proyecciones futuras podrían tener un impacto sustancial en la disponibilidad de recursos hídricos, en el sector salud y en el sector económico, por lo que es importante un análisis climático regional.

En resumen, esta tesis resalta la complejidad de los eventos climáticos extremos y la necesidad de considerar las particularidades regionales en la toma de decisiones. Si bien es cierto los modelos CMIP6 proporcionan información valiosa, es crucial tener en cuenta sus limitaciones y sesgos al planificar medidas de adaptación y mitigación. La comprensión de estos patrones y tendencias es fundamental para garantizar un desarrollo sostenible y la resiliencia de las comunidades frente a un clima en constante cambio.

#### 6.1 Trabajo futuro

Como trabajo a futuro se sugiere realizar un downscaling climático, ya sea dinámico o estadístico para las regiones en donde los MCG tienen un mejor desempeño de acuerdo con las métricas analizadas e identificar si los sesgos se reducen.

También se podría, realizar un análisis más en detalle respecto a los mecanismos generadores de los eventos extremos y ver sus cambios con diferentes escenarios; por ejemplo, la alta subtropical del Atlántico se podría intensificar con el escenario de altas emisiones SSP3-7.0 de acuerdo con el modelo EC-Earth3-LR (Figura 29). Como se sabe, esta intensificación podría afectar al CLLJ afectando el hidroclima de nuestra región de estudio. Si bien es cierto en la literatura hay trabajos que sugieren por qué se podrían presentar estos cambios, hay pocos trabajos con las versiones más recientes de los modelos del CMIP6 y que se enfoquen en nuestra región.

Otra posibilidad es hacer un estudio sobre el balance de energía y su influencia en la precipitación media similar al de Su et al., (2017) con la versión más reciente de los modelos del CMIP6. Se podría hacer un

análisis para determinar si los MCG muestran la intensificación de la rama ascendente de la Celda de Hadley y ver la respuesta energética (radiación de onda corta y larga) y de las nubes altas tropicales (que se han proyectado que disminuyan) y analizar los impactos en la precipitación.



**Figura 29.** Altura Geopotencial a 850 mb para el modelo EC-Earth3 para el periodo a) histórico y el b) para finales de siglo con el escenario SSP3-7.0.

- Abdelmoaty, H. M. y Papalexiou, S. M. y Rajulapati, C. R. y AghaKouchak, A. (2021). Biases beyond the mean in CMIP6 extreme precipitation: a global investigation. Earth's Future, 9(10). <u>https://doi.org/10.1029/2021EF002196</u>
- Aguilar, E. y Peterson, T. C. y Obando, P. R. y Frutos, R. y Retana, J. A. y Solera, M. y Soley, J. y García, I. G. y Araujo, R. M. y Santos, A. R. y Valle, V. E. y Brunet, M. y Aguilar, L. y Álvarez, L. y Bautista, M. y Castañón, C. y Herrera, L. y Ruano, E. y Sinay, J. J. y ... Mayorga, R. (2005). Changes in precipitation and temperature extremes in Central America and northern South America, 1961-2003. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 110(23), 1–15. <u>https://doi.org/10.1029/2005JD006119</u>
- Ajjur, S. B. y Al-Ghamdi, S. G. (2021). Global hotspots for future absolute temperature extremes From CMIP6 Models. Earth and Space Science, 8(9). <u>https://doi.org/10.1029/2021EA001817</u>
- Akinsanola, A. y Kooperman, K. y Pendergrass, P. y Hannah, H. y Reed, R. (2020). Seasonal representation of extreme precipitation indices over the United States in CMIP6 present-day simulations. Environmental Research Letters, 15(9). <u>https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab92c1</u>
- Alexander, L. V. y Zhang, X. y Peterson, T. C. y Caesar, J. y Gleason, B. y Klein Tank, A. M. G. y Haylock, M. y Collins, D. y Trewin, B. y Rahimzadeh, F. y Tagipour, A. y Rupa Kumar, K. y Revadekar, J. y Griffiths, G. y Vincent, L. y Stephenson, D. B. y Burn, J. y Aguilar, E. y Brunet, M. y ... Vazquez-Aguirre, J. L. (2006). Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 111(5). https://doi.org/10.1029/2005JD006290
- Almazroui, M. y Islam, M. N. y Saeed, F. y Saeed, S. y Ismail, M. y Ehsan, M. A. y Diallo, I. y O'Brien, E. y Ashfaq, M. y Martínez-Castro, D. y Cavazos, T. y Cerezo-Mota, R. y Tippett, M. K. y Gutowski, W. J. y Alfaro, E. J. y Hidalgo, H. G. y Vichot-Llano, A. y Campbell, J. D. y Kamil, S. y ... Barlow, M. (2021a). Projected changes in temperature and precipitation over the United States, Central America, and the Caribbean in CMIP6 GCMs. Earth Systems and Environment, 5(1). https://doi.org/10.1007/s41748-021-00199-5
- Almazroui, M. y Saeed, F. y Saeed, S. y Ismail, M. y Ehsan, M. A. y Islam, M. N. y Abid, M. A. y O'Brien, E. y Kamil, S. y Rashid, I. U. y Nadeem, I. (2021b). Projected changes in climate extremes using CMIP6 simulations over SREX regions. Earth Systems and Environment, 5(3), 481–497. https://doi.org/10.1007/s41748-021-00250-5
- Arriaga-Ramírez, S. y Cavazos, T. (2010). Regional trends of daily precipitation indices in northwest Mexico and southwest United States. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 115(14). https://doi.org/10.1029/2009JD013248
- Asadieh, B. y Krakauer, N. Y. (2015). Global trends in extreme precipitation: Climate models versus observations. Hydrology and Earth System Sciences, 19(2), 877–891. https://doi.org/10.5194/hess-19-877-2015
- Avila-Diaz, A. y Torres, R. R. y Zuluaga, C. F. y Cerón, W. L. y Oliveira, L. y Benezoli, V. y Rivera, I. A. y
   Marengo, J. A. y Wilson, A. B. y Medeiros, F. (2023). Current and future climate extremes over
   Latin America and Caribbean: assessing earth system models from High Resolution Model

Intercomparison Project (HighResMIP). Earth Systems and Environment, 7(1), 99–130. https://doi.org/10.1007/s41748-022-00337-7

