



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO
DERIVADAS DEL PROYECTO CMIP5 PARA
COLOMBIA Y SU COMPARACIÓN CON LAS
COMUNICACIONES NACIONALES DE CAMBIO
CLIMÁTICO**

Autora

Laura Daniela Villegas Villa

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental

Medellín, Colombia

2021



Proyecciones de cambio climático derivadas del proyecto CMIP5 para Colombia y su
comparación con las Comunicaciones Nacionales de Cambio Climático

Laura Daniela Villegas Villa

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniera Ambiental

Asesora:

Paola Andrea Arias Gómez Ph.D

Línea de Investigación:

Modelación Ambiental

Grupo de Investigación:

Grupo de Ingeniería y Gestión Ambiental (GIGA)

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental

Medellín, Colombia

2021

"¡Es importante no desperdiciar la capacidad intelectual de la mitad de la población! Piensen en cuantos misterios más se resolverían si todas las mentes capaces que trabajan en un problema, se duplicaran e incluyeran tanto a hombres como a mujeres."

Marla B. Sokolowski

Resumen

Se realizó una evaluación de las proyecciones de cambio climático presentadas en las CNCC de Colombia, directamente con las obtenidas a partir del análisis de proyecciones generadas por modelos de la Quinta Fase del Proyecto de Comparación de Modelos Acoplados (CMIP5). Así, se analizaron las simulaciones históricas para las variables precipitación y temperatura superficial del aire en Colombia a escala mensual, para 20 modelos CMIP5 para temperatura del aire en superficie y 15 modelos CMIP5 para precipitación, como fueron considerados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) en su Tercera CNCC, durante el periodo histórico 1976-2005. También se analizaron las proyecciones correspondientes a los tres períodos considerados en esta CNCC (2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100) para los cuatro escenarios RCP (2.6, 4.5, 6.0, 8.5) usados en el quinto reporte (AR5) del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC). Adicionalmente se realizó el mismo procedimiento para una selección de mejores modelos basada en el análisis de (Ortega, Arias, y Villegas, 2019)(Ortega, Arias, Villegas, Marquet, y Nobre, 2020) y también se utilizaron las simulaciones del proyecto CORDEX de 5 modelos para temperatura y 3 para precipitación de los utilizados en la Tercera CNCCCC de Colombia para realizar una reducción de escala. Finalmente, se compararon las CNCC de Colombia y sus resultados con las realizadas en el presente trabajo y se realizó una revisión de las metodologías utilizadas en otros países para la definición de escenarios de cambio climático planteadas en sus respectivas CNCC.

AGRADECIMIENTOS

Este Trabajo de Grado se desarrolló con el apoyo de la Universidad de Antioquia mediante el proyecto CODI PRG2017-16264 y el estímulo CODI para Trabajos de Grado 2020-1.

Agradezco a mi Alma Mater, por las múltiples oportunidades que me ha ofrecido y las experiencias vividas en todos sus escenarios, por formarme no solo en la ciencia sino en la pluralidad de una comunidad con pensamiento crítico.

A mi asesora, la profesora Paola Andrea Arias Gómez, por su calidad humana y profesional, y por alentar con sus palabras y su ejemplo a que seamos cada vez más mujeres en la ciencia.

A Geusep Ortega, por su acompañamiento desinteresado y el conocimiento compartido. Al profesor John Alejandro Martínez, por sus enseñanzas, orientación y por contagiar a sus estudiantes el gusto por la modelación atmosférica. A mi amigo Andrés Fernando González, quien me alentó a elegir la modalidad de trabajo de grado para la culminación de mi pregrado y fue apoyo en los momentos difíciles tanto anímicos como académicos. A mi familia, por su paciencia, apoyo y comprensión en este proceso de formación que tuvo tantos altibajos. Al amor, que endulzó los días difíciles y comparte hoy mis alegrías. A mi hermana del corazón, por su atenta escucha e incondicionalidad. A Juliana Benjumea, compañera en los hallazgos y aprendizajes de esta etapa de nuestras vidas profesionales. A las compañeras, compañeros, maestras y maestros, amigas y amigos que hacen del camino una aventura y un aprendizaje.

A este planeta azul, que me inspira y me da esperanza.

Índice general

1. Introducción	1
2. Marco teórico	3
2.1. El Calentamiento Global	3
2.2. El IPCC y la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático	3
2.3. La Conferencia de las Partes y las Comunicaciones Nacionales	4
2.4. Uso de modelos climáticos	5
2.5. Escenarios de emisiones de GEI y proyecciones	5
2.5.1. RCP2.6	5
2.5.2. RCP4.5	5
2.5.3. RCP6.0	6
2.5.4. RCP8.5	6
2.5.5. Ensamblajes multimodelo	6
2.6. Reducción de escala y simulaciones CORDEX	6
3. Objetivos	8
3.1. Objetivo general	8
3.2. Objetivos específicos	8
4. Metodología	9
4.1. Datos de observaciones	9
4.2. CMIP5	9
4.3. CORDEX	10
4.4. Revisión Comunicaciones Nacionales sobre Cambio Climático	10

5. Resultados	12
5.1. Análisis de simulaciones y proyecciones de temperatura superficial del aire . . .	12
5.1.1. Análisis de simulaciones históricas	12
5.1.2. Análisis de proyecciones para el siglo XXI	13
5.2. Análisis de simulaciones y proyecciones de precipitación	18
5.2.1. Análisis de simulaciones históricas	18
5.2.2. Análisis de proyecciones para el siglo XXI	22
5.2.3. Simulaciones CORDEX	29
5.3. Comparación entre las comunicaciones nacionales de Colombia	41
5.4. Comparación con comunicaciones nacionales de otros países	41
6. Conclusiones y discusión	43
A. Simulaciones históricas de temperatura de modelos CORDEX	45
B. Proyecciones de temperatura del aire en superficie de modelos CORDEX	51
C. Simulaciones históricas de precipitación de modelos CORDEX	57
D. Proyecciones de precipitación de modelos CORDEX	61
E. Comparación entre las Comunicaciones Nacionales de Colombia	64
F. Revisión de Comunicaciones Nacionales de otros países	65
Referencias	66

Índice de figuras

5.1. Comparación entre datos de referencia (ERA5; 1979-2005), históricos de los ensambles TM y MM (1976-2005) y sus sesgos con respecto a ERA5	13
5.2. Cambios proyectados de temperatura para todos los modelos con respecto al promedio histórico durante el periodo 2011-2040. Las regiones punteadas en a), b), c) y d) indican consenso del 80% entre los modelos para cada escenario y en e) indican acuerdo del 80% entre escenarios.	14
5.3. Cambios proyectados de temperatura para los mejores modelos con respecto al promedio histórico durante el periodo 2011-2040. Las regiones punteadas en a), b), c) y d) indican consenso del 80% entre los modelos para cada escenario y en e) indican acuerdo del 80% entre escenarios.	15
5.4. Cambios proyectados de temperatura para todos los modelos con respecto al promedio histórico durante el periodo 2041-2070. Las regiones punteadas en a), b), c) y d) indican consenso del 80% entre los modelos para cada escenario y en e) indican acuerdo del 80% entre escenarios.	16
5.5. Cambios proyectados de temperatura para los mejores modelos con respecto al promedio histórico durante el periodo 2041-2070. Las regiones punteadas en a), b), c) y d) indican consenso del 80% entre los modelos para cada escenario y en e) indican acuerdo del 80% entre escenarios.	17
5.6. Cambios proyectados de temperatura para todos los modelos con respecto al promedio histórico durante el periodo 2071-2100. Las regiones punteadas en a), b), c) y d) indican consenso del 80% entre los modelos para cada escenario y en e) indican acuerdo del 80% entre escenarios.	19
5.7. Cambios proyectados de temperatura para los mejores modelos con respecto al promedio histórico durante el periodo 2071-2100. Las regiones punteadas en a), b), c) y d) indican consenso del 80% entre los modelos para cada escenario y en e) indican acuerdo del 80% entre escenarios.	20
5.8. Comparación entre datos de referencia (TRMM; 1998-2005), históricos de los ensambles TM y MM (1976-2005) y sus diferencias con respecto a TRMM	23
5.9. Cambios proyectados de precipitación para todos los modelos con respecto al promedio histórico durante el periodo 2011-2040	24
5.10. Cambios proyectados de precipitación para los mejores modelos con respecto al promedio histórico durante el periodo 2011-2040	25
5.11. Cambios proyectados de precipitación para todos los modelos con respecto al promedio histórico durante el periodo 2041-2070	27

5.12. Cambios proyectados de precipitación para los mejores modelos con respecto al promedio histórico durante el periodo 2041-2070	28
5.13. Cambios proyectados de precipitación para todos los modelos con respecto al promedio histórico durante el periodo 2071-2100	30
5.14. Cambios proyectados de precipitación para los mejores modelos con respecto al promedio histórico durante el periodo 2071-2100	31
5.15. Climatología de temperatura superficial del aire de ERA5 a), simulaciones históricas CMIP5 de los 5 modelos con simulaciones CORDEX b), ensamble de las simulaciones CORDEX de estos modelos c) y sus sesgos respecto a ERA5 d) y e), respectivamente.	33
5.16. Proyecciones de temperatura superficial del aire bajo el RCP 8.5 para el periodo 2011-2040 para el ensamble de los 5 modelos CMIP5 a), el ensamble de las simulaciones CORDEX de estos modelos b) y sus cambios respecto al periodo histórico c) y d), respectivamente.	34
5.17. Proyecciones de temperatura superficial del aire bajo el RCP 8.5 para el periodo 2041-2070 para el ensamble de los 5 modelos CMIP5 a), el ensamble de las simulaciones CORDEX de estos modelos b) y sus cambios respecto al periodo histórico c) y d), respectivamente.	35
5.18. Proyecciones de temperatura superficial del aire bajo el RCP 8.5 para el periodo 2071-2100 para el ensamble de los 5 modelos CMIP5 a), el ensamble de las simulaciones CORDEX de estos modelos b) y sus cambios respecto al periodo histórico c) y d), respectivamente.	36
5.19. Climatología de precipitación de TRMM a), simulaciones históricas CMIP5 de los 3 modelos con simulaciones CORDEX b), ensamble de las simulaciones CORDEX de estos modelos c) y sus sesgos respecto a TRMM d) y e), respectivamente. . .	37
5.20. Proyecciones de precipitación bajo el RCP 8.5 para el periodo 2011-2040 para el ensamble de los 3 modelos CMIP5 a), el ensamble de las simulaciones CORDEX de estos modelos b) y sus cambios respecto al periodo histórico c) y d), respectivamente.	38
5.21. Proyecciones de precipitación bajo el RCP 8.5 para el periodo 2041-2070 para el ensamble de los 3 modelos CMIP5 a), el ensamble de las simulaciones CORDEX de estos modelos b) y sus cambios respecto al periodo histórico c) y d), respectivamente.	39
5.22. Proyecciones de precipitación bajo el RCP 8.5 para el periodo 2071-2100 para el ensamble de los 3 modelos CMIP5 a), el ensamble de las simulaciones CORDEX de estos modelos b) y sus cambios respecto al periodo histórico c) y d), respectivamente.	40
A.1. Climatología de temperatura superficial del aire de ERA5 a), simulación histórica para el modelo CSIRO-Mk3-6-0 b), simulación CORDEX de este modelo c), y sus sesgos respecto a ERA5 d) y e), respectivamente.	46
A.2. Climatología de temperatura superficial del aire de ERA5 a), simulación histórica para el modelo HadGEM2-ES b), simulación CORDEX de este modelo c), y sus sesgos respecto a ERA5 d) y e), respectivamente.	47

A.3. Climatología de temperatura superficial del aire de ERA5 a), simulación histórica para el modelo IPSL-CM5A-MR b), simulación CORDEX de este modelo c), y sus sesgos respecto a ERA5 d) y e), respectivamente.	48
A.4. Climatología de temperatura superficial del aire de ERA5 a), simulación histórica para el modelo MIROC5 b), simulación CORDEX de este modelo c), y sus sesgos respecto a ERA5 d) y e), respectivamente.	49
A.5. Climatología de temperatura superficial del aire de ERA5 a), simulación histórica para el modelo NorESM1-M b), simulación CORDEX de este modelo c), y sus sesgos respecto a ERA5 d) y e), respectivamente.	50
B.1. Proyecciones de temperatura bajo el RCP 8.5 para el periodo 2071-2100 para el modelo CSIRO-Mk3-6-0 CMIP5 a), su simulación CORDEX b) y sus cambios respecto al periodo histórico c) y d) respectivamente.	52
B.2. Proyecciones de temperatura bajo el RCP 8.5 para el periodo 2071-2100 para el modelo HadGEM2-ES CMIP5 a), su simulación CORDEX b) y sus cambios respecto al periodo histórico c) y d) respectivamente.	53
B.3. Proyecciones de temperatura bajo el RCP 8.5 para el periodo 2071-2100 para el modelo IPSL-CM5A-MR CMIP5 a), su simulación CORDEX b) y sus cambios respecto al periodo histórico c) y d) respectivamente.	54
B.4. Proyecciones de temperatura bajo el RCP 8.5 para el periodo 2071-2100 para el modelo MIROC5 CMIP5 a), su simulación CORDEX b) y sus cambios respecto al periodo histórico c) y d) respectivamente.	55
B.5. Proyecciones de temperatura bajo el RCP 8.5 para el periodo 2071-2100 para el modelo NorESM1-M CMIP5 a), su simulación CORDEX b) y sus cambios respecto al periodo histórico c) y d) respectivamente.	56
C.1. Climatología de precipitación de TRMM a), simulación histórica para el modelo CSIRO-Mk3-6-0 b), simulación CORDEX de este modelo c), y sus sesgos respecto a TRMM d) y e), respectivamente.	58
C.2. Climatología de precipitación de TRMM a), simulación histórica para el modelo IPSL-CM5A-MR b), simulación CORDEX de este modelo c), y sus sesgos respecto a TRMM d) y e), respectivamente.	59
C.3. Climatología de precipitación de TRMM a), simulación histórica para el modelo MIROC5 b), simulación CORDEX de este modelo c), y sus sesgos respecto a TRMM d) y e), respectivamente.	60
D.1. Proyecciones de precipitación bajo el RCP 8.5 para el periodo 2071-2100 para el modelo CSIRO-Mk3-6-0 CMIP5 a), su simulación CORDEX b) y sus cambios respecto al periodo histórico c) y d) respectivamente.	61
D.2. Proyecciones de precipitación bajo el RCP 8.5 para el periodo 2071-2100 para el modelo IPSL-CM5A-MR CMIP5 a), su simulación CORDEX b) y sus cambios respecto al periodo histórico c) y d) respectivamente.	62
D.3. Proyecciones de precipitación bajo el RCP 8.5 para el periodo 2071-2100 para el modelo MIROC5 CMIP5 a), su simulación CORDEX b) y sus cambios respecto al periodo histórico c) y d) respectivamente.	63

Índice de tablas

4.1. Modelos utilizados en los diferentes ensambles y su resolución original.	11
---------------------------------------------------------------------------------------	----

Capítulo 1

Introducción

Las Comunicaciones Nacionales sobre Cambio Climático (CNCC) son el mecanismo de reporte designado por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC) para que las partes informen al mundo sus avances en la implementación de la Convención en términos de mitigación, adaptación, entre otros, y reúnan la información disponible para orientar la planificación y elaboración de políticas que permitan mejorar la respuesta ante el cambio climático (IDEAM, PNUD, MADS, DNP, y CANCELLEERÍA, 2017). En las CNCC se realizan proyecciones de variables climáticas, por medio de la revisión de resultados de gran cantidad de modelos climáticos globales de diferentes grados de complejidad, los cuales simulan numerosos aspectos relevantes en la dinámica climática del planeta. Estos también son comparados con datos históricos de observaciones y permiten obtener trayectorias de cambio climático, para lo cual los modelos se valen de la información contenida en los escenarios de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) y de usos del suelo (IPCC, 2014). Cada uno de los países adscritos a la CMNUCC asume, entre otros, el compromiso de presentar CNCC como un instrumento que permita evaluar la vulnerabilidad ante este fenómeno, así como las emisiones de GEI de cada uno de los sectores, y son el sustento de las decisiones a tomar a nivel nacional e internacional (IDEAM, 2001). Dado que Colombia ratificó el acuerdo de la CMNUCC en 1994 (IDEAM, 2001), a la fecha ha presentado tres CNCC, cuya elaboración está a cargo del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Estos informes siguen los lineamientos aportados por los Reportes de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), ofreciendo a nivel general, información sobre los inventarios de emisiones de GEI, acciones de mitigación, vulnerabilidad, adaptación y educación, así como las dificultades presentadas en la elaboración de cada una de las CNCC (IDEAM, 2001) (IDEAM, PNUD, MADS, DNP, y CANCELLEERÍA, 2015b) (IDEAM y cols., 2017). La Primera CNCC de Colombia se encontró sumamente limitada por la disponibilidad de información y tecnología, y por la dificultad para aplicar los protocolos planteados desde el IPCC al contexto del país. En esta CNCC no se presentó detalle sobre la metodología utilizada y los resultados obtenidos fueron reducidos. En la Segunda CNCC se tuvo como guía el Cuarto Reporte de Evaluación del IPCC (AR4) mientras que la Tercera CNCC se basó en el Quinto Reporte de Evaluación del IPCC (AR5). Estas últimas, son contradictorias en cuanto a sus proyecciones de precipitación y temperatura del aire en superficie para el territorio colombiano. Además, carecen de detalle y claridad en cuanto a las metodologías

utilizadas para la obtención de los resultados presentados en dichos informes, lo cual genera preocupación, debido a que estos documentos sirven como base para la toma de decisiones en cuanto a la vulnerabilidad de las comunidades y ecosistemas del país y las medidas de mitigación y adaptación al cambio climático a nivel nacional. Por tal razón, se hace necesario realizar una evaluación de los resultados de las proyecciones presentados en dichos documentos, directamente con los obtenidos de la Quinta Fase del Proyecto de Comparación de Modelos Acoplados (CMIP5). Este trabajo de grado plantea realizar dicho análisis, además de una revisión de las diferencias y similitudes entre la Segunda y Tercera CNCC de Colombia y una revisión de otras comunicaciones nacionales de países miembros de la CMNUCC, para tener un panorama general de lo presentado en estos documentos.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1. El Calentamiento Global

La Tierra ha sufrido grandes cambios conocidos por la ciencia a través de su historia en términos de composición química de la atmósfera y temperatura global, debidos a procesos que incluyen la colisión de meteoritos, el movimiento de los continentes y la ocurrencia de erupciones volcánicas prolongadas. Sin embargo, la actividad humana es actualmente la principal causa del cambio ambiental observado a escala global debido a las alteraciones que ha generado en los ciclos biogeoquímicos del planeta (Lewis y Maslin, 2015). Muchas de las variaciones observadas desde el año 1950 no han tenido precedentes en los últimos decenios a milenios (IPCC, 2014). Debido a ello, se habla de Calentamiento Global, fenómeno caracterizado por un incremento en la temperatura superficial promedio global, promediada durante un periodo de 30 años, la cual es ocasionada por el incremento en la emisión de GEI capaces de ocasionar un desbalance radiativo en la Tierra (Allen, M.R. y cols., 2018). En consecuencia, se ha estimado que las actividades humanas han ocasionado un aumento en la temperatura promedio de la Tierra de alrededor de 1.0°C respecto a niveles pre-industriales y está previsto que este calentamiento global alcance 1.5°C entre 2030 y 2050, si las emisiones de GEI continúan creciendo a la tasa actual (IPCC, 2018).

2.2. El IPCC y la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático

Como reacción ante la creciente preocupación por el calentamiento global evidenciado en las últimas décadas, en 1980 se llevó a cabo la primera Conferencia Mundial sobre el Clima, donde por primera vez, se habló de la influencia del ser humano sobre el clima del Planeta (CMNUCC, 2007). En adelante, fue creciendo el interés por el tema y en el año 1988, la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) fundaron el IPCC, que ha tenido la misión de evaluar periódicamente el conocimiento científico referente al cambio climático y proporcionar bases a los tomadores de

decisiones para la creación de políticas de adaptación y mitigación, así como alertar sobre sus consecuencias, riesgos futuros, adaptación y mitigación de los efectos (IPCC, 2013). Dos años más tarde a su fundación, el IPCC publicó su Primer Informe de Evaluación (FAR) (CMNUCC, 2007), en el cual se abordan los temas asociados a GEI y sus efectos, Calentamiento Global, cambio en el nivel del mar, forzamiento climático y la historia del cambio en el clima de la Tierra (IPCC, 1990). Mediante este informe, pudo evidenciarse la influencia del ser humano sobre el clima del planeta, por lo que en la segunda Conferencia Mundial sobre el Clima se solicitó hacer un tratado mundial que permitiera la realización de negociaciones y la creación de una Convención sobre Cambio Climático (CMNUCC, 2007).