- Berberiana, G. y Rosanovaa, M. T. (2012). Impacto del cambio climático en las enfermedades infecciosas. Archivos Argentinos de Pediatria, 110(1), 39–45. <u>https://doi.org/10.5546/aap.2012.39</u>
- Bezirtzoglou, C. y Dekas, K. y Charvalos, E. (2011). Climate changes, environment and infection: Facts, scenarios and growing awareness from the public health community within Europe. Anaerobe, 17(6), 337–340. <u>https://doi.org/10.1016/j.anaerobe.2011.05.016</u>
- Brito-Castillo, L. y Crimmins, M. y Díaz, S. (2010). Clima. In F. E. Molina-Freaner & T. R. Van-Devender (Eds.), Diversidad biológica de Sonora (pp. 73–96). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Bustos Usta, D. F. y Torres Parra, R. R. (2023). Projected wind changes in the Caribbean Sea based on CMIP6 models. Climate Dynamics, 60(11–12), 3713–3727. <u>https://doi.org/10.1007/s00382-02206535-3</u>
- Campbell, J. D. y Taylor, M. A. y Bezanilla-Morlot, A. y Stephenson, T. S. y Centella-Artola, A. y Clarke, L. A. y Stephenson, K. A. (2021). Generating projections for the caribbean at 1.5, 2.0, and 2.5 °c from a high-resolution ensemble. Atmosphere, 12(3). <u>https://doi.org/10.3390/atmos12030328</u>
- Cavazos, T. y Luna-Niño, R. y Cerezo-Mota, R. y Fuentes-Franco, R. y Méndez, M. y Pineda Martínez, L. F. y Valenzuela, E. (2020). Climatic trends and regional climate models intercomparison over the CORDEX-CAM (Central America, Caribbean, and Mexico) domain. International Journal of Climatology, 40(3), 1396–1420. <u>https://doi.org/10.1002/joc.6276</u>
- Cavazos, T. y Turrent, C. y Lettenmaier, D. P. (2008). Extreme precipitation trends associated with tropical cyclones in the core of the North American monsoon. Geophysical Research Letters, 35(21). https://doi.org/10.1029/2008GL035832
- Chadwick, R. y Boutle, I. y Martin, G. (2013). Spatial patterns of precipitation change in CMIP5: Why the rich do not get richer in the tropics. Journal of Climate, 26(11), 3803–3822. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00543.1
- Chen, D. y Rojas, M. y Samset, B. H. y Cobb, K. y Diongue Niang, A. y Edwards, P. y Emori, S. y Faria, S. H. y Hawkins, E. y Hope, P. y Huybrechts, P. y Meinshausen, M. y Mustafa, S. K. y Plattner, G.-K. y Tréguier, A.-M. (2021). Framing, Context, and Methods. In V. Masson-Delmotte, 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, & B. Zhou (Eds.), Climate Change 2021: The physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (pp. 147–286). Cambridge University Press. <u>https://doi.org/10.1017/9781009157896.003</u>
- Chen, G. y Ming, Y. y Singer, N. D. y Lu, J. (2011). Testing the Clausius-Clapeyron constraint on the aerosolinduced changes in mean and extreme precipitation. Geophysical Research Letters, 38(4). <u>https://doi.org/10.1029/2010GL046435</u>
- Chen, H. y Sun, J. (2015). Assessing model performance of climate extremes in China: an intercomparison between CMIP5 and CMIP3. Climatic Change, 129(1–2), 197–211. https://doi.org/10.1007/s10584-014-1319-5

- Colorado-Ruiz, G. y Cavazos, T. (2021). Trends of daily extreme and non-extreme rainfall indices and intercomparison with different gridded data sets over Mexico and the southern United States. International Journal of Climatology, 41(11), 5406–5430. <u>https://doi.org/10.1002/joc.7225</u>
- Colorado-Ruiz, G. y Cavazos, T. y Salinas, J. A. y De Grau, P. y Ayala, R. (2018). Climate change projections from Coupled Model Intercomparison Project phase 5 multi-model weighted ensembles for Mexico, the North American monsoon, and the mid-summer drought region. International Journal of Climatology, 38(15), 5699–5716. <u>https://doi.org/10.1002/joc.5773</u>
- Cornes, R. C. y Jones, P. D. (2013). How well does the ERA-Interim reanalysis replicate trends in extremes of surface temperature across Europe? Journal of Geophysical Research Atmospheres, 118(18), 10,262-10,276. <u>https://doi.org/10.1002/jgrd.50799</u>
- Curtis, S. (2008). The Atlantic multidecadal oscillation and extreme daily precipitation over the US and Mexico during the hurricane season. Climate Dynamics, 30(4), 343–351. https://doi.org/10.1007/s00382-007-0295-0
- Dominguez, C. y Done, J. M. y Bruyère, C. L. (2020). Easterly wave contributions to seasonal rainfall over the tropical Americas in observations and a regional climate model. Climate Dynamics, 54(1–2), 191–209. <u>https://doi.org/10.1007/s00382-019-04996-7</u>
- Donald Ahrens, C. y Henson, R. (2009). Meteorology Today: An Introduction to Weather, Climate and the Environment (9th ed.). Cengage Learning.
- Donat, M. G. y Alexander, L. V. y Herold, N. y Dittus, A. J. (2016). Temperature and precipitation extremes in century-long gridded observations, reanalyses, and atmospheric model simulations. Journal of Geophysical Research, 121(19), 11174–11189. <u>https://doi.org/10.1002/2016JD025480</u>
- Donat, M. G. y Alexander, L. V. y Yang, H. y Durre, I. y Vose, R. y Caesar, J. (2013). Global land-based datasets for monitoring climatic extremes. Bulletin of the American Meteorological Society, 94(7), 997–1006. <u>https://doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00109.1</u>
- Dong, S. y Xu, Y. y Zhou, B. y Shi, Y. (2015). Assessment of indices of temperature extremes simulated by multiple CMIP5 models over China. Advances in Atmospheric Sciences, 32(8), 1077–1091. https://doi.org/10.1007/s00376-015-4152-5
- Dunn, R. J. H. y Alexander, L. V. y Donat, M. G. y Zhang, X. y Bador, M. y Herold, N. y Lippmann, T. y Allan, R. y Aguilar, E. y Barry, A. A. y Brunet, M. y Caesar, J. y Chagnaud, G. y Cheng, V. y Cinco, T. y Durre, I. y de Guzman, R. y Htay, T. M. y Wan Ibadullah, W. M. y ... Bin Hj Yussof, M. N. A. (2020). Development of an updated global land in situ-based data set of temperature and precipitation extremes: HadEX3. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 125(16). https://doi.org/10.1029/2019JD032263
- Durán-Quesada, A. M. y Sorí, R. y Ordoñez, P. y Gimeno, L. (2020). Climate perspectives in the Intra-Americas seas. Atmosphere, 11(9). <u>https://doi.org/10.3390/atmos11090959</u>
- Enfield, D. B. y Mestas-Nuñez, A. M. y Trimble, P. J. (2001). The Atlantic multidecadal oscillation and its relation to rainfall and river flows in the continental U.S. Geophysical Research Letters, 28(10), 2077–2080. <u>https://doi.org/10.1029/2000GL012745</u>

Englehart, P. J. y Douglas, A. V. (2002). Mexico's summer rainfall patterns: an analysis of regional modes

and changes in their teleconnectivity. Atmósfera, 15(3), 147–164.