Es así como en 1992, durante la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo (o Cumbre de la Tierra), se abrió a la firma la CMNUCC, la cual estableció por objetivo estabilizar las concentraciones de GEI en la atmósfera, de tal forma que no generen interferencias nocivas en el sistema climático del planeta producto de la actividad antrópica (CMNUCC, 1997).

2.3. La Conferencia de las Partes y las Comunicaciones Nacionales

Desde su entrada en vigencia, los países que se han adherido al tratado de la CMNUCC se reúnen anualmente en la Conferencia de las Partes (COP), con el objetivo de generar un diálogo acerca de las formas más adecuadas de abordar el cambio climático (CMNUCC, 2007). Este tratado divide los países miembros en tres grupos, de acuerdo con sus compromisos diferenciales: las partes agrupadas en el Anexo I corresponden a países industrializados y miembros de la Organización de Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE) y países con economías en transición (PET); las agrupadas en el Anexo II corresponden únicamente a los países miembros de la OCDE incluidos en el Anexo I, los cuales deben contribuir con el financiamiento a los países en desarrollo para cumplir sus metas de reducción de emisiones; el tercer grupo es conformado por las partes no incluidas en el Anexo I y está constituido en su mayoría por países en desarrollo (CMNUCC, 2007), en este último está incluido Colombia.

Uno de los compromisos asumidos por los países que ratifican la CMNUCC es presentar regularmente sus CNCC para informar a las demás partes sobre el estado y las acciones adelantadas para enfrentar el cambio climático, además de ser un instrumento para la toma de decisiones a nivel nacional e internacional (IDEAM, 2001). Las tres CNCC emitidas por Colombia hasta la fecha están basadas en los Reportes de Evaluación del IPCC, donde se realizan proyecciones de cambio climático, por medio de la revisión de resultados de gran cantidad de modelos climáticos de diferentes grados de complejidad, los cuales simulan numerosos aspectos relevantes en la dinámica climática del planeta. Estos resultados también son comparados con datos históricos de observaciones, lo que permite obtener proyecciones de cambio climático, para lo cual los modelos se valen de la información contenida en los escenarios de emisiones de GEI y de usos del suelo (IPCC, 2014).

2.4. Uso de modelos climáticos

Un modelo climático es una representación numérica del sistema climático que calcula estimaciones de masa, momento y energía, con base en las leyes físicas de la conservación. Estos modelos son evaluados con gran cantidad de datos de observaciones e investigaciones de eventos pasados y se plantean con la intención de proyectar la distribución de ciertas variables climáticas para largos intervalos de tiempo (Gettelman y Rood, 2016). Dichos modelos son puestos en funcionamiento bajo representaciones alternativas de posibles futuros, llamadas escenarios, y son un instrumento para analizar de qué manera sistemas dinámicos, tales como el crecimiento poblacional, el desarrollo socioeconómico o el cambio tecnológico influyen las emisiones futuras. De esta manera, se pueden evaluar impactos e iniciativas de adaptación y mitigación para diferentes condiciones posibles. Por ello, el IPCC ha definido y usado diferentes escenarios de emisiones en sus reportes a medida que mejora el conocimiento que se tiene respecto a las emisiones futuras de GEI y al cambio climático, teniendo en cuenta los cambios a nivel económico y tecnológico alrededor del mundo (IPCC, 2000).

2.5. Escenarios de emisiones de GEI y proyecciones

En su Reporte Especial de Escenarios de Emisión (SRES), el IPCC presentó 40 escenarios diferentes, con el objetivo de evaluar todos los resultados e incertidumbres posibles asociadas a diferentes emisiones de GEI (IPCC, 2000). Posteriormente, en el Quinto Reporte de Evaluación (AR5) se presentaron las Trayectorias de Concentración Representativas (RCP) para proyectar escenarios de emisiones de GEI, teniendo en cuenta la densidad poblacional, la economía, el estilo de vida, los patrones de uso del suelo, el uso de la energía, los avances tecnológicos y la política climática (IPCC, 2014). La Tercera CNCC de Colombia se basa en el uso de proyecciones asociadas a los cuatro RCPs planteados en el AR5.

2.5.1. RCP2.6

El RCP2.6 indica un forzamiento radiativo de $2.6\text{W}/\text{m}^2$ y es el escenario con menores emisiones de GEI, con una reducción del 95% de las emisiones de GEI para el año 2100 con respecto al escenario de referencia, una reducción de más del 100% en emisiones de CO_2 a aproximadamente 1GtC al año a finales de siglo y una concentración de alrededor de $490\text{ppm CO}_2\text{eq}$. Esto último, debido a emisiones negativas en el sector energético derivadas de la Captura y Almacenamiento de Carbono (CAC) y la migración del uso de combustibles fósiles a energías renovables y nuclear. (Van Vuuren, Stehfest, y cols., 2011)(Van Vuuren, Edmonds, y cols., 2011)

2.5.2. RCP4.5

EL RCP4.5 indica un forzamiento radiativo de $4.5\text{W}/\text{m}^2$, una concentración de alrededor de $526\text{ppm CO}_2\text{eq}$ y una reducción en emisiones de GEI del 70% para el año 2100, que

se estabilizan en 15GtC al año a finales de siglo. Para esta ruta, se continúan utilizando combustibles fósiles principalmente para la CAC pero se da migración a energías renovables y nuclear, además del uso de bioenergía, disminuye los usos de la tierra para ganadería y se suple la demanda alimentaria con alimentos de baja huella de carbono (Thomson y cols., 2011).

2.5.3. RCP6.0

El RCP6.0 indica un forzamiento radiativo de 6.0W/m^2 y una concentración de 855ppm CO_2eq y se alcanzan emisiones de 13GtC/año en 2100. Esta ruta también se caracteriza por una disminución en la producción de carbón pero se incrementa el uso de gas natural en 2.6 veces sus niveles con respecto al año 2000, se incluyen plantas nucleares y tecnología CAC en centrales térmicas y la población y el crecimiento económico conducen a una expansión del área urbana y de tierras de cultivo, mientras decrecen las áreas de pastizales y de bosques (Masui y cols., 2011).

2.5.4. RCP8.5

El RCP8.5 es el escenario con mayores emisiones de GEI, con una concentración de alrededor de 1370ppm CO_2eq para el año 2100, año para el que se triplicarían las emisiones de GEI con respecto al año 2000. No incluye metas específicas de mitigación y proyecta un crecimiento poblacional continuo que alcanza los 12000 millones de personas para el año 2100, con alta desigualdad social, lo que genera gran expansión urbana y pérdida de áreas boscosas. Debido al bajo avance tecnológico y a su bajo costo, los combustibles fósiles como el carbón siguen siendo la fuente de energía primaria, multiplicándose su uso en 10 veces con respecto al presente, siendo los responsables de 3/4 del total de las emisiones para finales de siglo (Riahi y cols., 2011).

2.5.5. Ensamblajes multimodelo

Para verificar el consenso entre modelos y mejorar la confiabilidad de las proyecciones obtenidas, el IPCC realiza ensambles multimodelo, definidos como grupos comparables de simulaciones, que pueden ser empleados para obtener un estimado más preciso sobre la propiedad de un modelo, a través de un promedio climatológico de la frecuencia de algún evento (Knutti, Furrer, Tebaldi, Cermak, y Meehl, 2010).

2.6. Reducción de escala y simulaciones CORDEX

Los Modelos de Circulación Regional (MCR) son modelos con dominios menores a los MCG y cuentan con una resolución espacial más fina (5-200km), lo que permite hacer análisis detallados sobre áreas pequeñas. Estos modelos son usados para generar mejores estadísticas

del clima, corriendo modelos a una alta resolución a partir de las salidas de modelos de resolución más gruesa (MCG) (Gettelman y Rood, 2016). Para este trabajo, se decidió trabajar con el Experimento Coordinado de Reducción de Escala Climática Regional (CORDEX), cuyas simulaciones fueron corridas con las salidas de los modelos globales del experimento CMIP5 (Kumar, Sarthi, Kumar, Barat, y Sinha, 2020).

Capítulo 3

Objetivos

3.1. Objetivo general

Comparar las proyecciones de precipitación y temperatura expuestas en la Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático de Colombia, con los resultados obtenidos de las proyecciones derivadas directamente del proyecto CMIP5.

3.2. Objetivos específicos

1. Revisar la Segunda y Tercera CNCC e identificar similitudes y diferencias entre ambas comunicaciones respecto a las proyecciones realizadas para las variables temperatura superficial y precipitación.
2. Analizar el escenario de cambio climático planteado en la Tercera CNCC para Colombia, y comparar con las proyecciones obtenidas del promedio ensamble de los modelos CMIP5 empleados en la Tercera CNCC.
3. Comparar las metodologías empleadas para la obtención de escenarios de cambio climático de otros países con la empleada en la Tercera CNCC.

Capítulo 4

Metodología

4.1. Datos de observaciones

Como datos de referencia, se utilizaron registros mensuales de temperatura del aire en superficie del Proyecto de Reanálisis ERA5 (periodo 1979-2005) y precipitación de los datos satelitales de la Misión de Medición de Lluvias Tropicales (TRMM; periodo 1998-2005). Estos datos fueron llevados a la resolución de los modelos CMIP5, para realizar la evaluación de sesgos en relación con los datos históricos para el período 1976-2005.

4.2. CMIP5

Se utilizaron 20 modelos CMIP5 para temperatura superficial del aire y 15 modelos para precipitación, con la intención de realizar una comparación lo más cercana posible a lo presentado en la Tercera CNCC de Colombia, empleando los mismos modelos utilizados en dicha publicación. Estos fueron obtenidos de <https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip5/>. El ensamble multimodelo que considera la totalidad de estos modelos (TM) se estimó mediante interpolación bilineal para la resolución común más gruesa ($2.8^{\circ} \times 2.8^{\circ}$) (ver tabla 4.1). Adicionalmente, se obtuvo el ensamble de los mejores modelos (MM), correspondientes a los coincidentes con la lista de mejores modelos identificada por (Ortega y cols., 2020) (Ortega y cols., 2019), basada en el análisis de diagramas de Taylor y revisión de literatura. Se seleccionaron 6 modelos, los cuales también fueron considerados en el ensamble TM para temperatura del aire en superficie. Estos mismos modelos fueron usados para estimar el ensamble MM de precipitación, pese a que solo 4 de ellos coinciden los modelos del ensamble TM de los modelos considerados en la Tercera CNCC. Lo anterior se decidió con el ánimo de tener mayor robustez en el ensamble MM para ambas variables.

Para las proyecciones, se dividió el futuro en los periodos 2011-2040 (corto plazo), 2041-2070 (mediano plazo) y 2071-2100 (largo plazo), tal como fue presentado en la Tercera CNCC de Colombia, usando el mismo número de modelos que para la revisión de sesgos y el mismo procedimiento de cambio de resolución y ensamble multimodelo. Este procedimiento se realizó bajo las cuatro RCPs presentadas en el AR5. Adicionalmente, estimó un ensamble

multiescenario para cada uno de los periodos proyectados, para realizar una comparación con las proyecciones mostradas por IDEAM para ambas variables. Este se obtuvo por interpolación bilineal de los ensambles multimodelo de las cuatro RCPs. Los cambios proyectados fueron obtenidos con respecto al ensamble de los mismos modelos para el periodo histórico 1976-2005.

4.3. CORDEX

Para la comparación entre las simulaciones CORDEX y sus modelos originales, se obtuvieron los datos de 5 simulaciones CORDEX para temperatura del aire en superficie y 3 para precipitación, cuidando que estas coincidieran con los MCGs utilizados en los ensambles TM. Estos datos se obtuvieron de <https://esgf-node.ipsl.upmc.fr/search/cordex-ipsl/>. Para este estudio, se utilizó el dominio CAM44 (Central América) y se realizó un remapeo para llevar los datos de coordenadas polares a un malla regular y se realizó un procedimiento similar para llevar las bases de datos de observaciones a dicha resolución. Posteriormente, se estimaron los ensambles multimodelos por medio de interpolación bilineal. Los cambios proyectados fueron obtenidos con respecto al ensamble de los mismos modelos para el periodo histórico 1976-2005.

4.4. Revisión Comunicaciones Nacionales sobre Cambio Climático

Finalmente, se realizó una revisión de 37 CNCC de otros países, procurando incluir algunas de las partes incluidas en el Anexo I de la CMNUCC como de los países no incluidos. Esta revisión considera el número de la última publicación realizada, el inventario de emisiones del año más reciente sin incluir mitigación por cambios de uso del suelo (LULC) e información referente a las proyecciones de cambio climático realizadas por cada nación, incluyendo fuente de datos y periodo de datos de observaciones, escenarios, modelos y periodos utilizados para las proyecciones. Además, se revisó si la metodología consideró o no reducción de escala y de qué tipo. En particular, fue de especial interés revisar si en otra CNCC se obtuvieron ensambles multiescenario como los presentados en la Tercera CNCC de Colombia.

Tabla 4.1: Modelos utilizados en los diferentes ensambles y su resolución original.

Modelo	Resolución original lonxlat	Referencia	TM		MM		CORDEX	
			tas	pr	tas	pr	tas	pr
bcc-csm1-1	2.8125° × 2.8125°	(Wu y cols., 2013)	X	X				
bcc-csm1-1-m	1.125° × 1.125°	(Wu y cols., 2014)	X					
CCSM4	1.25° × 0.9°	(Gent y cols., 2011)	X	X	X	X		
CESM1-CAM5	1.25° × 0.9°	(L. Wang, Liu, y Brown, 2017)	X		X	X		
CSIRO-MK3.6.0	1.875° × 1.875°	(Zhang, Han, y Shi, 2017)	X	X			X	X
FIO-ESM	2.875° × 2.875°	(Bao, Song, y Qiao, 2020)	X	X				
GFDL-CM3	2.5° × 2°	(Hoogewind, Baldwin, y Trapp, 2017)	X	X				
GFDL-ES-M2G	2.5° × 2°	(Dunne y cols., 2012)	X					
GISS-E2-H	2.5° × 2°	(Schmidt y cols., 2014)	X	X				
GISS-E2-R	2.5° × 2°	(Schmidt y cols., 2014)	X	X				
HadGEM2-AO	1.875° × 1.25°	(Martin y cols., 2011)	X	X				
HadGEM2-ES	1.875° × 1.25°	(Martin y cols., 2011)	X		X	X	X	
IPSL-CM5A-LR	3.75° × 1.875°	(Dufresne y cols., 2013)	X	X				
IPSL-CM5A-MR	2.5° × 1.25°	(Dufresne y cols., 2013)	X	X			X	X
MIROC-ESM	2.8125° × 2.8125°	(Watanabe y cols., 2010)	X	X	X	X		
MIROC-ESM-CHEM	2.8125° × 2.8125°	(Watanabe y cols., 2010)	X	X	X	X		
MIROC5	1.4° × 1.4°	(S. Watanabe y cols., 2011)	X	X	X	X	X	X
MRI-CGCM3	1.12° × 1.12°	(Yukimoto y cols., 2012)	X	X				
NorESM1-M	2.5° × 1.9°	(Bentsen y cols., 2012)	X				X	
NorESM1-ME	2.5° × 1.9°	(Tjiputra y cols., 2013)	X	X				

Capítulo 5

Resultados

5.1. Análisis de simulaciones y proyecciones de temperatura superficial del aire

5.1.1. Análisis de simulaciones históricas

La figura 5.1 presenta los datos estacionales de temperatura del reanálisis ERA5, el promedio estacional del histórico de todos los modelos (TM) y los mejores modelos (MM) y sus sesgos con respecto a los datos de observaciones. Los datos de ERA5 (a) muestran temperaturas bajas, de entre 17-20°C sobre la cordillera de los Andes y la Sierra Nevada de Santa Marta, seguidas de valores entre los 21-27°C en la costa Pacífica y las temperaturas más altas entre 23-29°C en las regiones Caribe, Orinoquía y Amazonas. Las temperaturas más altas se observan para el Caribe en Junio-Agosto (JJA) y Septiembre-Noviembre (SON), y para la Orinoquía y el Amazonas en Diciembre-Febrero (DEF). Además, las temperaturas más altas presentadas para el país se encuentran al sur de la Guajira y las más bajas a lo largo de la Cordillera de los Andes y en la Sierra Nevada de Santa Marta. Esto coincide en general con lo presentado en (Pabón-Caicedo, Eslava-Ramírez, y Gómez-Torres, 2001) para el clima de Colombia, donde además se señalan en la Guajira temperaturas de hasta 30°C, mientras que los picos montañosos mas altos como nevados y páramos cuentan con temperaturas bajo cero (Giraldo Gómez, Mejía Fernández, y Zambrano Nájera, 2018).

Para el promedio histórico del ensamble TM (b), se presentan los valores más bajos entre 21-24°C en la región Andina, mientras que para MM (c) se dan de 19-24°C para la misma región; seguidos de valores similares para la región Pacífico con un máximo de 26°C, aproximadamente, al norte de la región para ambos ensambles. Las regiones Caribe, Orinoquía y Amazonas tienen valores de entre 24-29°C, los valores más altos para el Caribe y la Orinoquía se simulan en Marzo-Mayo (MAM), mientras que para el Amazonas se dan en SON en ambos conjuntos de datos. Para los sesgos (d y e), se observan diferencias positivas sobre la región Andina en ambos conjuntos de datos, siendo más altas en el ensamble de TM. Esto indica dificultad en los modelos para representar las bajas temperaturas en esta área. En contraste, los valores negativos sobre la Orinoquía indican dificultad para representar las altas temperaturas

sobre la región. Estos valores tienen mayor magnitud en el ensamble MM, principalmente en DEF, que es el trimestre más cálido en la Orinoquía, como se evidenció previamente en los datos de observaciones.

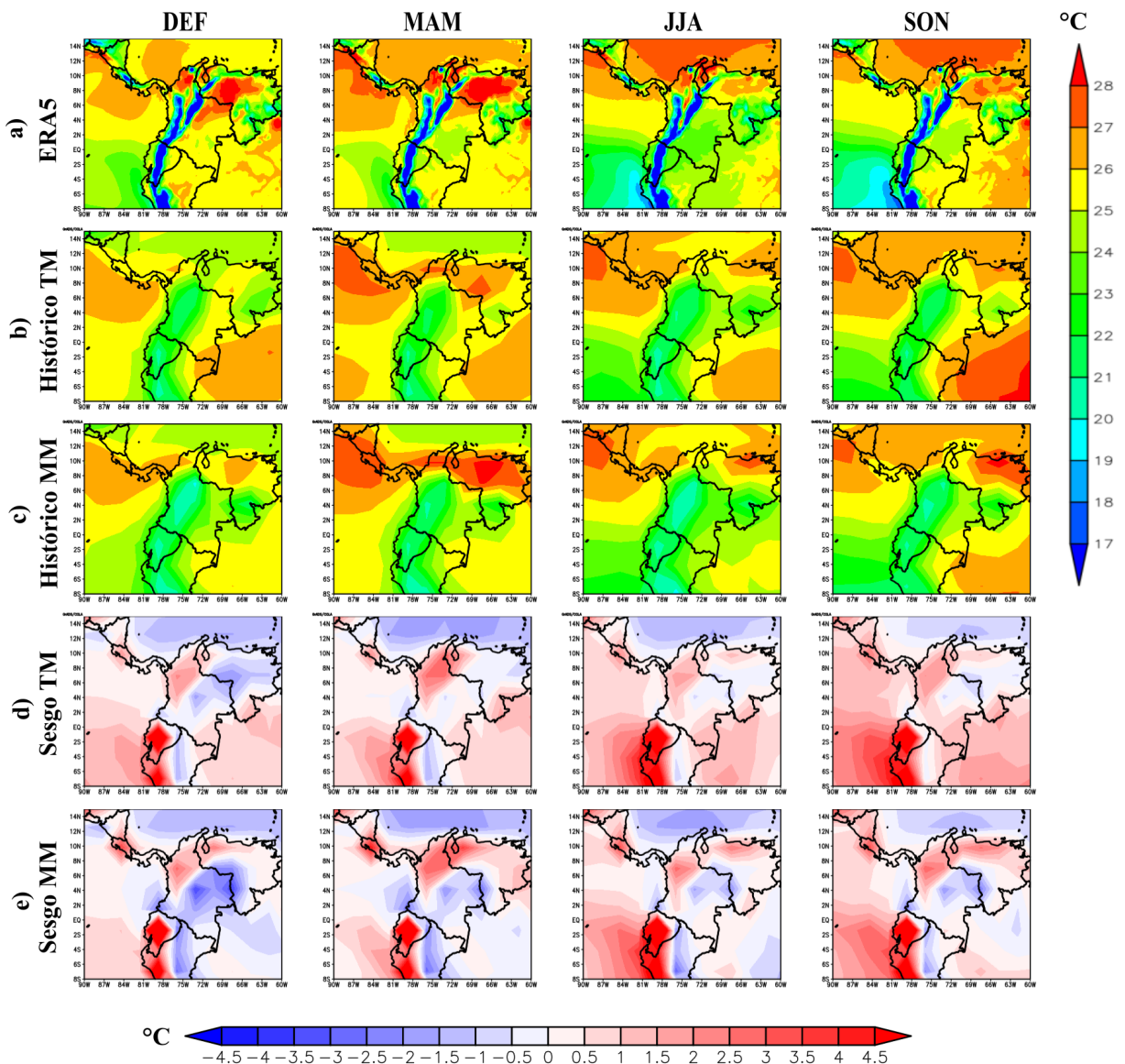


Figura 5.1: Comparación entre datos de referencia (ERA5; 1979-2005), históricos de los ensambles TM y MM (1976-2005) y sus sesgos con respecto a ERA5

5.1.2. Análisis de proyecciones para el siglo XXI

2011-2040

Las figuras 5.2 y 5.3 presentan el cambio proyectado de temperatura para cada RCP y el ensamble multiescenario para el periodo 2011-2040. Las áreas punteadas indican un acuerdo

entre modelos del 80%. A nivel general, se observan aumentos de temperatura por debajo de los 1.6°C en todo el territorio colombiano, tanto para el ensamble TM como para MM.

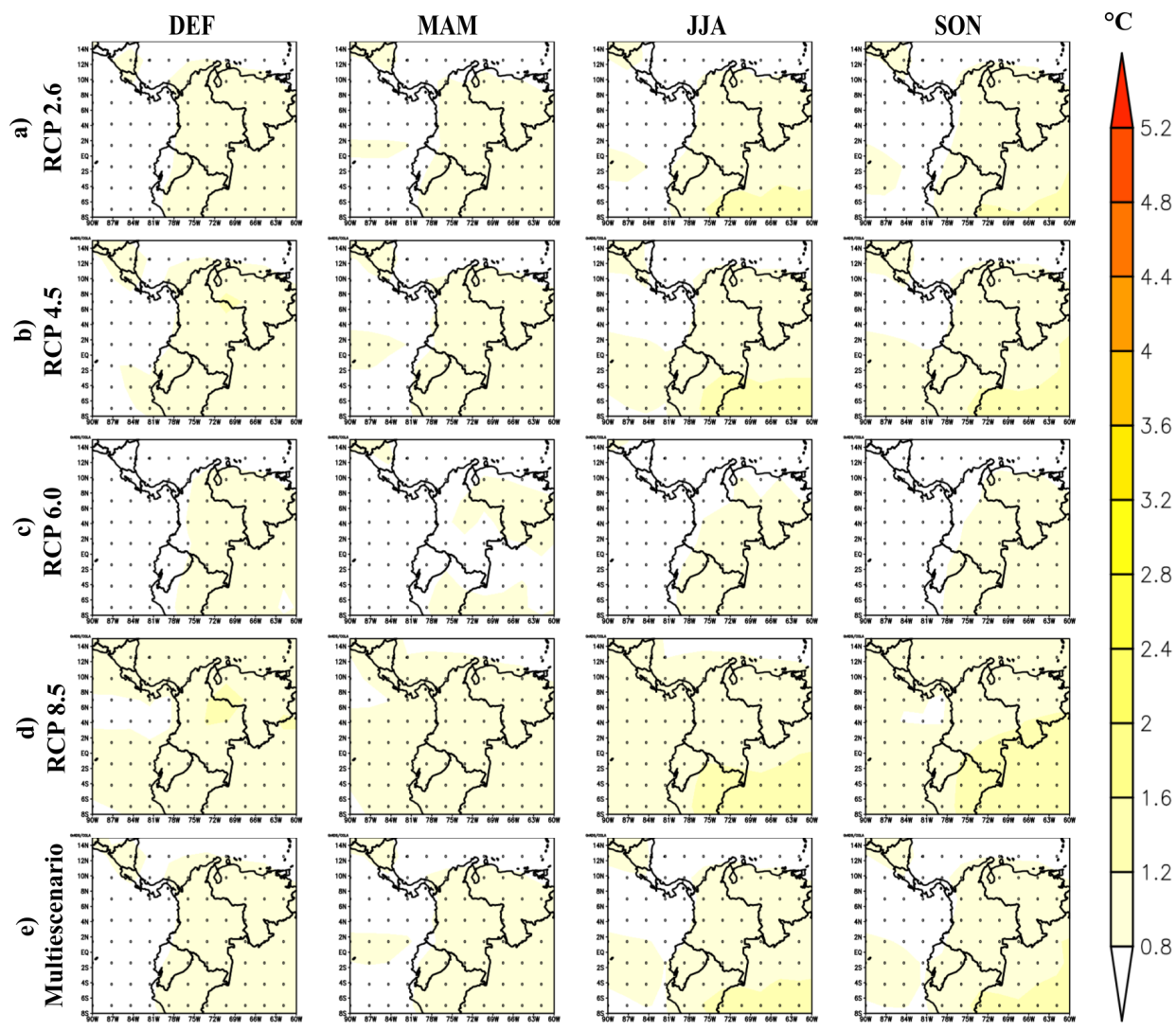


Figura 5.2: Cambios proyectados de temperatura para todos los modelos con respecto al promedio histórico durante el periodo 2011-2040. Las regiones punteadas en a), b), c) y d) indican consenso del 80% entre los modelos para cada escenario y en e) indican acuerdo del 80% entre escenarios.

2041-2070

En las figuras 5.4 y 5.5 se observa el cambio proyectado con respecto al periodo histórico de cada RCP y el ensamble multiescenario para el periodo 2041-2070. En general, se observa incrementos de temperatura para todo el territorio colombiano. Los ensambles TM y MM exhiben los mayores incrementos en los RCPs 4.5 y 8.5, alcanzando aumentos de temperatura sobre Colombia de hasta 3.6°C en el RCP 8.5.

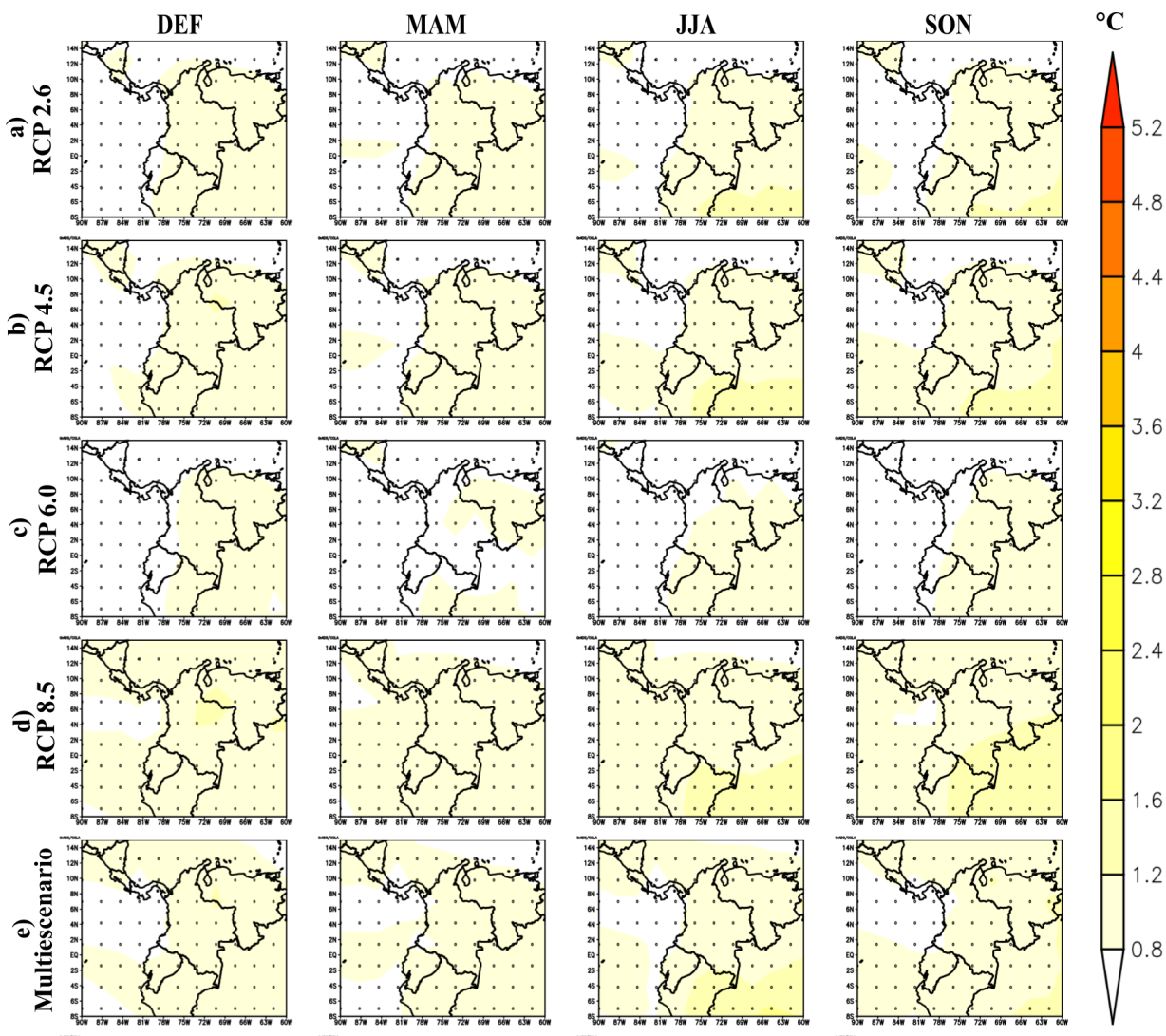


Figura 5.3: Cambios proyectados de temperatura para los mejores modelos con respecto al promedio histórico durante el periodo 2011-2040. Las regiones punteadas en a), b), c) y d) indican consenso del 80% entre los modelos para cada escenario y en e) indican acuerdo del 80% entre escenarios.

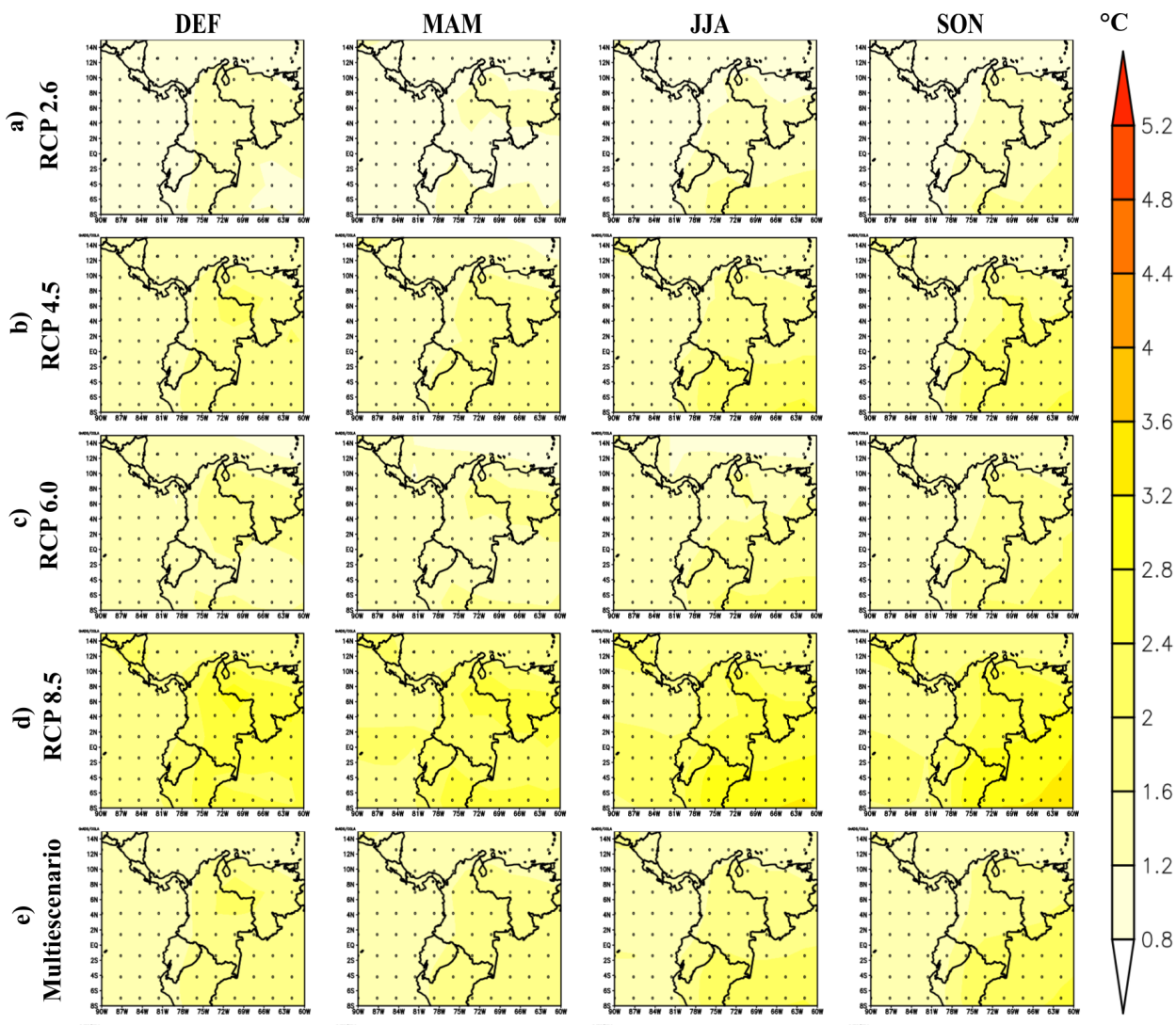


Figura 5.4: Cambios proyectados de temperatura para todos los modelos con respecto al promedio histórico durante el periodo 2041-2070. Las regiones punteadas en a), b), c) y d) indican consenso del 80% entre los modelos para cada escenario y en e) indican acuerdo del 80% entre escenarios.

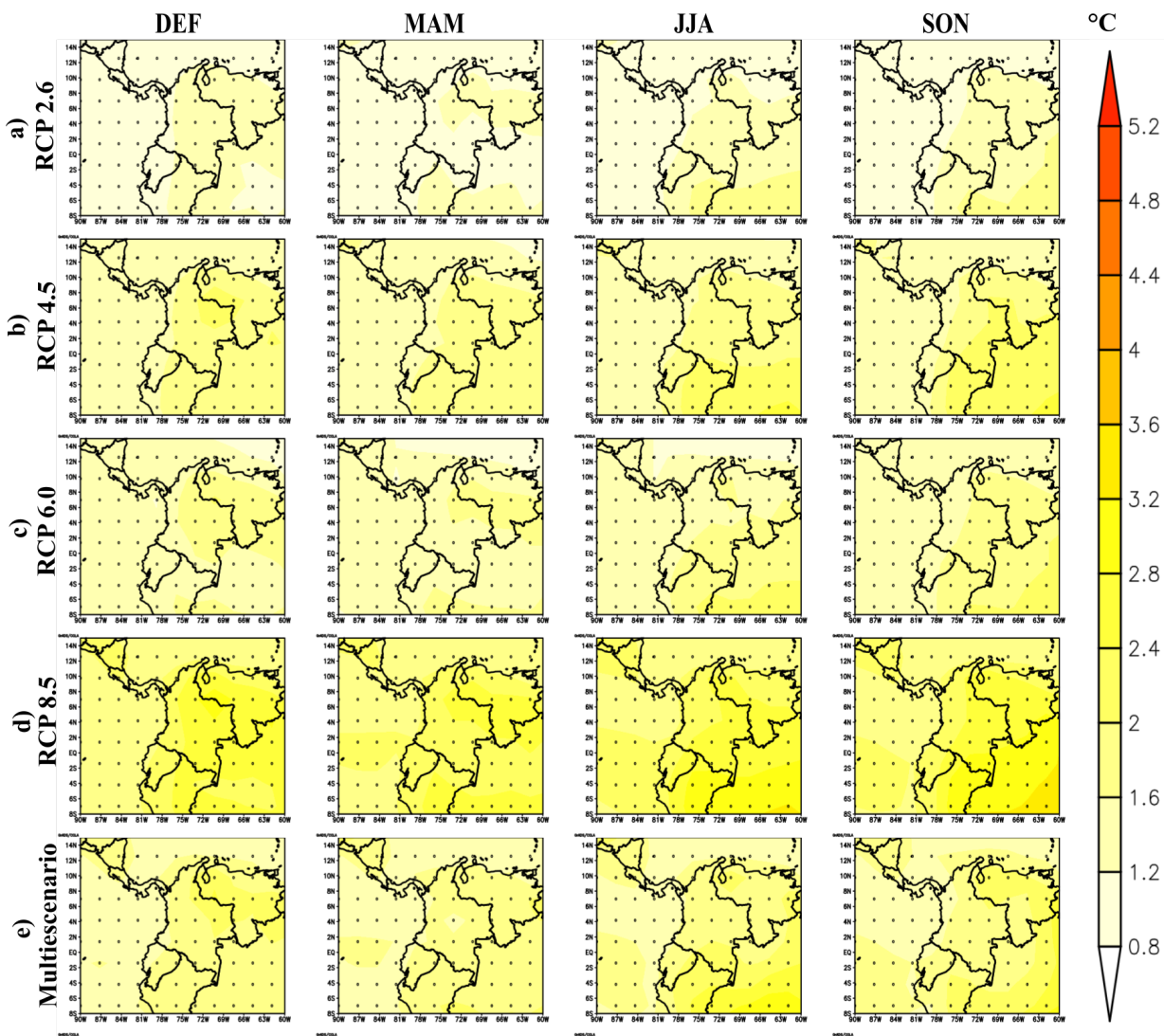


Figura 5.5: Cambios proyectados de temperatura para los mejores modelos con respecto al promedio histórico durante el periodo 2041-2070. Las regiones punteadas en a), b), c) y d) indican consenso del 80% entre los modelos para cada escenario y en e) indican acuerdo del 80% entre escenarios.

2071-2100

Las figuras 5.6 y 5.7 muestran el cambio proyectado con respecto al periodo histórico de cada RCP y el ensamble multiescenario para el periodo 2071-2100. En ambos ensambles se observan menores incrementos de temperatura para el RCP 2.6, con aumentos de 1.6 a 2.4°C. Los incrementos proyectados van aumentando para cada RCP, encontrándose valores muy similares entre los RCPs 4.5 y 6.0 de entre 2.4 y 3.6°C, mientras que los mayores incrementos se presentan en el RCP 8.5, donde se alcanzan aumentos de temperatura de 3.2 a 4.0°C para las regiones Pacífico, Andina y Caribe para TM, mientras que en MM los aumentos son ligeramente menores. Para la Orinoquía, los aumentos de temperatura son de 3.2 a 4.8°C en TM mientras que en MM los aumentos para las mismas regiones llegan hasta 4.4°C. En ambos ensambles, los mayores aumentos de temperatura se proyectan en los trimestres DEF y SON; por su parte, la región Amazónica presenta aumentos de temperatura de 3.2 a 4.4°C, alcanzando los mayores incrementos al sur durante JJA y SON.

Se puede apreciar que los cambios proyectados de temperatura correspondientes a los ensambles multiescenario de las figuras 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6 y 5.7 no coinciden en magnitud y distribución con los incrementos generados por las proyecciones de los diferentes RCPs del periodo correspondiente. Estos ensambles atenúan particularmente los cambios proyectados por el RCP8.5 y se asemejan más a el RCP4.5, lo cual constituye una considerable subestimación del riesgo climático (Schwalm, Glendon, y Duffy, 2020), en especial para un país con vulnerabilidad social alta en todas sus regiones (Roncancio, Cutter, y Nardocci, 2020). La consideración de estos promedios multiescenario puede generar una mayor vulnerabilidad ante los efectos del cambio climático (Patt y cols., 2010)(IPCC, 2014), máxime si se considera que los efectos del cambio climático afectan directamente el desarrollo económico de las naciones (Bruckner, 2012).

Para los tres periodos y los dos conjuntos de datos, se observa acuerdo entre modelos en relación a los aumentos de temperatura sobre todo el territorio colombiano.