- Eyring, V. y Bony, S. y Meehl, G. A. y Senior, C. A. y Stevens, B. y Stouffer, R. J. y Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. Geoscientific Model Development, 9(5), 1937–1958. <u>https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016</u>
- Fan, X. y Miao, C. y Duan, Q. y Shen, C. y Wu, Y. (2020). The performance of CMIP6 versus CMIP5 in simulating temperature extremes over the global land surface. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 125(18). <u>https://doi.org/10.1029/2020JD033031</u>
- Farfán, L. M. y D'Sa, E. J. y Liu, K. biu y Rivera-Monroy, V. H. (2014). Tropical cyclone impacts on coastal regions: the case of the Yucatán and the Baja California Peninsulas, Mexico. Estuaries and Coasts, 37(6), 1388–1402. <u>https://doi.org/10.1007/s12237-014-9797-2</u>
- García-Cueto, O. R. y Cavazos, M. T. y de Grau, P. y Santillán-Soto, N. (2014). Analysis and modeling of extreme temperatures in several cities in northwestern Mexico under climate change conditions. Theoretical and Applied Climatology, 116(1–2), 211–225. <u>https://doi.org/10.1007/s00704-013-0933-x</u>
- Gershunov, A. y Shulgina, T. y Clemesha, R. E. S. y Guirguis, K. y Pierce, D. W. y Dettinger, M. D. y Lavers, D. A. y Cayan, D. R. y Polade, S. D. y Kalansky, J. y Ralph, F. M. (2019). Precipitation regime change in Western North America: the role of atmospheric rivers. Scientific Reports, 9(1). https://doi.org/10.1038/s41598-019-46169-w
- Gleckler, P. J. y Taylor, K. E. y Doutriaux, C. (2008). Performance metrics for climate models. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 113(6). <u>https://doi.org/10.1029/2007JD008972</u>
- Guan, X. y Cao, C. y Zeng, X. y Sun, W. (2022). Evidence of decreasing diurnal temperature range in eastern Northern Hemisphere. Environmental Research Communications, 4(3). https://doi.org/10.1088/2515-7620/ac5e0a
- Gutiérrez, J. M. y Jones, R. G. y Narisma, G. T. y Alves, L. M. y Amjad, M. y Gorodetskaya, I. V y et al. (2021).
   Atlas. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, & et al. (Eds.),
   Climate change 2021: the physical science basis (pp. 1927–2058). Cambridge University Press.
   <a href="https://doi.org/10.1017/9781009157896.021">https://doi.org/10.1017/9781009157896.021</a>
- Hatfield, J. L. y Prueger, J. H. (2015). Temperature extremes: effect on plant growth and development. Weather and Climate Extremes, 10, 4–10. <u>https://doi.org/10.1016/j.wace.2015.08.001</u>
- Hausfather, Z. (2018). Explainer: How 'Shared Socioeconomic Pathways' explore future climate change -Carbon Brief. <u>https://www.carbonbrief.org/explainer-how-shared-socioeconomic-pathways-explore-future-climate-change/</u>
- Hersbach, H. y Bell, B. y Berrisford, P. y Hirahara, S. y Horányi, A. y Muñoz-Sabater, J. y Nicolas, J. y Peubey, C. y Radu, R. y Schepers, D. y Simmons, A. y Soci, C. y Abdalla, S. y Abellan, X. y Balsamo, G. y Bechtold, P. y Biavati, G. y Bidlot, J. y Bonavita, M. y ... Thépaut, J. N. (2020). The ERA5 global reanalysis. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 146(730), 1999–2049. https://doi.org/10.1002/qj.3803

Huang, X. y Dunn, R. J. H. y Li, L. Z. X. y McVicar, T. R. y Azorin-Molina, C. y Zeng, Z. (2023). Increasing

global terrestrial diurnal temperature range for 1980–2021. Geophysical Research Letters, 50(11). <u>https://doi.org/10.1029/2023GL103503</u>

- Javadinejad, S. y Dara, R. y Jafary, F. (2020). Health impacts of extreme events. Safety in Extreme Environments. <u>https://doi.org/10.1007/s42797-020-00016-8</u>
- Kendall, M. G. (1948). Rank Correlation Methods. Griffin.
- Kim, Y. H. y Min, S. K. y Zhang, X. y Sillmann, J. y Sandstad, M. (2020). Evaluation of the CMIP6 multimodel ensemble for climate extreme indices. Weather and Climate Extremes, 29, 100269. <u>https://doi.org/10.1016/J.WACE.2020.100269</u>
- Lambrechts, L. y Paaijmans, K. P. y Fansiri, T. y Carrington, L. B. y Kramer, L. D. y Thomas, M. B. y Scott, T. W. (2011). Impact of daily temperature fluctuations on dengue virus transmission by Aedes aegypti. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 108(18), 7460–7465. <u>https://doi.org/10.1073/pnas.1101377108</u>
- Li, C. y Zwiers, F. y Zhang, X. y Li, G. y Sun, Y. y Wehner, M. (2021). Changes in annual extremes of daily temperature and precipitation in CMIP6 Models. Journal of Climate. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-1013.1
- Li, W. y Li, L. y Ting, M. y Liu, Y. (2012). Intensification of northern hemisphere subtropical highs in a warming climate. Nature Geoscience, 5(11), 830–834. <u>https://doi.org/10.1038/ngeo1590</u>
- Loikith, P. C. y Broccoli, A. J. (2014). The influence of recurrent modes of climate variability on the occurrence of winter and summer extreme temperatures over North America. Journal of Climate, 27(4), 1600–1618. <u>https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00068.1</u>
- Lu, J. y Vecchi, G. A. y Reichler, T. (2007). Expansion of the Hadley cell under global warming. Geophysical Research Letters, 34(6). <u>https://doi.org/10.1029/2006GL028443</u>
- Luna-Niño, R. y Cavazos, T. (2018). Formation of a coastal barrier jet in the Gulf of Mexico due to the interaction of cold fronts with the Sierra Madre Oriental Mountain range. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 144(710), 115–128. <u>https://doi.org/10.1002/qj.3188</u>
- Luna-Niño, R. y Cavazos, T. y Torres-Alavez, J. A. y Giorgi, F. y Coppola, E. (2021). Interannual variability of the boreal winter subtropical jet stream and teleconnections over the CORDEX-CAM domain during 1980–2010. Climate Dynamics, 57(5–6), 1571–1594. <u>https://doi.org/10.1007/s00382-020-05509-7</u>
- Ma, J. y Xie, S. P. (2013). Regional patterns of sea surface temperature change: a source of uncertainty in future projections of precipitation and atmospheric circulation. Journal of Climate, 26(8), 2482– 2501. <u>https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00283.1</u>
- Magaña, V. O. y Vázquez, J. L. y Pérez, J. L. y Pérez, J. B. (2003). Impact of El Niño on precipitation in Mexico. Geofísica Internacional, 42(3), 313–330. https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.2003.42.3.949
- Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. Econometrica, 13(3), 245–259. https://doi.org/10.2307/1907187

María Durán-Quesada, A. y Gimeno, L. y Amador, J. (2017). Role of moisture transport for Central

American precipitation. Earth System Dynamics, 8(1), 147–161. <u>https://doi.org/10.5194/esd-8-147-2017</u>

- Martinez-Austria, P. F. y Bandala, E. R. (2017). Temperature and heat-related mortality trends in the Sonoran and Mojave Desert region. Atmosphere, 8(3). <u>https://doi.org/10.3390/atmos8030053</u>
- Martínez-Sánchez, J. N. y Cavazos, T. (2014). Eastern tropical Pacific hurricane variability and landfalls on Mexican coasts. Climate Research, 58(3), 221–234. <u>https://doi.org/10.3354/cr01192</u>
- Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Pean, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M. I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J. B. R., Maycock, T. K., Waterfield, T., Yelekci, O., Yu, R., & Zhou, B. (Eds.). (2021). IPCC, 2021: Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009157896
- Mehran, A. y Aghakouchak, A. y Phillips, T. J. (2014). Evaluation of CMIP5 continental precipitation simulations relative to satellite-based gauge-adjusted observations. Journal of Geophysical Research, 119(4), 1695–1707. <u>https://doi.org/10.1002/2013JD021152</u>
- Meinshausen, M. y Nicholls, Z. R. J. y Lewis, J. y Gidden, M. J. y Vogel, E. y Freund, M. y Beyerle, U. y Gessner, C. y Nauels, A. y Bauer, N. y Canadell, J. G. y Daniel, J. S. y John, A. y Krummel, P. B. y Luderer, G. y Meinshausen, N. y Montzka, S. A. y Rayner, P. J. y Reimann, S. y ... Wang, R. H. J. (2020). The shared socio-economic pathway (SSP) greenhouse gas concentrations and their extensions to 2500. Geoscientific Model Development, 13(8), 3571–3605. <a href="https://doi.org/10.5194/gmd-13-3571-2020">https://doi.org/10.5194/gmd-13-3571-2020</a>
- Méndez González, J. y Návar Cháidez, J. de J. y González Ontiveros, V. (2008). Análisis de tendencias de precipitación (1920-2004) en México. Investigaciones Geográficas, 65, 38–55.
- Méndez, M. y Magaña, V. (2010). Regional aspects of prolonged meteorological droughts over Mexico and central America. Journal of Climate, 23(5), 1175–1188. https://doi.org/10.1175/2009JCLI3080.1
- Mendoza, V. M. y Oda, B. y Garduño, R. y Villanueva, E. E. y Adem, J. (2014). Simulation of the PDO effect on the North America summer climate with emphasis on Mexico. Atmospheric Research, 137, 228–244. <u>https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.10.010</u>
- Moreno-Chamarro, E. y Caron, L. P. y Loosveldt Tomas, S. y Vegas-Regidor, J. y Gutjahr, O. y Moine, M. P. y Putrasahan, D. y Roberts, C. D. y Roberts, M. J. y Senan, R. y Terray, L. y Tourigny, E. y Vidale, P. L. (2022). Impact of increased resolution on long-standing biases in HighResMIP-PRIMAVERA climate models. Geoscientific Model Development, 15(1), 269–289. https://doi.org/10.5194/gmd-15-269-2022
- Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., Van Vuuren, D. P., Carter, T. R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G. A., Mitchell, J. F. B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S. J., Stouffer, R. J., Thomson, A. M., Weyant, J. P., & Wilbanks, T. J. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. Nature, 463(7282), 747–756. https://doi.org/10.1038/nature08823

O'Neill, B. C. y Kriegler, E. y Ebi, K. L. y Kemp-Benedict, E. y Riahi, K. y Rothman, D. S. y van Ruijven, B. J. y

van Vuuren, D. P. y Birkmann, J. y Kok, K. y Levy, M. y Solecki, W. (2017). The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. Global Environmental Change, 42, 169–180. <u>https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.01.004</u>

- Pavia, E. G. y Graef, F. y Reyes, J. (2006). PDO–ENSO effects in the climate of Mexico. Journal of Climate, 19(24), 6433–6438. <u>https://doi.org/10.1175/JCLI4045.1</u>
- Pavia, E. G. y Graef, F. y Reyes, J. (2009). Annual and seasonal surface air temperature trends in Mexico. International Journal of Climatology, 29(9), 1324–1329. <u>https://doi.org/10.1002/joc.1787</u>
- Peralta-Hernández, A. y Jr, R. C. y Barba-Martínez, L. R. (2009). Comparative analysis of indices of extreme rainfall events: variations and trends from southern México. Atmosfera, 22, 219–228.
- Pérez-Morga, N. y Kretzschmar, T. y Cavazos, T. y Smith, S. V. y Munoz-Arriola, F. (2013). Variability of extreme precipitation in coastal river basins of the southern mexican Pacific region. Geofísica Internacional, 52(3), 277–291. <u>https://doi.org/10.1016/S0016-7169(13)71477-6</u>
- Peterson, T. C. y Zhang, X. y Brunet-India, M. y Vázquez-Aguirre, J. L. (2008). Changes in North American extremes derived from daily weather data. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 113(7). https://doi.org/10.1029/2007JD009453
- Pörtner, H.-O. y Roberts, D. C. y Masson-Delmotte, V. y Zhai, P. y Tignor, M. y Poloczanska, E. y Weyer, N.
   M. (2019). The ocean and cryosphere in a changing climate. IPCC special report on the ocean and cryosphere in a changing climate, 1155. <u>https://doi.org/10.1017/9781009157964</u>
- Roca, R. y Alexander, L. V. y Potter, G. y Bador, M. y Jucá, R. y Contractor, S. y Bosilovich, M. G. y Cloché, S. (2019). FROGS: A daily 1° × 1° gridded precipitation database of rain gauge, satellite and reanalysis products. Earth System Science Data, 11(3), 1017–1035. <u>https://doi.org/10.5194/essd-11-1017-2019</u>
- Sánchez-Rodríguez, R. y Cavazos, T. (2015). Capítulo 1: Amenazas naturales, sociedad y desastres. In T. Cavazos (Ed.), Conviviendo con la Naturaleza: El problema de los desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos y climáticos en México (pp. 1–45). Ediciones ILCSA.
- Sandstad, M. y Schwingshackl, C. y Iles, C. E. y Sillmann, J. (2022). Climate extreme indices and heat stress indicators derived from CMIP6 global climate projections. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). <u>https://doi.org/10.24381/cds.776e08bd</u>
- Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau. Journal of the American Statistical Association, 63(324), 1379–1389. <u>https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934</u>
- Seneviratne, S. y Nicholls, N. y Easterling, D. y Goodess, C. y Kanae, S. y Kossin, J. y Luo, Y. y Marengo, J. y McInnes, K. y Rahimi, M. (2012). Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment. <u>https://doi.org/10.1017/CB09781139177245.006</u>
- Sillmann, J. y Kharin, V. V. y Zhang, X. y Zwiers, F. W. y Bronaugh, D. (2013a). Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: part 1. Model evaluation in the present climate. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 118(4), 1716–1733. <u>https://doi.org/10.1002/jgrd.50203</u>
- Sillmann, J. y Kharin, V. V. y Zwiers, F. W. y Zhang, X. y Bronaugh, D. (2013b). Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: part 2. Future climate projections. Journal of Geophysical