5.2. Análisis de simulaciones y proyecciones de precipitación

5.2.1. Análisis de simulaciones históricas

La figura 5.8 presenta los datos estacionales de precipitación de la base de datos satelitales TRMM, el promedio estacional del histórico de los ensambles TM y MM y su sesgo respecto a los datos de observaciones. Para DEF, las observaciones de TRMM (a) muestran bajas precipitaciones sobre la región Caribe, las cuales se encuentran entre 0 y 4 mm/día, seguidas de la región Orinoquía, con valores de 2 a 6 mm/día. La región Andina presenta valores de entre 4-8 mm/día. La región Amazónica por su parte, presenta valores entre 6 y 12mm/día, siendo más altos hacia el sur. La región con mayores precipitaciones en el primer trimestre del año es la Pacífica, con valores entre 9 y 18mm/día, incluyendo la parte oceánica más próxima al continente. Para MAM, los valores más bajos siguen presentándose sobre el Caribe colombiano (3-7mm/día), seguido de la región Andina (4-9mm/día), Orinoquía (7-11mm/día),

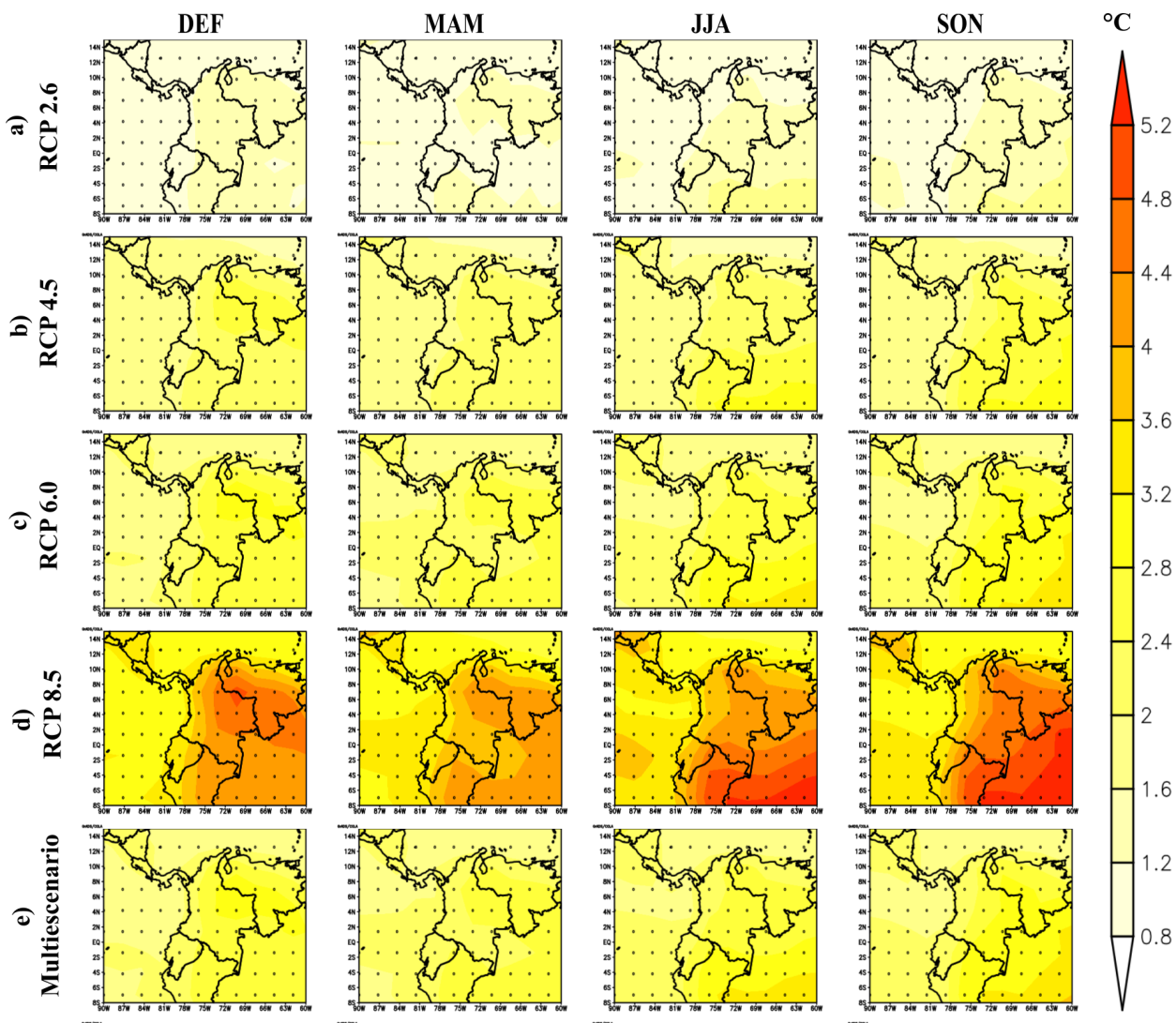


Figura 5.6: Cambios proyectados de temperatura para todos los modelos con respecto al promedio histórico durante el periodo 2071-2100. Las regiones punteadas en a), b), c) y d) indican consenso del 80% entre los modelos para cada escenario y en e) indican acuerdo del 80% entre escenarios.

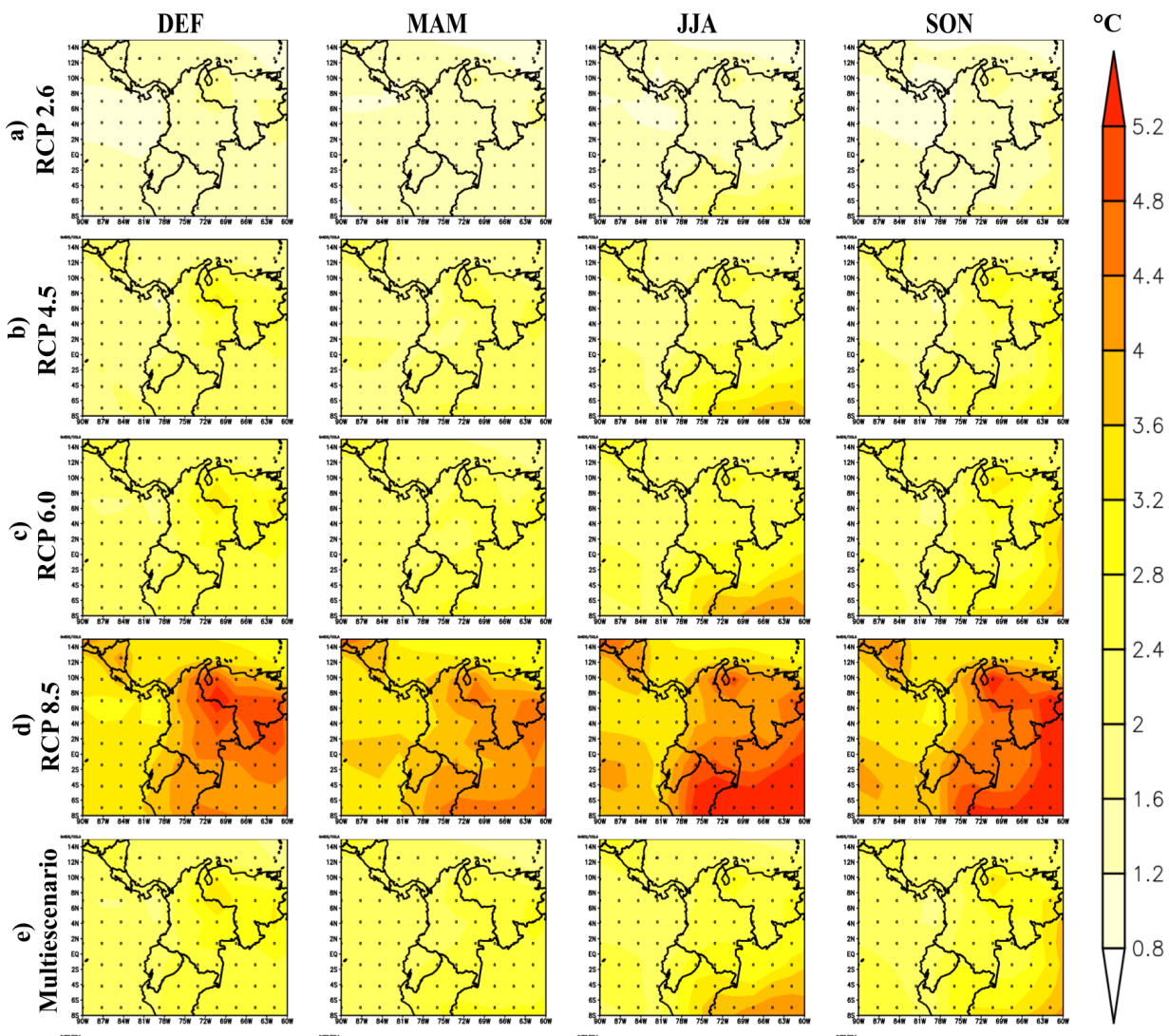


Figura 5.7: Cambios proyectados de temperatura para los mejores modelos con respecto al promedio histórico durante el periodo 2071-2100. Las regiones punteadas en a), b), c) y d) indican consenso del 80% entre los modelos para cada escenario y en e) indican acuerdo del 80% entre escenarios.

Amazonas (9-13mm/día) y Pacífico, con los valores más altos (10-18mm/día). En JJA permanecen los valores bajos para el Caribe (0-6mm/día) y se observan precipitaciones bajas mas extendidas por la Cordillera de los Andes (1-8mm/día), seguida por el Amazonas (7-10 mm/día) y la Orinoquía (9-13mm/día). Se mantienen los valores más altos para la región Pacífica, superando los 19mm/día, incluyendo la parte oceánica y dándose las precipitaciones más altas de todo el ciclo anual. Para SON, la mayor parte del país se encuentra con valores bajos de precipitación (2-9mm/día), siendo más bajas en la alta Guajira y sobre los Andes, y más altas sobre la región Pacífica y el Pacífico tropical, con valores similares a los del trimestre anterior. Se observa entonces, a nivel general, que para los datos de observaciones se tienen las menores precipitaciones en la región Caribe y los Andes Colombianos y las más altas sobre la región Pacífico. Sin embargo, es importante señalar que el régimen de precipitación del país es bastante complejo debido a los múltiples procesos climáticos como las corrientes de bajo nivel, la influencia de las dos fases del fenómeno El Niño-Oscilación del Sur, características topográficas complejas, entre otras (Poveda y Mesa, 1999)(Poveda, 2004)(Poveda y Mesa, 2000)(Poveda y cols., 2005)(Navarro-Monterroza, Arias, y Vieira, 2019). Esto puede dificultar la representación adecuada de los patrones por parte de los datos satelitales, como se encontró en recientes estudios (Vallejo-Bernal y cols., 2021). Este último trabajo evalúa el desempeño de TRMM para representar la precipitación sobre Colombia, encontrando que dichos datos satelitales tienden a sobreestimar la variable sobre los Andes colombianos y otras regiones secas del país durante la temporada seca y a subestimarla sobre el Pacífico y zonas húmedas durante las temporadas de altas precipitaciones. Además, TRMM presenta dificultades para representar precipitaciones ligeras por largos intervalos de tiempo y grandes tormentas de corta duración. Pese a ello, se identifica que TRMM representa bien el ciclo anual de precipitación para el país (Vallejo-Bernal y cols., 2021), que consta de régimen bimodal en las regiones Andina y Pacífica y unimodal en la Orinoquía, Amazonía y región Caribe (Pabón-Caicedo y cols., 2001)(Jaramillo-Robledo y Chaves-Córdoba, 2000).

El ensamble del histórico de precipitación para TM (b) presenta bajas precipitaciones para todo el país en DEF, siendo de 0 a 7 mm/día para el centro, norte y noreste del territorio y de 5 a 9 mm/día sobre las regiones del Amazonas y sur de la Andina y el Pacífico, lo que coincide con lo presentado para el ensamble MM (c). En MAM, las precipitaciones más bajas se dan en el Caribe entre 0 y 7 mm/día y en el resto del país oscilan entre 7 y 12 mm/día, siendo mayores al centro y sur de la región Pacífica y al este de la región Amazónica para TM. El ensamble MM muestra valores ligeramente superiores también para parte de la Orinoquía. En JJA, las precipitaciones al sur y al norte del país se encuentran entre 1 y 8 mm/día, siendo más altas hacia el interior del territorio. Sobre la Orinoquía se dan valores entre 9 y 13 mm/día en TM y alcanzan valores de hasta 16 mm/día al este de la misma región en el ensamble MM; al centro y norte de las regiones Andina y Pacífica se dan valores entre 9 y 15 mm/día en el ensamble de TM y de hasta 18 mm/día en MM siendo más altas al noroeste del país, además se dan precipitaciones superiores a los 19mm/día sobre el océano Pacífico en este ultimo ensamble. Para SON, las precipitaciones más bajas en ambos ensambles se dan en el Caribe, con valores desde los 2 mm/día sobre el océano y la zona continental en TM y desde 1 mm/día para MM. Sobre las regiones Orinoquía y Amazonas, los valores van de los 6 a los 9 mm/día al este de la Orinoquía, alcanzando valores ligeramente mayores para MM. Las regiones Andina y Pacífico tienen valores de 10 a 15 mm/día, siendo más altas al centro de la región Pacífica en

el ensamble TM y al norte de la misma región para MM, con valores de hasta 17mm/día sobre el océano.

Las diferencias entre ambos ensambles y TRMM (d y e) indican sesgos negativos para todo el territorio en DEF, principalmente en la región Pacífica, con su zona oceánica, y al este de la región Amazónica, indicando dificultades en las simulaciones históricas para representar la ocurrencia de precipitación sobre estas zonas. Para MAM, los sesgos negativos más altos se dan sobre la región de la Orinoquía y al suroeste del país principalmente, ya que las precipitaciones obtenidas de TRMM son superiores a las simuladas, los sesgos positivos aparecen al centro de la región Pacífico, donde las simulaciones sobreestiman la precipitación respecto a los datos satelitales. Para JJA, las diferencias negativas se dan al sur del país sobre la región Amazónica y parte de la Orinoquía, ya que las simulaciones subestiman la precipitación registrada por TRMM; las diferencias positivas se dan al centro y norte de la región Andina, donde las simulaciones sobreestiman la precipitación de TRMM. En SON, las mayores diferencias negativas se dan sobre la región Caribe, ya que TRMM registra mayores precipitaciones a las simuladas para esta zona del país y las diferencias positivas se dan al sur de las regiones Andina y Pacífica, donde las simulaciones sobreestiman la precipitación en comparación a los datos satelitales. Se encuentra en general que el ensamble MM representa mejor la precipitación sobre el océano Pacífico y el mar Caribe, en las zonas costeras del país, además presenta menos problemas al representar las lluvias sobre la Orinoquía y el Amazonas en relación al ensamble TM. Sin embargo, TM sobreestima en magnitudes menores la precipitación sobre las regiones Andina y Pacífica, en relación a MM.

5.2.2. Análisis de proyecciones para el siglo XXI

2011-2040

Las figuras 5.9 y 5.10 presentan los cambios proyectados de precipitación con respecto al histórico de cada RCP y el ensamble multiescenario durante el periodo 2011-2040. Se observan incrementos de precipitación que no sobrepasan 1 mm/día y se dan en DEF sobre las regiones Pacífico, Andina y Amazonía para ambos ensambles (figuras 5.9 y 5.10), y se extienden hacia la Orinoquía en el ensamble de MM (figura 5.10). En MAM, se observan incrementos de precipitación sobre las regiones Pacífico, Andina y Orinoquía en los RCP 2.6 y 4.5 para TM (figura 5.9) y al sur de las regiones Pacífico y Andina, norte del Caribe y este de la Orinoquía en todos los RCP para MM (figura 5.10). En JJA, los incrementos de precipitación ocurren sobre las mismas tres regiones según el ensamble TM, mientras que para MM los incrementos leves de precipitación se notan al norte de la región Pacífica en todos los escenarios y al sur de la misma región en el RCP 6.0; además se observan cambios proyectados de disminución de precipitación (de hasta -0.6 mm/día) en el sureste de la Orinoquía, siendo más extensas en los RCPs 2.6, 4.5 y 8.5. Por su parte, en SON se encuentran aumentos de precipitación únicamente al norte de la región Pacífica para los RCP 2.6, 4.5 y 6.0 según el ensamble TM, y se extienden al noroeste del país en el RCP 8.5. También se dan disminuciones de precipitación de hasta -0.6 mm/día al sur de la región Andina en los RCP 2.6 y 4.5. Para MM se encuentran aumentos de precipitación al oeste de la región Caribe en el RCP 2.6, noreste de la región Andina en el RCP 4.5, al sur de la región Caribe en el RCP 6.0 y al norte de las regiones Andina y Pacífico en el RCP

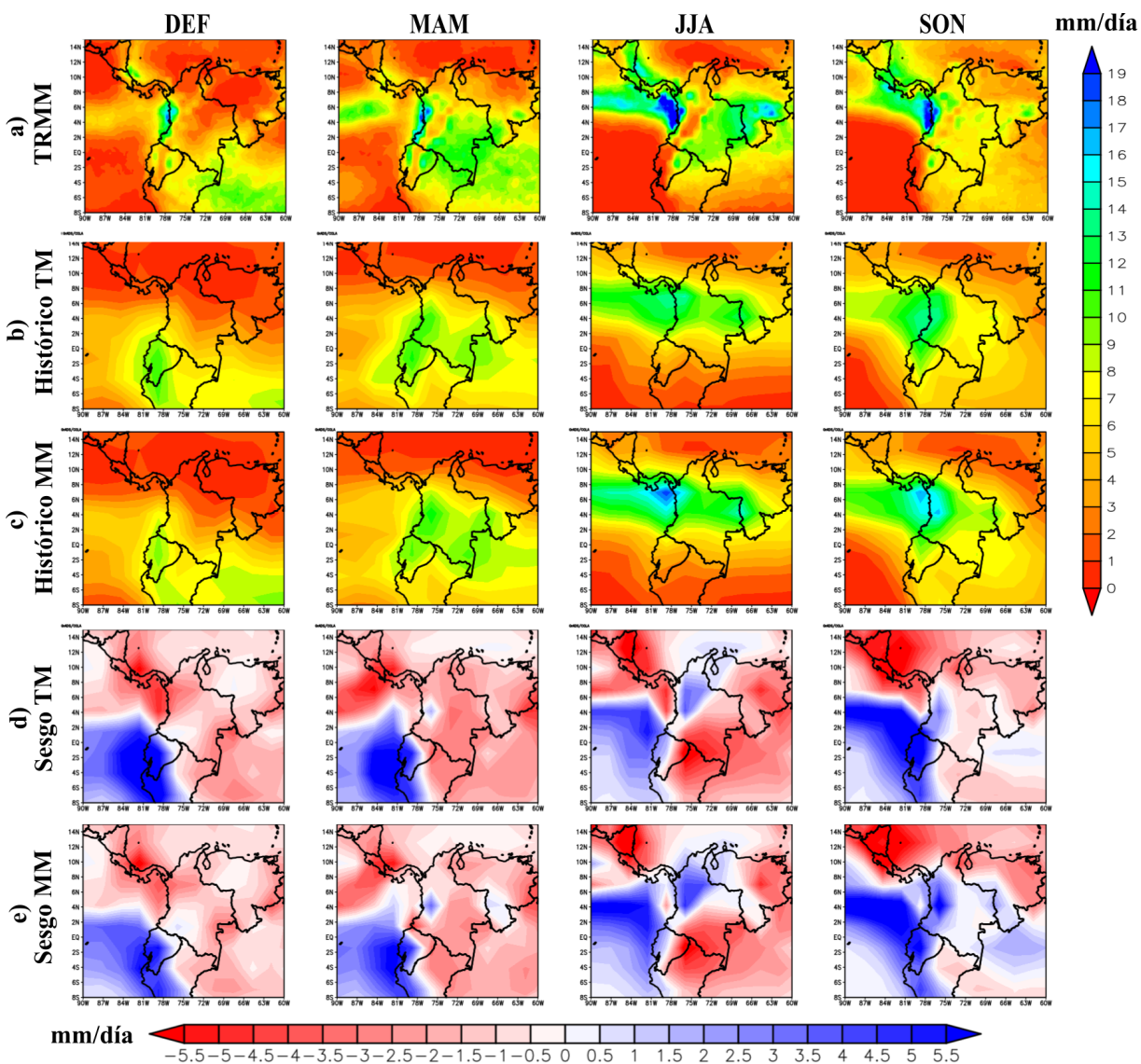


Figura 5.8: Comparación entre datos de referencia (TRMM; 1998-2005), históricos de los ensambles TM y MM (1976-2005) y sus diferencias con respecto a TRMM

8.5, mientras las disminuciones de precipitación se dan principalmente al suroeste del país, siendo más altas en el RCP 2.6, donde se alcanzan -1.0 mm/día al suroeste mientras que en los demás escenarios solo llegan a los -0.6 mm/día. Se observa también que el acuerdo entre modelos para el territorio colombiano es nulo para cambios proyectados de precipitación en el corto plazo observado del ensamble TM mientras que solo se da para los aumentos de precipitación proyectados sobre el Océano. Por su parte, el ensamble MM muestra acuerdo en los aumentos de precipitación para el centro del país durante DEF en todos los RCPs.