Research Atmospheres, 118(6), 2473–2493. https://doi.org/10.1002/jgrd.50188

- Sillmann, J. y Kharin, V. V. y Zwiers, F. W. y Zhang, X. y Bronaugh, D. y Donat, M. G. (2014). Evaluating model-simulated variability in temperature extremes using modified percentile indices. International Journal of Climatology, 34(11), 3304–3311. <u>https://doi.org/10.1002/joc.3899</u>
- Song, F. y Leung, L. R. y Lu, J. y Dong, L. (2018). Future changes in seasonality of the north Pacific and north Atlantic subtropical highs. Geophysical Research Letters, 45(21), 11,959-11,968. <u>https://doi.org/10.1029/2018GL079940</u>
- Spinoni, J. y Barbosa, P. y Bucchignani, E. y Cassano, J. y Cavazos, T. y Christensen, J. H. y Christensen, O. B. y Coppola, E. y Evans, J. y Geyer, B. y Giorgi, F. y Hadjinicolaou, P. y Jacob, D. y Katzfey, J. y Koenigk, T. y Laprise, R. y Lennard, C. J. y Kurnaz, M. L. y Delei, L. I. y ... Dosio, A. (2020). Future global meteorological drought hot spots: a study based on CORDEX data. Journal of Climate, 33(9), 3635–3661. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0084.1
- Srivastava, A. y Grotjahn, R. y Ullrich, P. A. (2020). Evaluation of historical CMIP6 model simulations of extreme precipitation over contiguous US regions. Weather and Climate Extremes, 29. <u>https://doi.org/10.1016/j.wace.2020.100268</u>
- Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., & Midgley, P. M. (Eds.). (2014). Climate change 2013: the physical science basis. Cambridge University Press. <u>https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324</u>
- Su, H. y Jiang, J. H. y Neelin, J. D. y Shen, T. J. y Zhai, C. y Yue, Q. y Wang, Z. y Huang, L. y Choi, Y. S. y Stephens, G. L. y Yung, Y. L. (2017). Tightening of tropical ascent and high clouds key to precipitation change in a warmer climate. Nature Communications, 8. https://doi.org/10.1038/ncomms15771
- Swain, D. L. y Langenbrunner, B. y Neelin, J. D. y Hall, A. (2018). Increasing precipitation volatility in twenty-first-century California. Nature Climate Change, 8(5), 427–433. <u>https://doi.org/10.1038/s41558-018-0140-y</u>
- Tabari, H. (2020). Climate change impact on flood and extreme precipitation increases with water availability. Scientific Reports, 10(1). <u>https://doi.org/10.1038/s41598-020-70816-2</u>
- Taylor, K. E. (2001). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 106(7), 7183–7192. <u>https://doi.org/10.1029/2000JD900719</u>
- Taylor, K. E. y Stouffer, R. J. y Meehl, G. A. (2012). An Overview of CMIP5 and the experiment design. Bulletin of the American Meteorological Society, 93(4), 485–498. <u>https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1</u>
- Tian, B. y Dong, X. (2020). The double-ITCZ bias in CMIP3, CMIP5, and CMIP6 models based on annual Mean Precipitation. Geophysical Research Letters, 47(8). https://doi.org/10.1029/2020GL087232
- Torres-Alavez, J. A. y Das, S. y Corrales-Suastegui, A. y Coppola, E. y Giorgi, F. y Raffaele, F. y Bukovsky, M. S. y Ashfaq, M. y Salinas, J. A. y Sines, T. (2021). Future projections in the climatology of global low-level jets from CORDEX-CORE simulations. Climate Dynamics, 57(5–6), 1551–1569. https://doi.org/10.1007/s00382-021-05671-6

- Wang, C. y Lee, S. K. (2007). Atlantic warm pool, Caribbean low-level jet, and their potential impact on Atlantic hurricanes. Geophysical Research Letters, 34(2). <u>https://doi.org/10.1029/2006GL028579</u>
- Wilks, D. S. (2011). Statistical methods in the atmospheric sciences (3rd ed.). Academic press.
- Willett, K. M. y Sherwood, S. (2012). Exceedance of heat index thresholds for 15 regions under a warming climate using the wet-bulb globe temperature. International Journal of Climatology, 32(2), 161– 177. <u>https://doi.org/10.1002/joc.2257</u>
- WMO. (2023). Provisional State of the Global Climate 2023. <u>https://wmo.int/files/provisional-state-of-global-climate-2023</u>
- Zarazúa Villaseñor, P. y Ruiz Corral, J. A. y Ramírez Ojeda, G. y Medina García, G. y Rodríguez Moreno, V. M. y Mora Orozco, C. de la y Flores López, H. y Durán Puga, N. (2014). Indices of temperature extremes in the South Gulf Coastal Plains in Mexico. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 5(SPE10), 1843–1857. <u>https://doi.org/10.29312/remexca.v0i10.1021</u>
- Zhang, X. y Alexander, L. y Hegerl, G. C. y Jones, P. y Tank, A. K. y Peterson, T. C. y Trewin, B. y Zwiers, F. W. (2011). Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 2(6), 851–870. https://doi.org/10.1002/WCC.147
- Zhao, J. y Gan, T. Y. y Zhang, G. y Zhang, S. (2023). Projected changes of precipitation extremes in North America using CMIP6 multi-climate model ensembles. Journal of Hydrology, 621. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129598
- Zhou, W. y Leung, L. R. y Song, F. y Lu, J. (2021). Future changes in the Great Plains low-level jet governed by seasonally dependent pattern changes in the North Atlantic Subtropical High. Geophysical Research Letters, 48(4). <u>https://doi.org/10.1029/2020GL090356</u>
- Zhu, H. y Jiang, Z. y Li, J. y Li, W. y Sun, C. y Li, L. (2020). Does CMIP6 inspire more confidence in simulating climate extremes over China? Advances in Atmospheric Sciences, 37(10), 1119–1132. <u>https://doi.org/10.1007/s00376-020-9289-1</u>

### Anexos

## Anexo A: Cambios anuales de temperatura y precipitación

Con el objetivo de mostrar en detalle los cambios futuros de los índices de temperatura y precipitación en este anexo se muestran los diagramas de cajas y bigotes (Figuras 30, 31,32 y 33) del EnsMCG de los periodos 2021-2041, 2041-260 y 2080-2099 con respecto al periodo histórico (1981-2010) para los escenarios de bajas (SSP2-4.5) y altas (SSP3-7.0) emisiones. Además, se muestran mapas de calor (Figuras 34,35,36) que ilustran los cambios anuales de cada índice del EnsMCG para las 17 regiones.