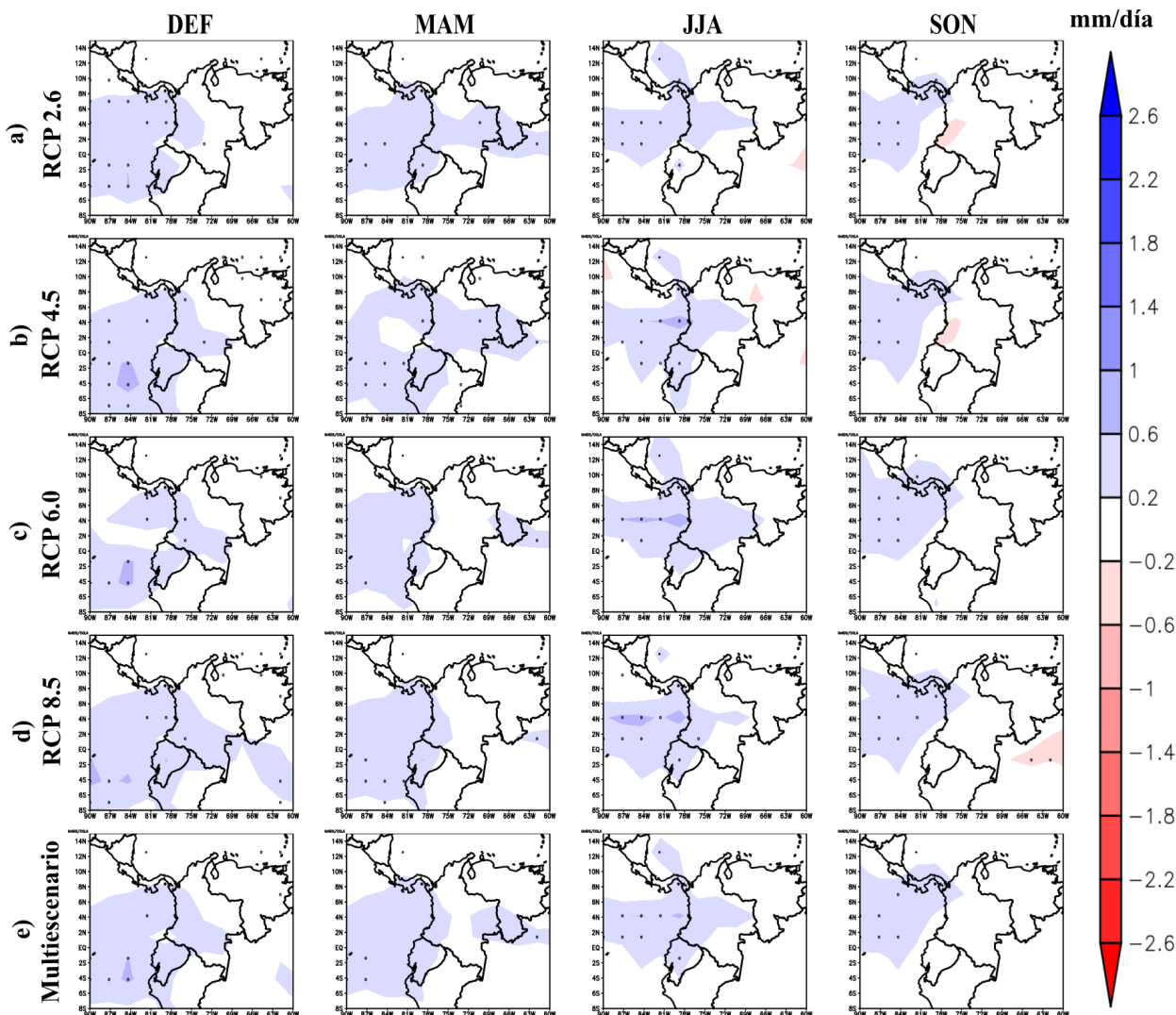


Figura 5.9: Cambios proyectados de precipitación para todos los modelos con respecto al promedio histórico durante el periodo 2011-2040

2041-2070

Las figuras 5.11 y 5.12 presentan los cambios proyectados de precipitación con respecto al histórico de cada RCP y el ensamble multiescenario durante el periodo 2041-2070. Se encuentran incrementos de precipitación para DEF en el ensamble TM sobre las mismas regiones

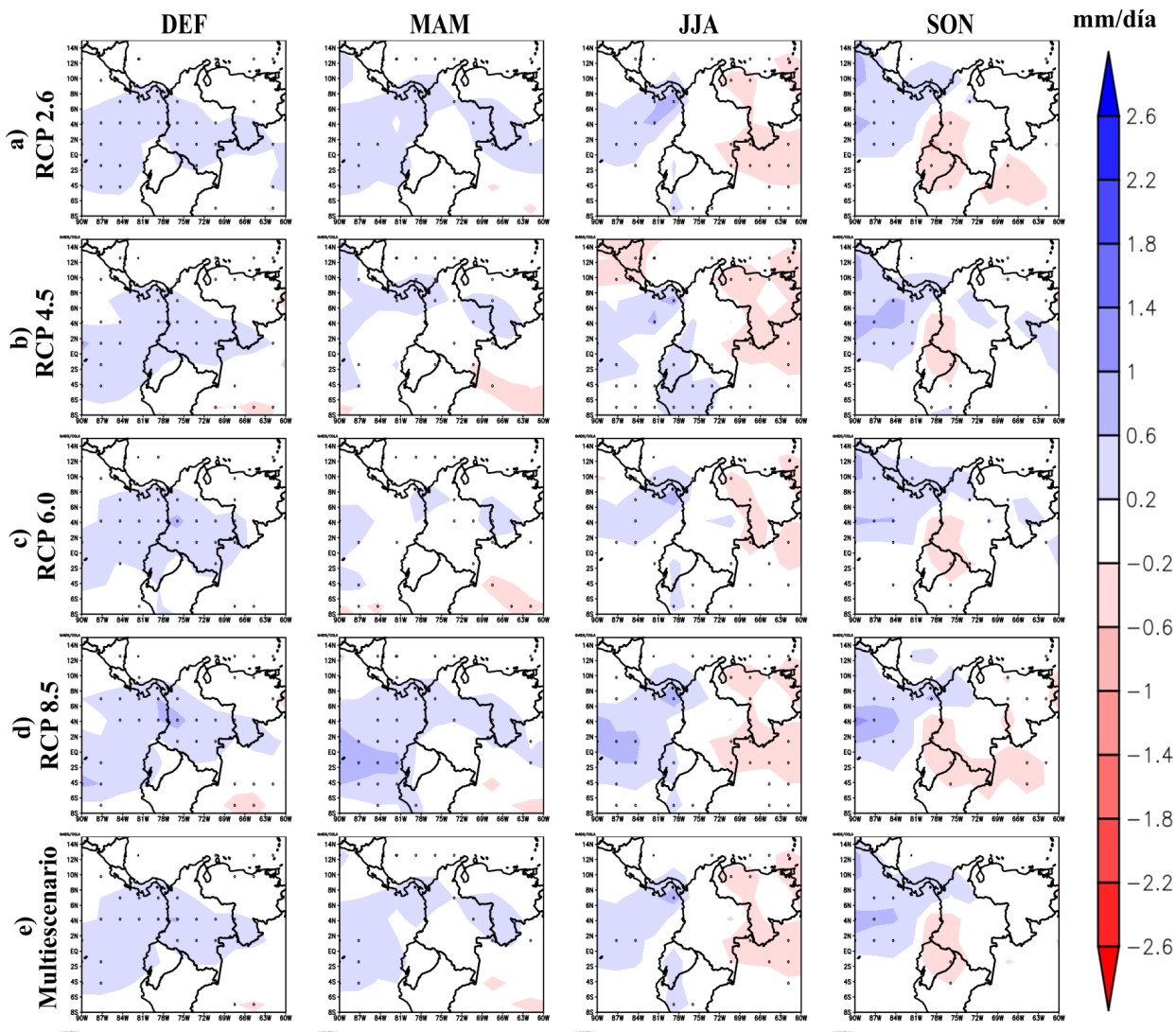


Figura 5.10: Cambios proyectados de precipitación para los mejores modelos con respecto al promedio histórico durante el periodo 2011-2040

en las que se observan incrementos en el corto plazo (figuras 5.9), pero extendiéndose hasta la mayor parte de la Orinoquía. Para el ensamble MM, los incrementos de precipitación son de hasta 1.4 mm/día sobre todo el país, exceptuando el centro y norte de la región Caribe. En MAM, se observan incrementos de precipitación sobre las regiones Pacífico, Amazonas y Orinoquía para todos los RCP según el ensamble TM, al igual que en el periodo anterior (figura 5.9), mientras que para MM, los incrementos se observan sobre las mismas regiones del periodo anterior (figura 5.10 con magnitud similar y mayor extensión territorial, principalmente sobre la Orinoquía. Según el ensamble TM, en JJA, se observan incrementos de precipitación que se extienden hasta el norte de la región Amazónica en los RCP 4.5, 6.0 y 8.5, mientras que se encuentran reducciones de precipitación al norte de la región Caribe en los mismos escenarios. Para el ensamble MM, se dan incrementos de precipitación a lo largo de toda la región Pacífico en los RCPs 4.5 y 8.5, con excepción de la zona suroeste en los RCPs 2.6 y 6.0. En contraste, se observan reducciones de hasta -1.0 mm/día al noreste de las regiones Orinoquía y Amazonas. En SON, se observan incrementos de precipitación al norte de las regiones Pacífica y Andina, de acuerdo con el RCP 2.6, mientras que las reducciones solo se dan al suroeste del país. En el RCP 4.5 se observan reducciones de precipitación sobre el centro y sur de la región Andina, el sur del Pacífico y el este de la Orinoquía. El RCP 6.0 muestra de nuevo incrementos de precipitación al norte de las regiones Pacífica y Andina. Por su parte, el RCP 8.5 muestra incrementos de precipitación sobre los mismos departamentos y reducciones al este de la Orinoquía, noreste de la región Andina y norte del Caribe. Para el ensamble MM, los incrementos de precipitación en el RCP 2.6 se extienden por la zona norte de las regiones Pacífico, Andina y Orinoquía y al sur del Caribe, mientras para los demás escenarios se concentran al noroeste del país. Las reducciones más marcadas, de hasta -1.4 mm/día, se dan sobre el departamento de Nariño y de forma más leve en el departamento del Valle y departamentos del sur de la región Andina, en todos los escenarios. Estas diferencias alcanzan el departamento del Amazonas en los RCPs 2.6 y 8.5. En este último escenario, también se observan reducciones sobre la región Orinoquía. Para este período no se observan consensos significativos en el cambio proyectado de la precipitación para el territorio colombiano en ninguno de los dos ensambles.

2071-2100

Las figuras 5.13 y 5.14 presentan los cambios para las proyecciones de precipitación de cada RCP respecto al histórico y el ensamble multiescenario durante el periodo 2071-2100 y el histórico, para TM y MM respectivamente. En ambos ensambles se dan diferencias más representativas que para periodos anteriores, para el de TM los valores positivos durante DEF siguen estando por debajo de 1 mm/día para todos los escenarios excepto para RCP 8.5 donde se alcanzan valores de 1.4 mm/día al centro y sur de la región Pacífico. Para MM, los valores positivos durante DEF alcanzan los 1.8 mm/día sobre la zona central de las regiones Pacífica y Andina para los RCPs 6.0 y 8.5; en MAM para TM los cambios importantes se dan también al centro y sur del Pacífico en el RCP 8.5 con 1.4 mm/día, pero con menor extensión que para DEF, mientras que para MM se da una distribución similar de precipitación que en el periodo anterior para el mismo trimestre, pero alcanzando valores de hasta 1.4 mm/día y de 1.0 mm/día en la Orinoquía y la costa Pacífica, principalmente en los RCPs 6.0 y 8.5; en JJA en

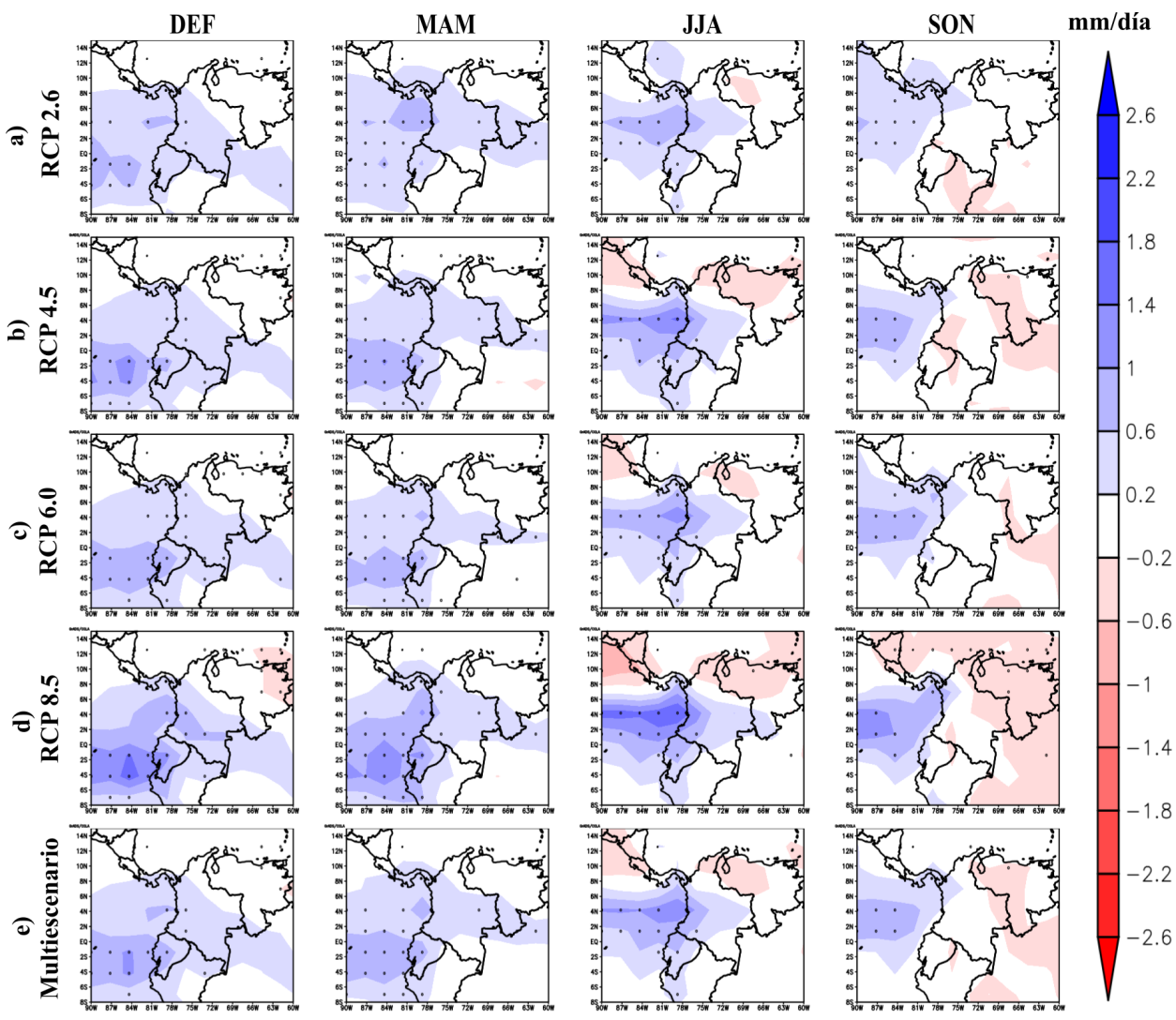


Figura 5.11: Cambios proyectados de precipitación para todos los modelos con respecto al promedio histórico durante el periodo 2041-2070

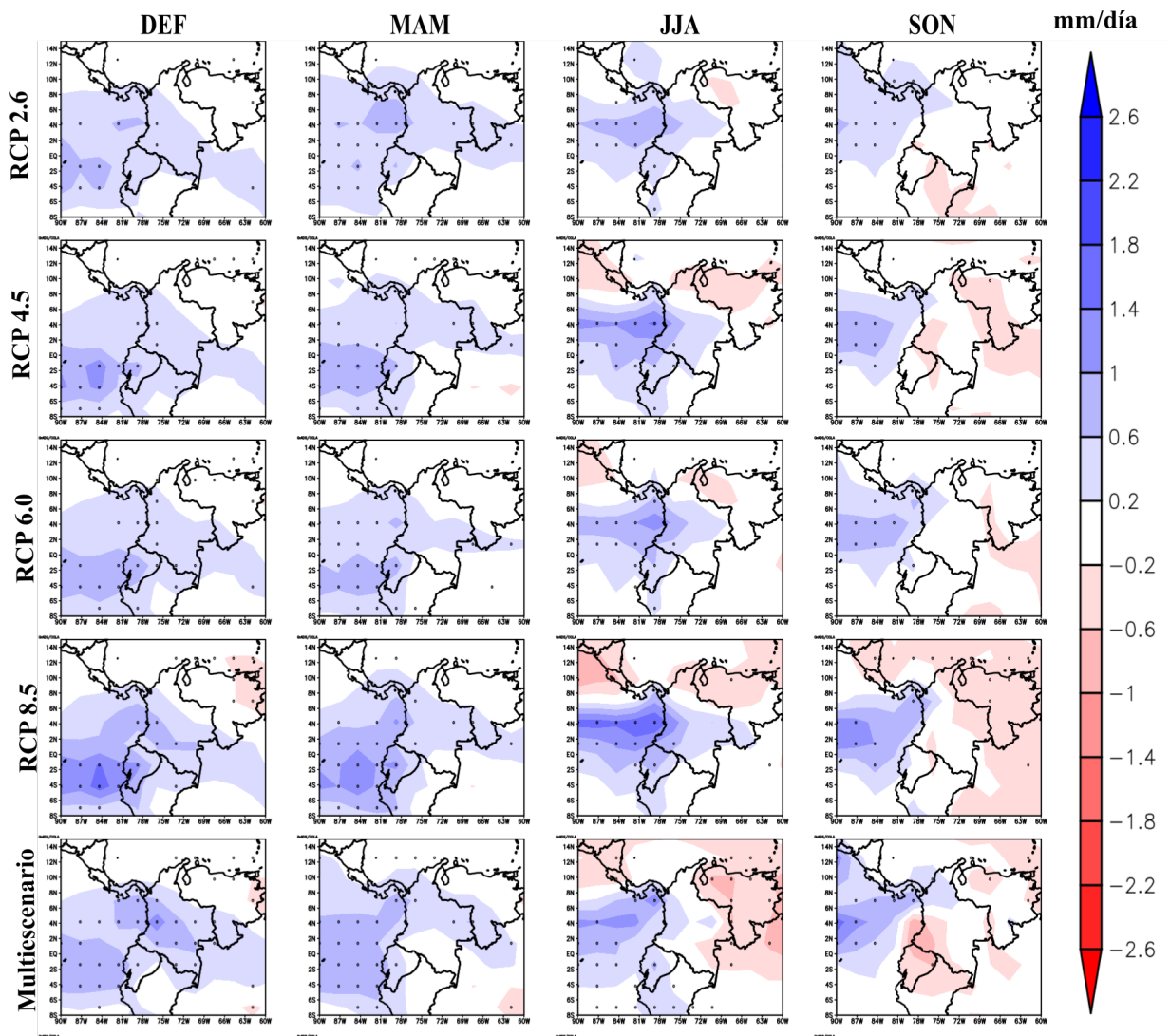


Figura 5.12: Cambios proyectados de precipitación para los mejores modelos con respecto al promedio histórico durante el periodo 2041-2070

TM las diferencias negativas se presentan para la región Caribe alcanzando -1.4 mm/día en el RCP 8.5 y las diferencias positivas más importantes se dan al centro y sur de las regiones Andina y Pacífica para el mismo escenario alcanzando valores de 2.6 mm/día sobre la costa pacífica, para MM las diferencias positivas más llamativas se dan principalmente al norte de la región Pacífica y se extienden a lo largo de la misma región pero en menor magnitud, las diferencias negativas se presentan en todos los escenarios al este de la Orinoquía y en el RCP 8.5 también aparecen sobre la región Caribe alcanzando -1.4 mm/día; por su parte, en SON, en el ensamble de TM son más importantes las diferencias negativas, las cuales se dan al sur de las regiones Pacífico y Andina para el RCP 2.6, sobre la Orinoquía y parte de la región Andina en el RCP 4.5, al este de la Orinoquía y sur del Pacífico para el RCP 6.0 y al centro y este de la Orinoquía y sur del Amazonas para el RCP 8.5, donde se alcanzan valores de -1.4 mm/día. De manera similar sucede con MM donde las diferencias negativas siguen dándose al sur de las regiones Pacífico y Andina en todos los RCPs, y sobre la Orinoquía en los RCPs 4.5, 6.0 y 8.5, en este último alcanzando al este -1.4 mm/día. Para este período se observa consenso entre modelos sobre la zona suroccidental del país en el RCP 8.5 indicando aumentos de precipitación de hasta 1.4 mm/día. El ensamble de MM presenta mayor acuerdo entre modelos para el aumento en precipitación, principalmente sobre el océano Pacífico y el occidente del país en los trimestres de DEF y MAM, con magnitudes de hasta 1.8 mm/día en los RCP 6.0 y 8.5 principalmente.