**Figura 30.** Diagramas de cajas y bigotes con la anomalía de los índices de temperatura respecto al periodo histórico 1981-2010 para el escenario SSP2-4.5 para los periodos 2021-2040, 2041-2060, 2080-2099.



**Figura 31.** Diagramas de cajas y bigotes con la anomalía de los índices de temperatura respecto al periodo histórico 1981-2010 para el escenario SSP3-7.0 para los periodos 2021-2040, 2041-2060, 2080-2099.



**Figura 32.** Diagramas de cajas y bigotes con la anomalía de los índices de precipitación respecto al periodo histórico 1981-2010 para el escenario SSP2-4.5 para los periodos 2021-2040, 2041-2060, 2080-2099.



**Figura 33.** Diagramas de cajas y bigotes con la anomalía de los índices de precipitación respecto al periodo histórico 1981-2010 para el escenario SSP2-4.5 para los periodos 2021-2040, 2041-2060, 2080-2099.



**Figura 34.** Cambios anuales para los índices a) TNn y b) DTR para las 17 regiones de estudio (eje y) para el periodo 2021-2099 (eje x).





70

60

- 50

a)

Tx90p

SSP2-4.5

Figura 35. Cambios anuales para los índices a) TX90p, b) TN90p, c) TN10p y d) PRCPTOT para las 17 regiones de estudio (eje y) para el periodo 2021-2099 (eje x).



**Figura 36.** Cambios anuales para los índices a) RX5day, b) CDD, c) R10mm y d) R20mm para las 17 regiones de estudio (eje y) para el periodo 2021-2099 (eje x).

# Anexo B: Tablas de tendencias

Se muestran las tendencias de los índices de temperatura y precipitación en este anexo para los periodos 1980-2010 y 2021-2099 para los escenarios de bajas (SSP2-4.5) y altas (SSP3-7.0) emisiones.

	ТХх	TNn	DTR	TX90p	TN90p	TN10p	PRCPTOT	R95p	RX5day	CDD	R10mm	R20mm
	(° C/dec)	(° C/dec)	(° C/dec)	<b>(%d/</b> dec)	<b>(%d/</b> dec)	<b>(%d/</b> dec)	<b>(%/</b> dec)	(%/dec)	<b>(%/</b> dec)	( <b>d/</b> dec)	( <b>d/</b> dec)	( <b>d/</b> dec)
CAs	0.0	0.1	0.1	-0.2	-0.2	1.2	-8.7	-3.5	-2.0	11.1	-0.6	-0.1
DES	0.2	0.3	0.1	1.0	0.9	-0.2	-18.1	0.3	-4.4	11.6	-0.9	-0.2
SBC	0.0	0.1	0.0	0.1	0.4	0.7	-0.8	4.3	14.4	14.2	-0.2	0.1
ANM	0.6	0.7	0.3	3.4	2.6	-1.7	-17.1	-14.4	-6.8	8.7	-1.8	-0.3
MNZ	0.2	0.5	0.2	3.0	2.4	-1.8	-12.5	-10.9	0.9	11.7	-2.1	-0.4
HPL	0.4	0.6	0.3	3.7	3.3	-1.7	-11.7	-6.6	-5.2	8.2	-1.3	-0.2
NEM	0.2	0.4	0.1	1.4	2.1	-0.6	-3.6	0.2	0.7	2.8	-0.8	-0.1
TEX	0.3	1.0	0.1	2.2	1.7	-0.6	-5.7	-5.9	-3.6	3.3	-1.5	-0.4
SUS	0.4	1.3	0.1	2.0	1.5	-0.4	-2.3	2.8	0.5	1.3	-1.4	-0.3
SEM	0.4	0.1	0.1	2.8	4.1	-0.7	-0.5	13.4	7.8	2.1	-0.6	1.0
CWM	0.2	0.2	0.1	2.4	2.8	-1.3	-0.4	6.7	0.7	6.7	-0.3	0.1
SWM	0.2	0.1	0.1	2.6	3.5	-1.1	1.2	13.2	2.7	2.1	-0.2	0.8
PYU	0.5	0.2	0.2	3.9	5.1	-1.6	-8.7	0.7	3.1	3.7	-2.5	-0.2
CAM1	0.4	-0.1	0.1	3.1	3.3	-0.2	1.8	13.9	8.0	1.9	0.5	1.1
CAM2	0.1	0.1	0.0	3.5	4.5	-1.1	7.3	22.1	9.2	0.7	4.6	3.8
NCA	0.3	0.5	0.2	2.4	2.2	-1.0	-8.4	-4.5	-1.4	8.6	-1.4	-0.2
SCA	0.3	0.1	0.1	4.0	4.3	-1.1	2.1	15.2	7.1	2.1	0.4	1.6

**Tabla 5.** Tendencias regionales históricas por década de ERA5 para los índices de temperatura y precipitación en el periodo 1981-2010. Los valores en negritas indican que la tendencia es significativa al 95 %.

	TXx	TNn	DTR	TX90p	TN90p	TN10p	PRCPTOT	R95p	RX5day	CDD	R10mm	R20mm
	<b>(° C/</b> dec)	(° C/dec)	(° C/dec)	<b>(%d/</b> dec)	<b>(%d/</b> dec)	<b>(%d/</b> dec)	<b>(%/</b> dec)	<b>(%/</b> dec)	<b>(%/</b> dec)	<b>(d/</b> dec)	( <b>d/</b> dec)	(d/dec)
CAs	0.4	0.5	0.0	1.7	2.0	-2.8	-1.5	8.0	5.5	-1.5	-0.1	0.0
DES	0.4	0.4	0.0	2.1	2.2	-2.4	0.6	2.1	2.8	-0.3	-0.1	0.1
SBC	0.4	0.2	0.1	3.1	3.4	-2.5	-3.5	-1.5	3.1	4.0	-0.2	0.0
ANM	0.5	0.2	0.0	2.9	2.4	-1.8	-3.0	1.5	3.4	1.2	-0.4	0.0
MNZ	0.3	0.3	0.0	3.2	3.0	-2.6	-3.7	0.7	1.6	0.5	-0.6	-0.2
HPL	0.3	0.1	0.0	2.9	2.6	-2.3	-1.9	6.0	3.4	2.3	-0.5	0.1
NEM	0.4	0.1	0.1	2.6	2.6	-1.9	-2.0	-1.3	-0.3	1.3	-0.4	0.1
TEX	0.4	0.2	0.1	3.1	3.0	-2.1	-1.7	1.1	1.2	1.5	-0.6	-0.3
SUS	0.5	0.7	0.0	2.7	2.7	-2.2	0.5	3.4	0.3	-0.1	0.2	0.2
SEM	0.4	0.2	0.0	3.4	4.0	-2.6	-3.9	-3.1	-1.2	0.5	-1.1	-0.7
CWM	0.3	0.4	0.1	3.7	3.7	-2.8	-1.4	1.7	1.9	1.5	-0.8	0.1
SWM	0.4	0.1	0.0	4.2	4.1	-3.0	0.0	-0.5	-1.2	0.1	-0.5	-0.4
PYU	0.4	0.2	0.1	3.6	5.0	-3.4	-2.7	2.3	-2.0	1.2	-0.9	0.0
CAM1	0.3	0.2	0.1	4.1	4.6	-3.0	-2.0	-0.5	0.8	0.9	-0.9	-0.3
CAM2	0.2	0.1	0.0	4.6	5.4	-4.0	-0.5	1.8	-1.1	1.1	-0.2	-0.4
NCA	0.3	0.1	0.0	3.0	3.0	-2.4	-1.5	3.1	2.4	1.4	-0.3	0.1
SCA	0.3	0.1	0.0	4.8	5.3	-3.3	-1.7	1.0	0.0	0.7	-0.4	-0.2