Respecto a los ensambles multiescenario de las figuras 5.9, 5.10, 5.11, 5.12, 5.13 y 5.14, se nota que al ser un promedio de escenarios distintos, no proporcionan información consistente sobre las proyecciones de precipitación para ninguno de los periodos considerados, ya que como sucedió con la temperatura, se confunden las señales de cada escenario y se puede incurrir en una subestimación de los impactos del cambio climático sobre el territorio colombiano.

5.2.3. Simulaciones CORDEX

Análisis de simulaciones históricas de temperatura

La figura 5.15 presenta la comparación entre el ensamble de 5 modelos CMIP5 utilizados por IDEAM en la Tercera CNCC y sus simulaciones CORDEX correspondientes, como un acercamiento a una reducción de escala. Se puede observar que tanto las simulaciones CORDEX como los modelos CMIP5 sobreestiman la temperatura del aire en superficie, principalmente sobre las regiones de la Orinoquía y Amazónica. Los sesgos sobre dichas regiones son de mayor magnitud para el ensamble CORDEX (e) de hasta 6.5°C , en comparación con el sesgo del ensamble CMIP5 (d) que es de hasta 2°C . Estos sesgos se presentan a nivel general en los 5 modelos considerados para el ensamble, particularmente en los modelos CSIRO-Mk3-6-0, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-MR y MIROC5 (Anexo A). Además, se dan sobreestimaciones al norte de la región Pacífica, Andina y centro y sur de la región Caribe, los cuales son mayores en el ensamble CMIP5 (5°C) que en CORDEX (3°C), exceptuando los Andes colombianos donde se presentan subestimaciones en ambas simulaciones. Estos sesgos también se observan para todo el territorio colombiano en el ensamble TM, exceptuando la Orinoquía y el Amazonas para MM, donde se observan subestimaciones de temperatura (figura 5.1).

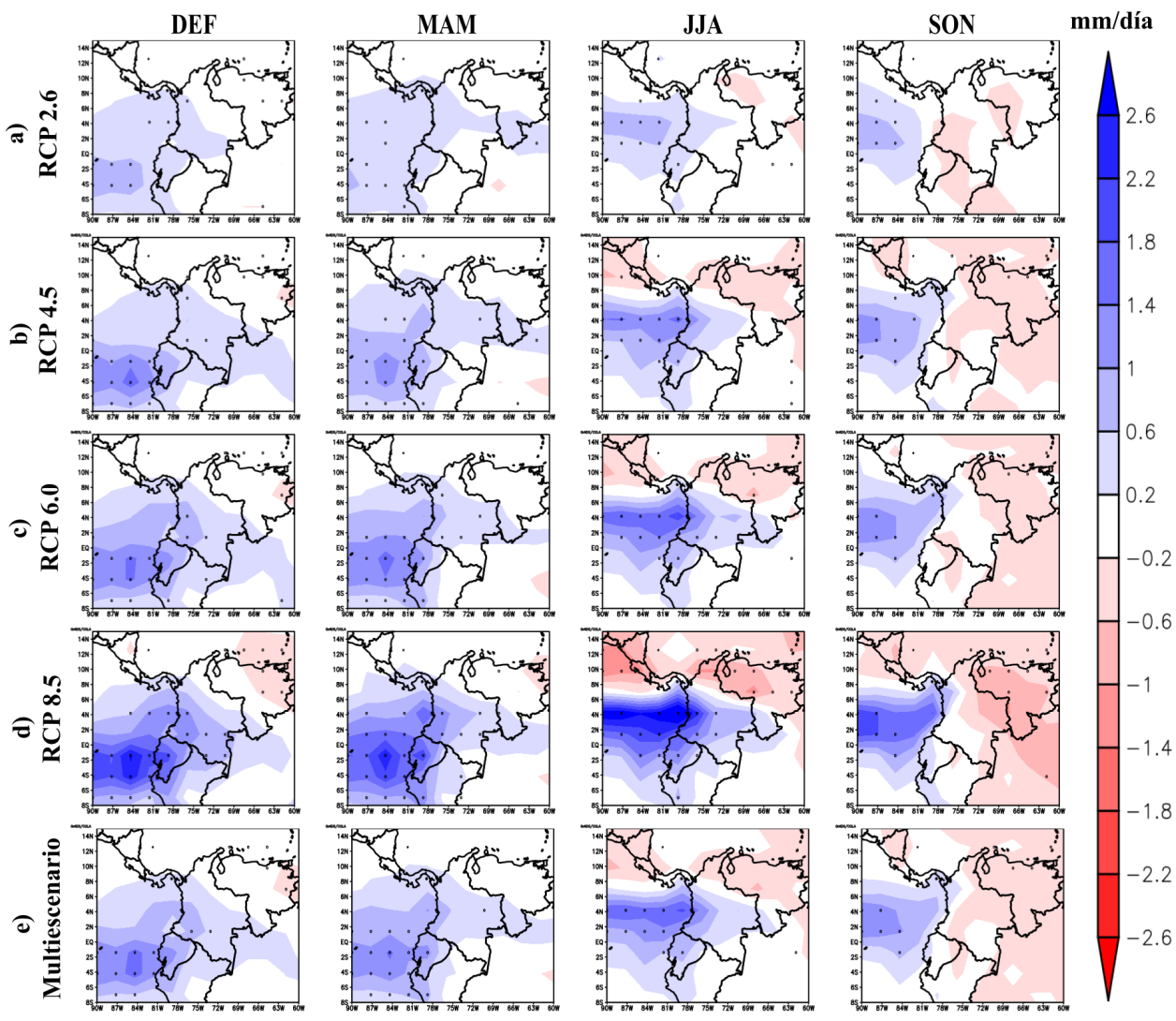


Figura 5.13: Cambios proyectados de precipitación para todos los modelos con respecto al promedio histórico durante el periodo 2071-2100

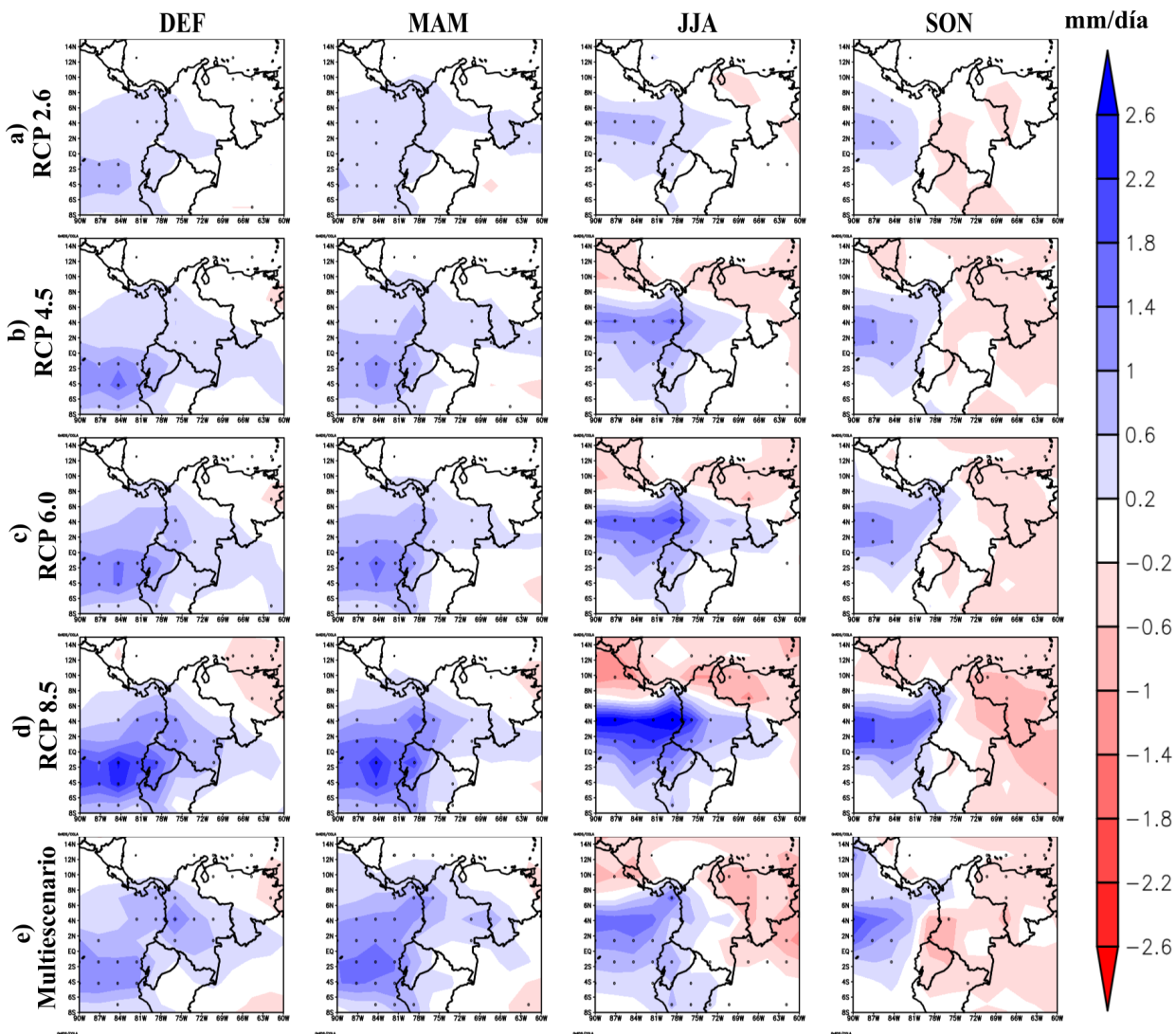


Figura 5.14: Cambios proyectados de precipitación para los mejores modelos con respecto al promedio histórico durante el periodo 2071-2100

Análisis de proyecciones de temperatura para el siglo XXI

Las figuras 5.16, 5.17 y 5.18 muestran las proyecciones de temperatura para principios, mediados y finales de siglo, respectivamente, para el ensamble de 5 simulaciones CORDEX y sus modelos originales correspondientes de CMIP5. En los tres periodos se observa un incremento en la temperatura del aire en superficie sobre Colombia, con un acuerdo entre modelos para todo el territorio en las simulaciones de los modelos tanto globales como regionales. A nivel general, los aumentos de mayor magnitud se observan para las regiones Amazónica y Orinoquía (aumentos de hasta 5.2°C). Particularmente para el ensamble CORDEX (d) se presentan aumentos al sur de la región Caribe de magnitud similar. Los aumentos proyectados son semejantes a los identificados para los ensambles TM y MM (figuras 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6 y 5.7). Los mayores cambios proyectados se dan particularmente para los modelos CSIRO-Mk3-6-0, HadGEM2-ES y IPSL-CM5A-MR (Anexo B).

Análisis de simulaciones históricas de precipitación

La figura 5.19 presenta la comparación entre el ensamble de 3 simulaciones CORDEX disponibles y sus modelos originales de CMIP5 (CSIRO-Mk3-6-0, IPSL-CM5A-MR y MIROC5) que coinciden con los utilizados por IDEAM en la Tercera CNCC. Se observa que los sesgos de ambos ensambles tienen distribución similar, subestimando la precipitación sobre las regiones Amazónica, Orinoquía y Caribe y sobreestimándola en los Andes, comportamiento similar a lo visto para los ensambles TM y MM (5.8). Para la región Pacífico, se observa que mientras el ensamble de CMIP5 sobreestima precipitación, el ensamble de CORDEX la subestima, tanto en la parte continental como sobre el océano. Estas diferencias son notorias al observar individualmente cada uno de los modelos, ya que los tres modelos subestiman en sus simulaciones CORDEX la precipitación sobre la zona continental del Pacífico Ecuatorial (Anexo C). Cabe anotar que los sesgos son de magnitud superior para las simulaciones CORDEX (reducciones de hasta 9mm/día y aumentos superiores a 11mm/día) en relación con los modelos originales CMIP5 (reducciones de hasta 6mm/día y aumentos de hasta 8mm/día).

Análisis de proyecciones de precipitación para el siglo XXI

Las figuras 5.20, 5.21 y 5.22, presentan las proyecciones para principios, mediados y finales de siglo respectivamente, del ensamble de los tres modelos CMIP5 previamente mencionados, sus simulaciones CORDEX y los cambios con respecto al período histórico 1976-2005. Para el período 2011-2040 (figura 5.20) se proyectan aumentos de precipitación de hasta 1.4mm/día en DEF para el ensamble de CMIP5 (c) mientras el ensamble de CORDEX (d) presenta reducciones de hasta 2.2 mm/día sobre los Andes colombianos para los últimos tres trimestres del año. Los cambios proyectados en el ensamble CORDEX cuentan con mayor acuerdo sobre el territorio que los del ensamble CMIP5.

Por otra parte, las proyecciones para el período 2041-2070 (figura 5.21) muestran cambios de precipitación con una distribución similar y magnitud levemente mayor para ambos ensambles, con mayor acuerdo entre modelos para las simulaciones CORDEX (d).

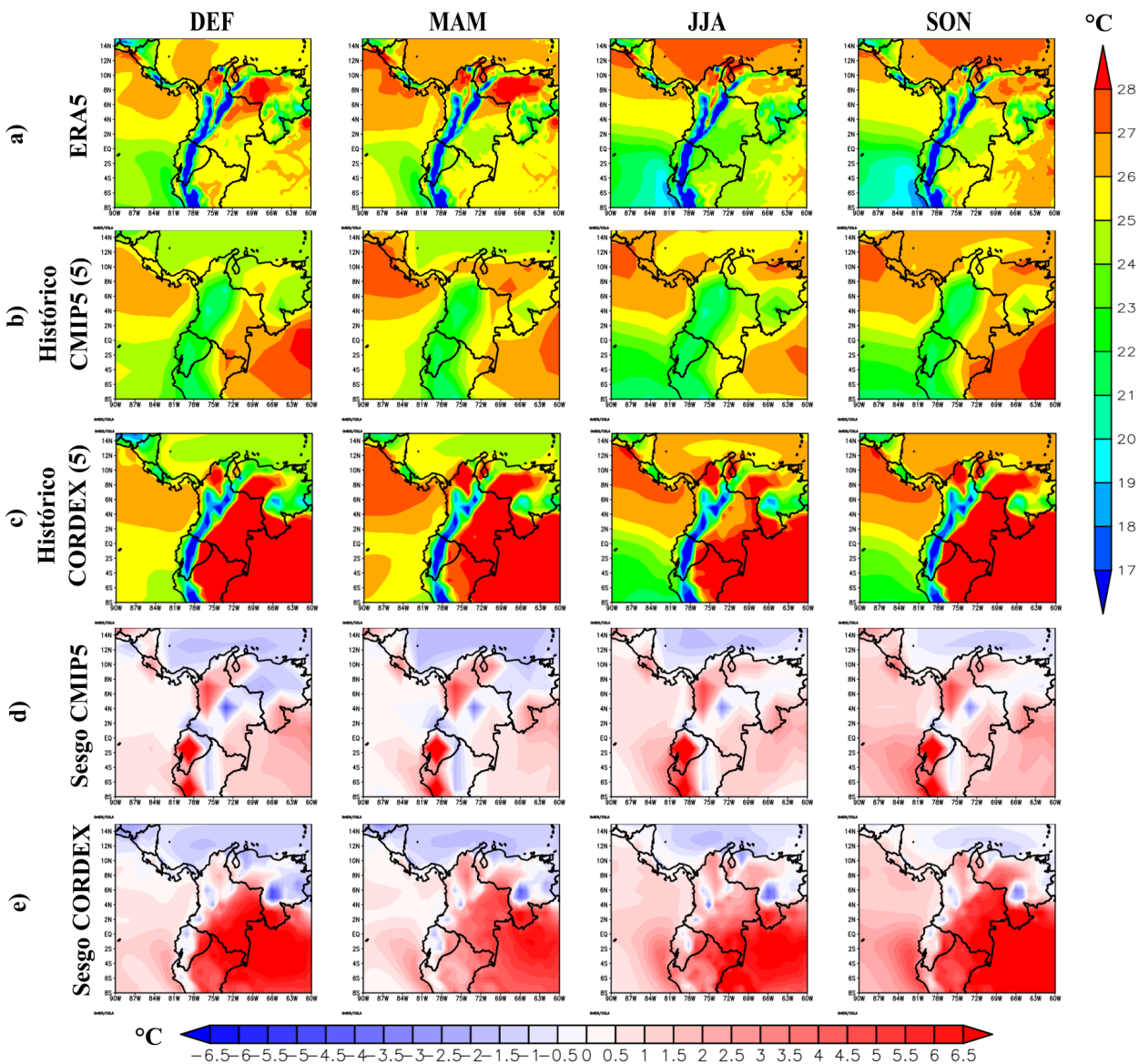


Figura 5.15: Climatología de temperatura superficial del aire de ERA5 a), simulaciones históricas CMIP5 de los 5 modelos con simulaciones CORDEX b), ensamble de las simulaciones CORDEX de estos modelos c) y sus sesgos respecto a ERA5 d) y e), respectivamente.

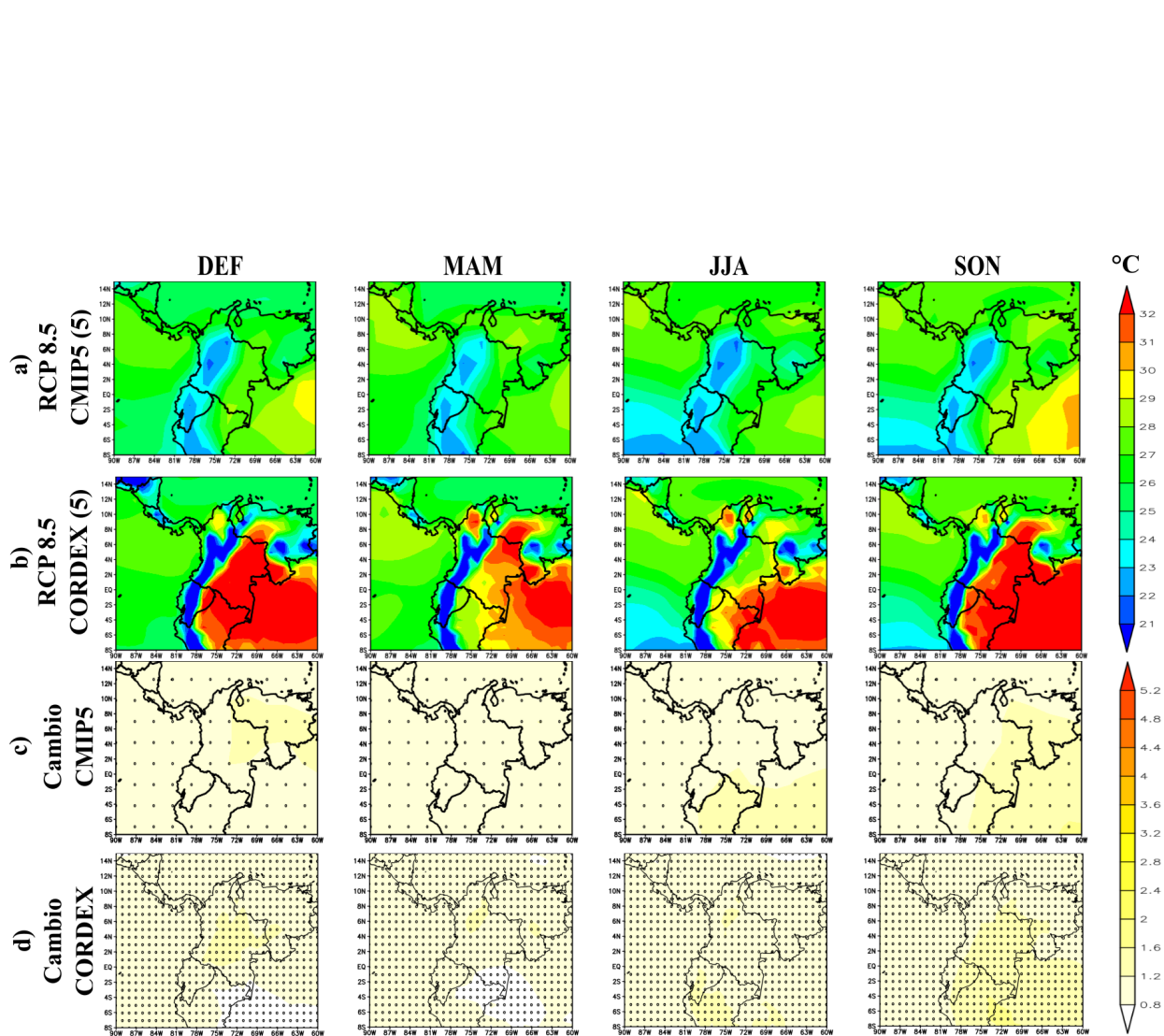


Figura 5.16: Proyecciones de temperatura superficial del aire bajo el RCP 8.5 para el periodo 2011-2040 para el ensamble de los 5 modelos CMIP5 a), el ensamble de las simulaciones CORDEX de estos modelos b) y sus cambios respecto al periodo histórico c) y d), respectivamente.