**Tabla 6.** Tendencias regionales históricas por década del Ensamble para los índices de temperatura y precipitación en el periodo 1981-2010. Los valores en negritas indican que la tendencia es significativa al 95 %.

 Tabla 7. Tendencias regionales futuras por década del Ensamble para los índices de temperatura y precipitación en el periodo 2021-2099 para el escenario SSP2-4.5. Los valores en negritas indican que la tendencia es significativa al 95 %.

	ТХх	TNn	DTR	TX90p	TN90p	TN10p	PRCPTOT	R95p	RX5day	CDD	R10mm	R20mm
	(° <b>C/</b> dec)	(° <b>C/</b> dec)	(° <b>C/</b> dec)	<b>(%d/</b> dec)	<b>(%d/</b> dec)	<b>(%d/</b> dec)	<b>(%/</b> dec)	<b>(%/</b> dec)	<b>(%/</b> dec)	<b>(d/</b> dec)	( <b>d/</b> dec)	<b>(d/</b> dec)
CAs	0.3	0.3	-0.004	2.9	3.3	-0.3	0.2	2.0	1.5	-0.2	0.0	0.0
DES	0.3	0.3	0.01	2.7	3.4	-0.4	-0.8	2.1	0.3	-0.2	-0.1	0.0
SBC	0.3	0.3	0.01	4.4	5.2	-0.3	-0.3	1.9	1.5	2.1	-0.1	0.0
ANM	0.3	0.4	0.05	3.0	3.5	-0.4	-0.4	1.5	0.4	0.6	0.0	0.0
MNZ	0.3	0.3	0.04	3.6	4.1	-0.4	-1.0	0.9	1.3	1.4	-0.2	0.0
HPL	0.3	0.4	0.04	3.0	3.7	-0.4	-0.2	1.5	0.8	0.6	-0.1	0.0
NEM	0.4	0.3	0.05	3.2	4.3	-0.4	-1.1	1.2	1.3	0.5	-0.3	0.0
TEX	0.4	0.4	0.03	2.6	3.1	-0.5	0.0	1.5	0.3	0.2	0.0	0.0
SUS	0.3	0.4	0.01	2.6	2.8	-0.4	0.7	2.3	1.4	0.1	0.2	0.1
SEM	0.3	0.2	0.05	4.3	5.1	-0.3	-0.7	0.4	0.0	0.7	-0.4	-0.1
CWM	0.3	0.2	0.07	5.0	5.0	-0.3	-0.8	1.1	1.3	1.5	-0.7	0.0
SWM	0.3	0.2	0.05	5.0	5.2	-0.3	-0.8	0.4	0.4	1.1	-0.5	-0.1
PYU	0.3	0.2	0.01	4.6	5.5	-0.3	-0.3	1.9	0.6	0.7	0.0	0.0
CAM1	0.3	0.2	0.02	5.1	5.9	-0.3	-0.4	1.8	0.5	0.4	-0.1	0.1
CAM2	0.2	0.2	0.02	5.9	6.0	-0.1	-0.2	1.1	0.6	0.3	-0.4	0.0
NCA	0.3	0.3	0.04	3.5	4.1	-0.4	-0.6	1.0	1.1	1.0	-0.2	0.0
SCA	0.2	0.2	0.02	5.1	5.5	-0.2	-0.8	0.1	-0.4	0.6	-0.3	-0.1

	ТХх	TNn	DTR	TX90p	TN90p	TN10p	PRCPTOT	R95p	RX5day	CDD	R10mm	R20mm
	(° C/dec)	(° C/dec)	(° C/dec)	<b>(%d/</b> dec)	<b>(%d/</b> dec)	<b>(%d/</b> dec)	<b>(%/</b> dec)	<b>(%/</b> dec)	<b>(%/</b> dec)	( <b>d/</b> dec)	( <b>d/</b> dec)	( <b>d/</b> dec)
CAs	0.5	0.4	0.01	5.1	5.9	-0.5	-0.5	2.8	1.2	1.5	0.0	0.0
DES	0.5	0.5	0.00	4.9	5.8	-0.5	-0.8	2.5	1.5	1.9	-0.1	0.0
SBC	0.4	0.4	0.02	7.0	8.3	-0.3	-2.4	-0.1	1.3	2.1	-0.2	-0.1
ANM	0.5	0.7	0.03	5.4	6.4	-0.6	-1.0	3.3	1.3	0.5	-0.1	0.1
MNZ	0.5	0.4	-0.02	6.2	7.1	-0.4	-1.4	2.0	1.3	1.4	-0.3	0.0
HPL	0.5	0.5	0.02	5.6	6.4	-0.6	-0.3	1.1	0.7	0.6	0.0	0.0
NEM	0.5	0.5	0.04	5.3	6.6	-0.6	-0.1	2.6	1.3	0.7	-0.2	0.1
TEX	0.5	0.6	0.01	4.5	5.1	-0.6	0.1	2.9	1.7	0.2	-0.2	0.0
SUS	0.5	0.5	-0.01	4.8	4.7	-0.7	0.4	3.0	1.5	0.2	0.2	0.2
SEM	0.5	0.4	0.07	6.9	8.2	-0.5	-2.2	-0.8	0.2	1.3	-1.4	-0.3
CWM	0.5	0.4	0.05	7.5	8.0	-0.5	-1.2	0.0	0.5	2.3	-0.7	-0.1
SWM	0.5	0.4	0.06	7.6	8.3	-0.4	-2.1	-1.5	-0.1	1.5	-1.3	-0.3
PYU	0.4	0.4	0.03	7.5	7.8	-0.5	-2.6	-2.1	-0.3	1.0	-0.8	-0.2
CAM1	0.5	0.4	0.09	8.2	8.3	-0.4	-3.0	-0.3	-1.2	1.0	-1.6	-0.4
CAM2	0.4	0.3	0.04	8.2	7.5	-0.1	-2.6	-0.3	-1.4	1.3	-2.5	-0.3
NCA	0.5	0.5	0.01	5.9	6.6	-0.5	-0.8	2.3	1.7	1.0	-0.3	0.0
SCA	0.4	0.4	0.04	7.6	7.9	-0.3	-2.9	-2.0	-1.0	1.2	-1.7	-0.6

**Tabla 8.** Tendencias regionales futuras por década del Ensamble para los índices de temperatura y precipitación en el periodo 2021-2099 para el escenario SSP3-7.0. Los valores en negritas indican que la tendencia es significativa al 95 %

# Anexo C: Tablas de cambios promedio

Se muestran los cambios futuros de los índices de temperatura y precipitación en este anexo para el periodo 2080-2099 con respecto al periodo histórico (1981-2010) para los escenarios de bajas (SSP2-4.5) y altas (SSP3-7.0) emisiones.

	TXx	TNn	DTR	TX90p	TN90p	TN10p	PRCPTOT	R95p	RX5day	CDD	R10mm	R20mm
	(° C)	(° C)	(° C)	(%d)	(%d)	(%d)	(%)	(%)	(%)	(d)	(d)	(d)
CAs	3.1	2.6	-0.1	23.2	27.4	-9.6	4.4	33.9	16.5	-2.7	0.2	0.6
DES	3.3	2.9	-0.1	25.8	33.3	-9.6	2.0	34.7	19.2	3.4	-0.2	0.3
SBC	2.5	2.6	0.0	38.1	46.6	-10.1	2.7	28.1	11.0	3.6	-0.3	0.0
ANM	3.6	4.1	0.3	31.5	34.6	-8.7	-2.3	16.7	10.4	4.1	0.1	0.3
MNZ	3.2	2.7	0.1	32.0	40.2	-9.4	0.7	14.0	8.0	5.7	-0.3	0.3
HPL	3.5	3.5	0.3	30.7	35.4	-8.3	-2.5	19.9	7.8	5.7	-0.4	0.5
NEM	3.3	2.6	0.4	30.0	39.3	-8.2	-3.0	11.8	9.1	4.3	-0.9	0.2
TEX	3.6	4.1	0.2	24.7	30.2	-8.2	-3.1	12.4	5.8	2.5	-1.1	0.2
SUS	3.3	3.9	0.0	26.8	30.4	-8.2	8.2	21.7	11.5	1.3	1.4	1.4
SEM	3.3	2.1	0.4	34.7	55.1	-8.9	-6.1	3.4	6.4	3.9	-3.5	-0.6
CWM	3.2	2.3	0.4	43.6	48.8	-9.7	-1.1	10.8	7.3	10.6	-1.3	0.4
SWM	3.2	2.1	0.3	45.9	57.1	-9.4	-6.7	10.8	2.6	5.7	-3.0	-0.1
PYU	3.0	2.3	0.1	41.0	62.1	-9.4	-0.7	18.2	11.0	4.4	0.0	0.5
CAM1	3.2	2.4	0.3	47.3	67.5	-9.6	-7.6	7.9	6.9	4.6	-3.0	-0.2
CAM2	2.7	2.3	0.1	62.3	79.3	-10.5	-2.9	25.2	12.9	6.2	-1.6	2.5
NCA	3.3	3.0	0.2	31.5	37.8	-8.8	-1.0	18.2	10.3	5.7	-0.7	0.3
SCA	3.0	2.2	0.3	48.7	65.4	-9.6	-5.6	14.0	7.8	4.0	-2.4	0.2

**Tabla 9.** Cambios regionales promedio proyectados de los índices de temperatura y precipitación de acuerdo con el EnsMCG para en el periodo

 2080-2099 bajo el escenario SSP2-4.5. Los valores en negritas indican un acuerdo en el signo del cambio de >2/3 de los modelos.

	ТХх	TNn	DTR	ТХ90р	TN90p	TN10p	PRCPTOT	R95p	RX5day	CDD	R10mm	R20mm
	(° C)	(° C)	(° C)	(%d)	(%d)	(%d)	(%)	(%)	(%)	(d)	(d)	(d)
CAs	4.0	3.6	-0.1	32.0	42.7	-10.1	4.2	31.9	8.8	8.8	0.8	1.0
DES	4.4	3.9	-0.2	36.4	42.2	-10.1	1.9	49.0	13.9	-0.3	0.3	0.4
SBC	3.5	3.2	0.1	49.6	63.2	-10.5	-2.0	25.2	16.1	6.5	-0.4	0.0
ANM	4.9	4.6	0.2	45.1	50.0	-9.6	-1.7	29.8	14.8	2.2	0.3	0.6
MNZ	4.2	3.2	0.1	46.4	57.5	-10.1	-4.3	12.8	10.5	8.2	-1.7	-0.7
HPL	4.9	4.1	0.1	43.0	50.2	-9.2	-3.5	11.8	7.4	7.3	-0.7	0.1
NEM	4.7	3.7	0.4	43.6	52.9	-9.2	-7.2	6.5	7.4	7.0	-1.7	-0.1
TEX	5.1	4.2	0.1	35.3	42.6	-9.1	-2.1	24.6	11.2	3.5	-1.0	0.3
SUS	5.4	4.4	-0.2	38.8	41.7	-9.3	6.4	33.3	13.5	2.1	0.7	1.2
SEM	4.7	3.2	0.6	47.0	68.8	-9.9	-15.3	-3.9	6.4	5.3	-8.6	-2.0
CWM	4.5	3.2	0.4	57.2	64.9	-10.3	-4.9	3.9	4.2	16.6	-4.6	-1.1
SWM	4.5	3.0	0.5	59.3	72.2	-10.2	-15.0	3.8	0.9	11.6	-7.2	-1.7
PYU	3.6	3.4	0.3	60.8	73.4	-10.2	-12.2	2.8	6.4	6.2	-3.0	-0.4
CAM1	4.1	3.5	0.4	64.1	78.6	-10.3	-16.1	-11.3	0.0	6.0	-9.1	-1.0
CAM2	3.7	3.1	0.2	78.7	87.0	-10.6	-15.0	12.5	4.7	8.2	-7.3	-0.7
NCA	4.6	4.0	0.2	45.4	52.1	-9.6	-1.9	11.4	10.7	7.3	-1.2	-0.2
SCA	4.1	3.3	0.4	63.5	76.8	-10.3	-13.3	-3.4	2.7	7.8	-7.1	-1.8

**Tabla 10.** Cambios regionales promedio proyectados de los índices de temperatura y precipitación de acuerdo con el EnsMCG para en el periodo 2080-2099 bajo el escenario SSP3-7.0. Los valores en negritas indican un acuerdo en el signo del cambio de >2/3 de los modelos.