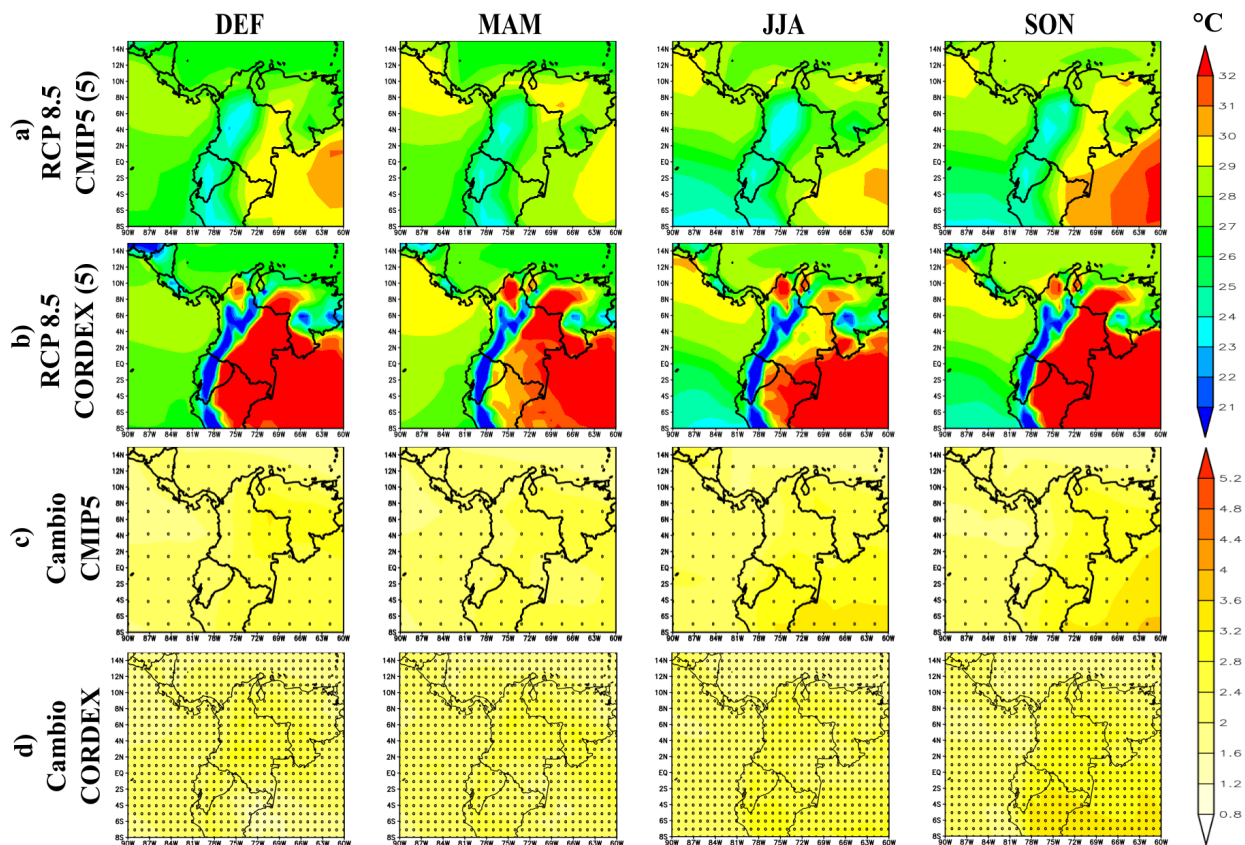


Figura 5.17: Proyecciones de temperatura superficial del aire bajo el RCP 8.5 para el periodo 2041-2070 para el ensamble de los 5 modelos CMIP5 a), el ensamble de las simulaciones CORDEX de estos modelos b) y sus cambios respecto al periodo histórico c) y d), respectivamente.

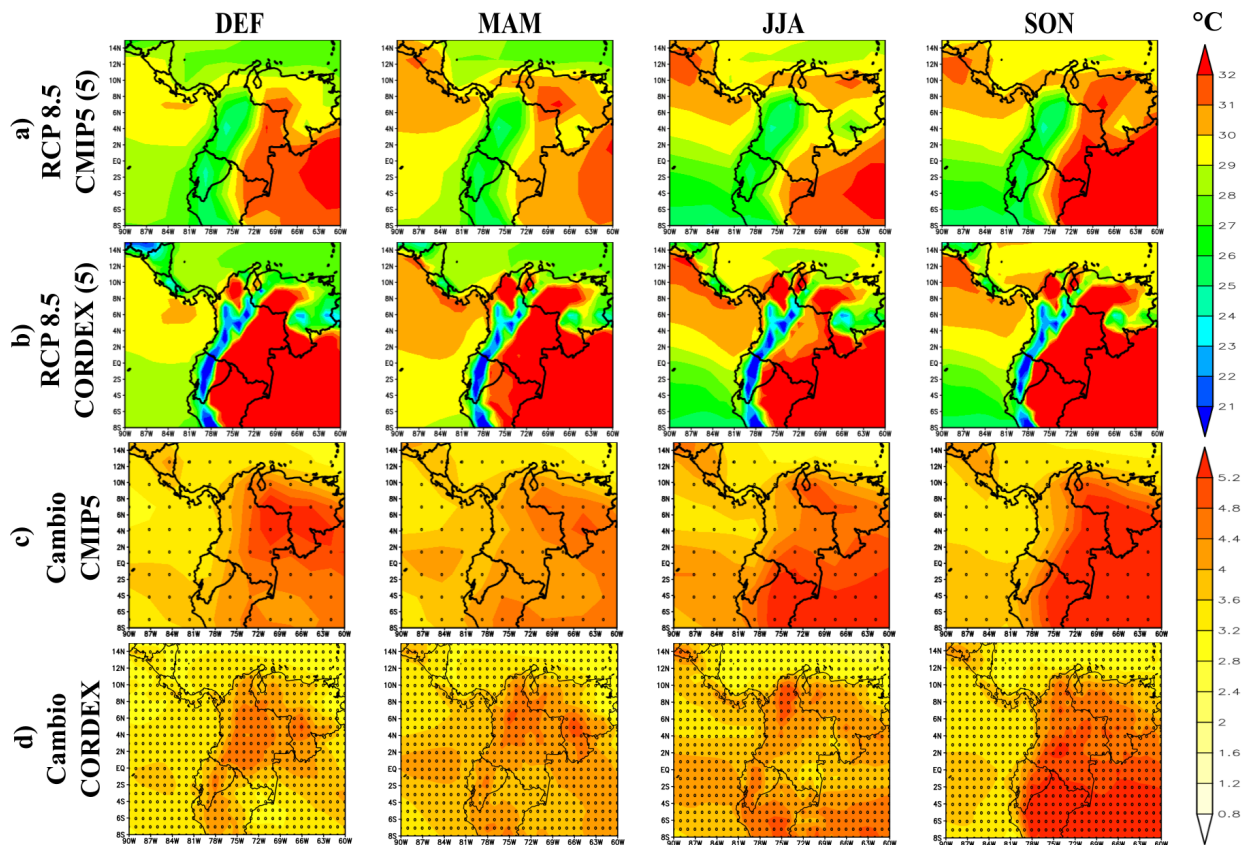


Figura 5.18: Proyecciones de temperatura superficial del aire bajo el RCP 8.5 para el periodo 2071-2100 para el ensamble de los 5 modelos CMIP5 a), el ensamble de las simulaciones CORDEX de estos modelos b) y sus cambios respecto al periodo histórico c) y d), respectivamente.

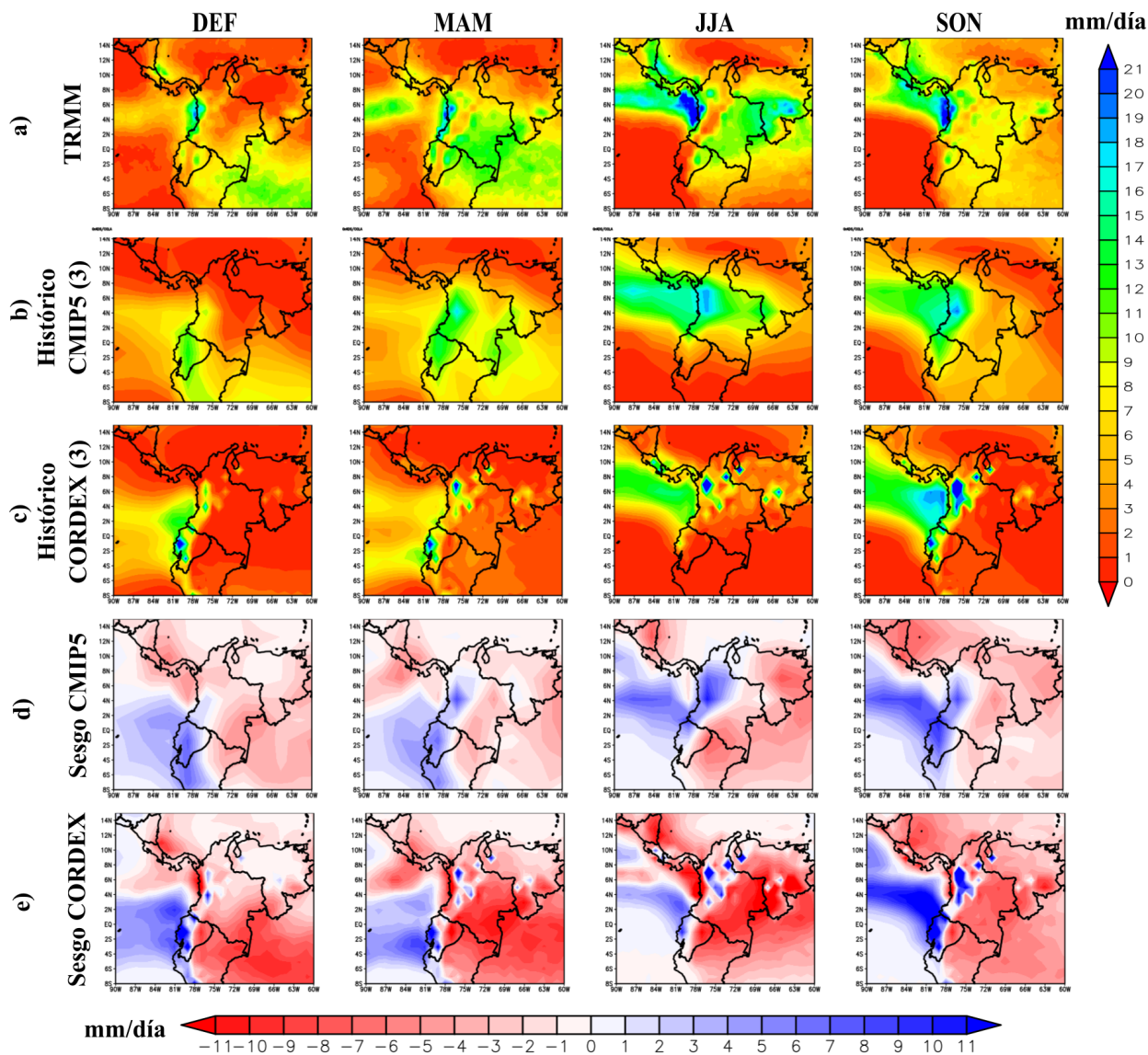


Figura 5.19: Climatología de precipitación de TRMM a), simulaciones históricas CMIP5 de los 3 modelos con simulaciones CORDEX b), ensemble de las simulaciones CORDEX de estos modelos c) y sus sesgos respecto a TRMM d) y e), respectivamente.

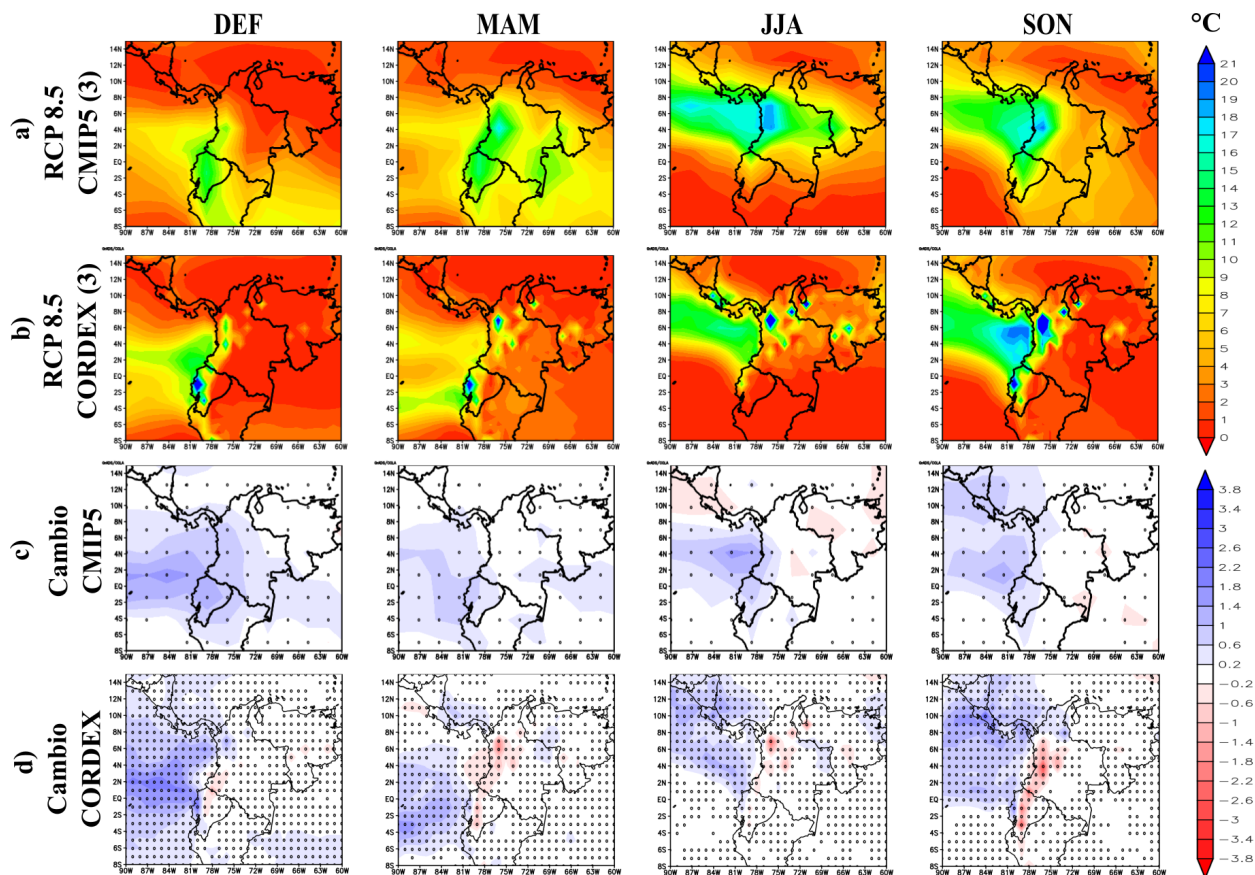


Figura 5.20: Proyecciones de precipitación bajo el RCP 8.5 para el periodo 2011-2040 para el ensemble de los 3 modelos CMIP5 a), el ensemble de las simulaciones CORDEX de estos modelos b) y sus cambios respecto al periodo histórico c) y d), respectivamente.

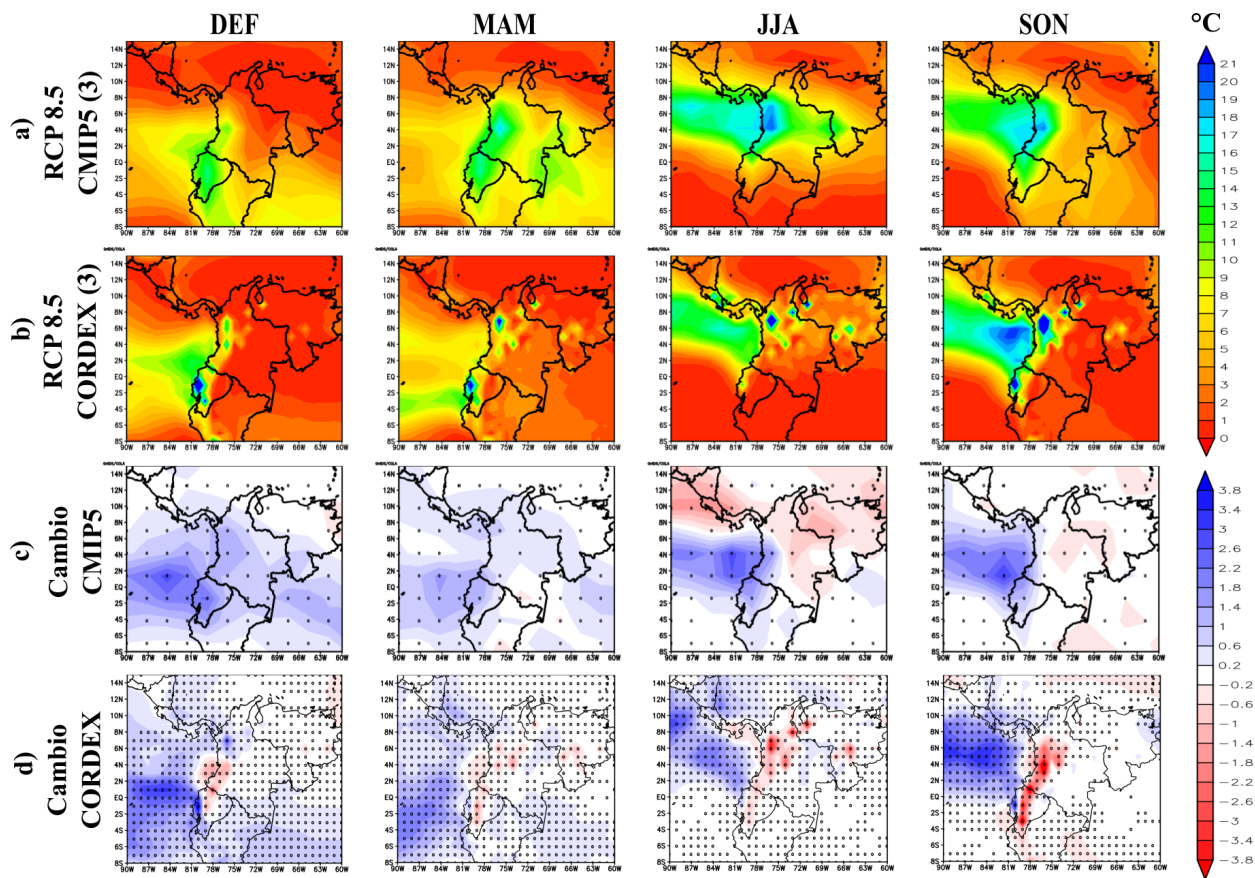


Figura 5.21: Proyecciones de precipitación bajo el RCP 8.5 para el periodo 2041-2070 para el ensamble de los 3 modelos CMIP5 a), el ensamble de las simulaciones CORDEX de estos modelos b) y sus cambios respecto al periodo histórico c) y d), respectivamente.

Para el período 2071-2100 (figura 5.22), se dan los cambios de mayor magnitud, proyectándose aumentos superiores a 3.8mm/día sobre el océano Pacífico en c) y d). Se observan disminuciones de 2.2mm/día al noroeste del país en JJA en el ensamble de CMIP5 y superiores a 3.8mm/día sobre los Andes colombianos en el ensamble CORDEX, principalmente en los últimos dos trimestres del año. Además, en DEF se observa disminución en las precipitaciones al sur de la región Pacífica de 3mm/día, aproximadamente (d). Para finales de siglo se observa el mayor acuerdo entre modelos, con acuerdo para casi la totalidad del territorio en los modelos CMIP5 para los trimestres DEF, JJA y SON, principalmente, mientras que en el ensamble CORDEX se observa acuerdo durante todo el año. Las disminuciones proyectadas sobre los Andes para las simulaciones CORDEX se deben principalmente al modelo CSIRO-Mk3-6-0 mientras que los aumentos sobre el océano Pacífico se deben a los modelos CSIRO-Mk3-6-0 y IPSL-CM5A-MR (Anexo D).

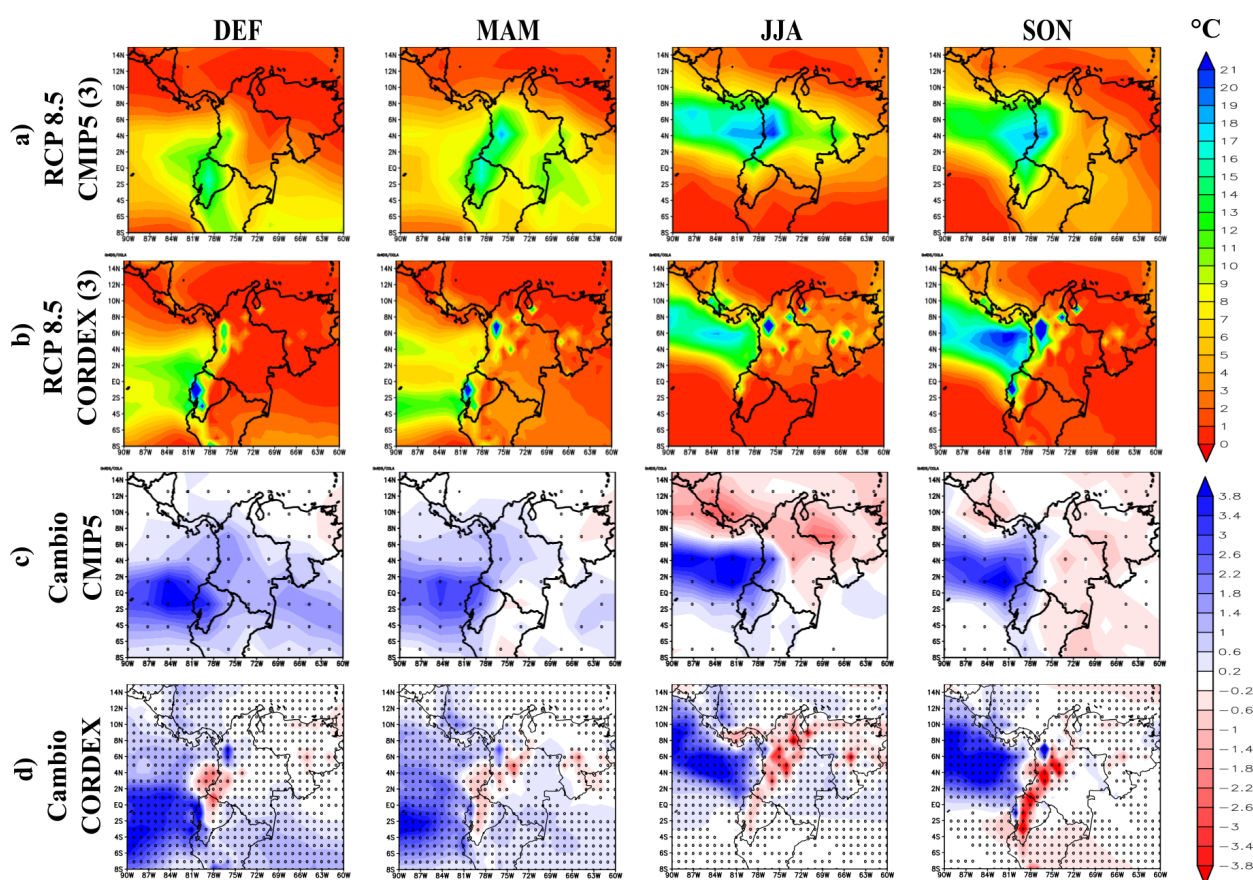


Figura 5.22: Proyecciones de precipitación bajo el RCP 8.5 para el periodo 2071-2100 para el ensamble de los 3 modelos CMIP5 a), el ensamble de las simulaciones CORDEX de estos modelos b) y sus cambios respecto al periodo histórico c) y d), respectivamente.

5.3. Comparación entre las comunicaciones nacionales de Colombia

Con el objeto de identificar la evolución en los escenarios de cambio climático para Colombia, este trabajo consideró una revisión de la Segunda y Tercera CNCC (ver tabla E.1 en Anexo E), comparando sus metodologías y resultados. Para la temperatura, la Segunda y Tercera CNCC concuerdan en los aumentos presentados en sus ensambles multiescenario para los periodos 2011-2040 y 2041-2070; sin embargo, en el periodo 2071-2100, hay contradicciones entre ambas CNCC ya que mientras que en la Segunda CNCC se proyectan los mayores aumentos de temperatura sobre la región Andina (3-4°C) y Caribe (>4°C), la Tercera CNCC muestra los menores aumentos para esta región (0.5-2.0°C), mientras que para el resto del país la Tercera CNCC proyecta aumentos de 3.0°C. Por otra parte, al comparar las proyecciones de cada RCP, la Tercera CNCC y el presente trabajo concuerdan en lo proyectado para el periodo 2011-2040. Ambas referencias concuerdan ligeramente en las magnitudes en los otros dos periodos pero difieren en la distribución territorial de los cambios de temperatura, ya que mientras los máximos aumentos de la Tercera CNCC se dan en la región Andina y el este del país (parte de Vichada, Arauca y Casanare), con hasta 5.0°C, los máximos aumentos de temperatura identificados en el presente trabajo se dan sobre toda la región de la Orinoquía y la Amazonía (>5.2°C). Llama la atención que pese a que en los 4 RCPs considerados en la Tercera CNCC, la región Andina muestra aumentos superiores a otras regiones, ésta aparezca en el promedio de escenarios como la región con menores aumentos.

En cuanto a la precipitación, la Segunda y Tercera CNCC tampoco concuerdan en sus ensambles multiescenario. En particular, la Segunda CNCC proyecta disminuciones sobre parte de la región Andina ($\geq 10\%$) para el periodo 2011-2040 y reducciones mayores en algunos de los departamentos de esta región (20-30%) para el periodo 2071-2100, mientras que en la Tercera CNCC se proyectan reducciones del 10-40% en el Caribe y la Amazonía y aumentos de hasta 30% en algunas zonas de la región Andina para los tres periodos. Por otra parte, la Tercera CNCC presenta aumentos de precipitación muy similares en la región Andina (10-40%) para todos los RCPs y disminuciones de hasta el 40% en Caribe, Orinoquía y Amazonía, mientras que en el presente trabajo, los aumentos y disminuciones presentan mayor magnitud en la medida medida que nos acercamos a finales del siglo XXI. Además, las proyecciones analizadas en este trabajo generan los cambios más marcados para el RCP8.5 para finales de siglo, donde destacan aumentos de precipitación para la región Pacífica (>2.6mm/día) y disminuciones para la Orinoquía (-1.4mm/día) y el Caribe (-1.8mm/día).

5.4. Comparación con comunicaciones nacionales de otros países

Con el objeto de comparar las metodologías empleadas en las CNCC de Colombia, se revisaron 37 CNCC de otros países (ver tabla F.1 en Anexo F). Si bien no se revisaron las CNCC de todas las partes de la CMNUCC, se procuró abarcar países miembros del Anexo I (países industrializados y miembros de la OCDE), así como los países que no hacen parte de dicho

Anexo (en su mayoría países del Sur Global). Se encontró que a nivel general, las CNCC de países del Norte Global suelen estar mejor respaldados por estudios a nivel nacional, pues en muchas ocasiones cuentan con modelos desarrollados por universidades y centros de investigación locales y tienden a tener mayor claridad en las metodologías utilizadas. Además, varios de estos países cuentan con portales con información completa y actualizada (datos de observaciones, escenarios y proyecciones) sobre impactos del cambio climático para su país. Esta información es de acceso libre y fácil por parte de cualquier persona. Por otra parte, los países del Sur Global suelen tener menos estudios o investigaciones en cuanto a proyecciones de cambio climático y usualmente no cuentan con modelos propios que puedan representar con menor incertidumbre los impactos nacionales ante este fenómeno.

De manera general se observó que los países pertenecientes al Anexo I en la CMNUCC han emitido hasta la fecha hasta su séptima CNCC, cumpliendo con lo establecido en la decisión 2/CP.17 (CMNUCC, 2012) de emitir una CNCC cada 4 años, a partir de su ingreso a la CMNUCC. La única excepción es Estados Unidos que emitió hasta la sexta CNCC en 2014, coincidiendo con el retiro del país del Acuerdo de París en 2017. Por otra parte, los países que no hacen parte del Anexo I, en su mayoría solo han presentado hasta la Tercera CNCC, aunque algunos solo tienen la Primera o Segunda CNCC, con excepciones de países como Uruguay (Quinta CNCC), Ghana (Cuarta CNCC), Brasil (Cuarta CNCC) y México (Sexta CNCC). De estos, Uruguay y Brasil ya han utilizado algunos modelos de la Fase 6 del Proyecto de Comparación de Modelos Acoplados (CMIP6), que corresponden a la generación más reciente de MCG. Llama la atención el caso de China, que es uno de los países con mayores emisiones de GEI según su inventario y solo ha presentado hasta la fecha su Tercera CNCC; además, que Estados Unidos y Francia, que tienen modelos propios y grandes centros de investigación, no presenten metodologías en sus CNCC ni resultados muy detallados de las proyecciones de cambio climático desarrolladas por sus centros de investigación.

En cuanto a las metodologías utilizadas en las CNCC, se observó a nivel general que falta especificidad y claridad en las mismas en la mayoría de los documentos, ya que no suelen especificarse las fuentes de datos de observaciones y sus periodos de registro, y en ocasiones tampoco los modelos, escenarios y periodos utilizados, información que es fundamental para la reproducción y avances en investigaciones en cambio climático para cada nación, ya que los efectos del fenómeno son variantes para cada país (IPCC, 2014). Es importante señalar que NO se encontró en alguna otra CNCC en la que se realizaran ensambles multiescenario, como se realizó en las CNCC de Colombia, lo cual resta respaldo a la fiabilidad de los resultados presentados en las mismas.

Capítulo 6

Conclusiones y discusión

Dado que las CNCC son un elemento fundamental en la toma de decisiones en materia de cambio climático en cuanto a adaptación y mitigación (IDEAM, 2001), es importante que las metodologías empleadas para su realización sigan los lineamientos establecidos por el IPCC, como lo recomienda la CMNUCC en su decisión 17/CP.8 (CMNUCC, 2003), para así garantizar mayor robustez y confiabilidad en los resultados obtenidos. Se pudo observar que las CNCC para Colombia presentan contradicciones en sus resultados y proyecciones para el territorio nacional, así como emplean metodologías poco usadas por otras naciones en la elaboración de sus CNCC. Preocupa entonces que las decisiones tomadas respecto a la adaptación y mitigación para la reducción de vulnerabilidad ante el cambio climático sean insuficientes y mal enfocadas, incrementando el riesgo para los ecosistemas, especies y poblaciones humanas, de las cuales las de más escasos recursos serán las más afectadas por el cambio climático (IPCC, 2014).

Se pudo observar que el uso de ensambles multiescenario para estimar proyecciones de cambio climático no es pertinente, debido a que cada RCP está condicionado por distintos factores de índole económica, política, demográfica, tecnológica, así como de formas de uso del suelo, usos y obtención de la energía (IPCC, 2014), incluyendo decisiones de alimentación de la población (Thomson y cols., 2011). Por lo tanto, promediarlas confunde las señales de cada una y minimiza el posible impacto que realmente puede tener el cambio climático sobre un territorio, especialmente porque el escenario peor representado por los promedios de escenarios es el RCP8.5, lo cual constituye una considerable subestimación del riesgo climático (Schwalm y cols., 2020). Además, el RCP8.5 es la ruta que representa con mayor cercanía las emisiones actuales y posiblemente sea la más cercana a las emisiones a mediados de siglo (Schwalm y cols., 2020). Lo anterior, constituye un riesgo importante ante el cambio climático para el país, dada su alta vulnerabilidad social y ambiental (Roncancio y cols., 2020)(Patt y cols., 2010)(IPCC, 2014) que puede promover la implementación de medidas de adaptación inadecuadas, poniendo en riesgo vidas humanas, la riqueza ecosistémica de la nación (IPCC, 2014) y su desarrollo económico (Bruckner, 2012).

En el Informe Especial del IPCC sobre el aumento de 1.5°C con respecto a niveles pre-industriales (IPCC, 2018), se discuten los impactos de un aumento en la temperatura global de 1.5°C respecto niveles pre-industriales (temperatura posible para finales de siglo únicamente

bajo un escenario como el RCP2.6) sobre la disponibilidad y calidad del agua, ocurrencia de eventos hidrológicos extremos y afectaciones a otras especies y ecosistemas (particularmente en los tropicales), incluyendo su deterioro y extinción, entre otros impactos. Este informe muestra la gran diferencia entre un aumento de temperaturas globales de 1.5°C y uno de 2.0°C (Hoegh-Guldberg y cols., 2018), lo cual permite concluir que un aumento bajo cualquiera de los RCPs es de urgente relevancia.

A nivel general, en las CNCC de otros países falta rigurosidad y claridad en la forma de presentar los datos y métodos utilizados, lo cual dificulta la posibilidad de retroalimentar e incrementar el conocimiento al respecto por parte de otras entidades a nivel nacional. Esto posiblemente se deba a que los encargados de la redacción de los documentos podrían ser funcionarios con una preparación diferente a las áreas de las ciencias de la Tierra y el clima, y pueden pasar por alto información importante. Si bien esta información podría no ser del interés de todas las personas, podría ser incluida en los anexos de forma detallada para ser de fácil acceso a quien interese. Se resalta también que en ninguna otra CNCC diferentes a las de Colombia se encontró la estimación de ensambles multiescenario.

Por otra parte, los sesgos encontrados en la representación del clima presente para los modelos de circulación global utilizados en el presente trabajo, muestra las dificultades que tienen este tipo de modelos para representar la temperatura del aire en superficie y la precipitación en Colombia, lo cual ha sido comprobado en otros estudios (Bonilla-Ovallos y Sánchez, 2017) (Sierra, Arias, y Vieira, 2016) (Yin, Fu, Shevliakova, y Dickinson, 2012) (Ortega y cols., 2019). El uso de simulaciones CORDEX para el presente trabajo demostró que no siempre se obtienen mejoras en las representaciones de las variables y sus patrones espaciales al emplear reducción de escala, ya que se obtuvieron mayores sesgos en la representación del clima de referencia con las simulaciones CORDEX que con sus modelos CMIP5 correspondientes para el territorio colombiano. Cabe resaltar que la resolución de las simulaciones CORDEX utilizadas fue de 0.44° (48.9km, aproximadamente). Para Colombia, se han realizado recientemente algunos estudios utilizando modelos a resoluciones más finas (Oglesby y cols., 2016) (Martinez, Arias, Castro, Chang, y Ochoa-Moya, 2019) (Posada-Marín, Rendón, Salazar, Mejía, y Villegas, 2019) y particularmente en (Oglesby y cols., 2016) se encontró una representación adecuada de zonas con topografía leve e insulares a una resolución de 12km, mientras que para zonas con topografías complejas es requerido (pero no necesariamente suficiente), el uso de resoluciones de alrededor de 4km. Por lo anterior, se resalta la necesidad de desarrollar ejercicios de reducción de escala dinámica que mejoren la representación de precipitación (Posada-Marín y cols., 2019) (Bonilla-Ovallos y Sánchez, 2017) y temperatura del aire en superficie (Gutowski y cols., 2020), máxime en regiones topográficamente complejas como Colombia.

Anexo A

Simulaciones históricas de temperatura de modelos CORDEX

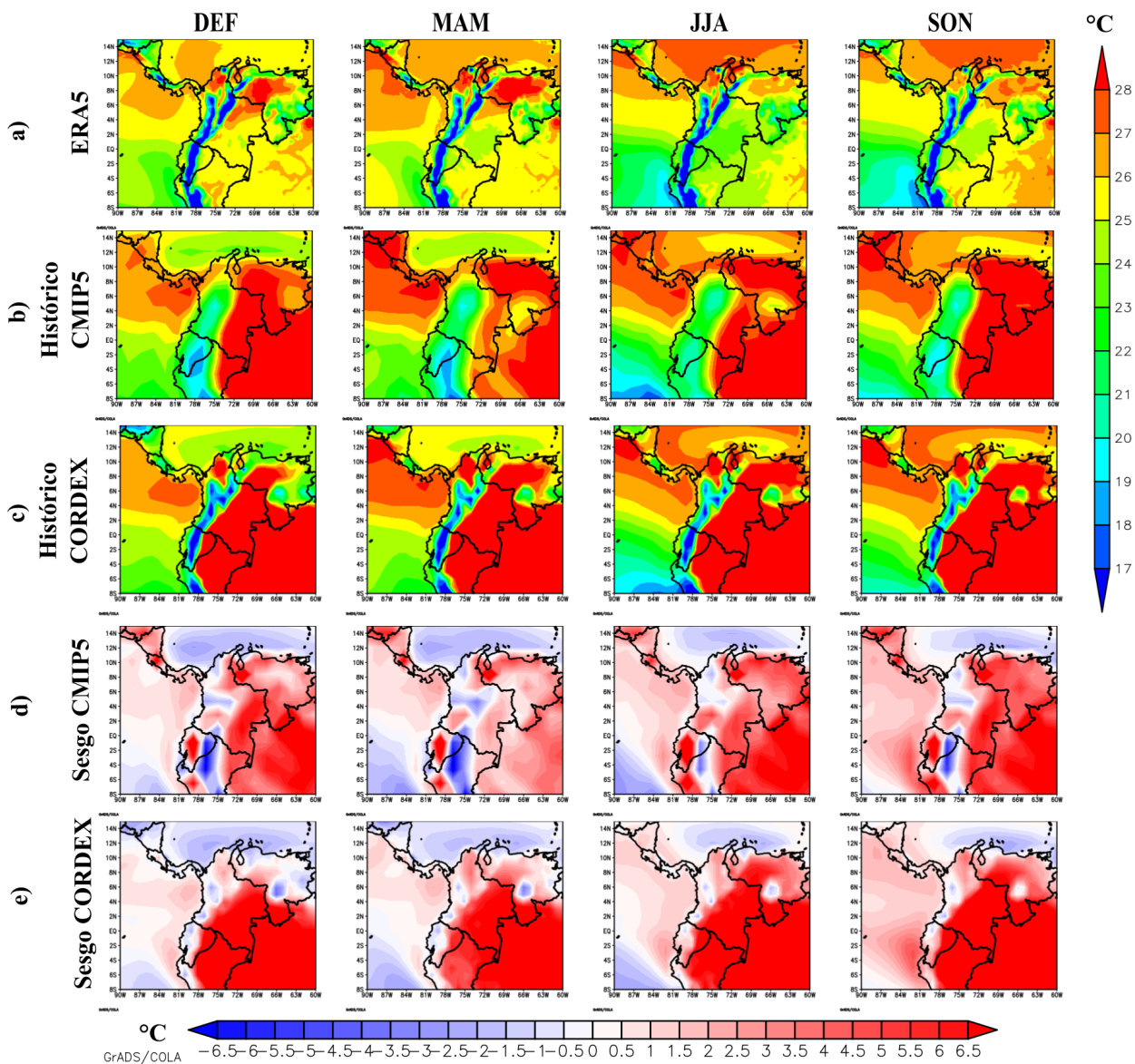


Figura A.1: Climatología de temperatura superficial del aire de ERA5 a), simulación histórica para el modelo CSIRO-Mk3-6-0 b), simulación CORDEX de este modelo c), y sus sesgos respecto a ERA5 d) y e), respectivamente.

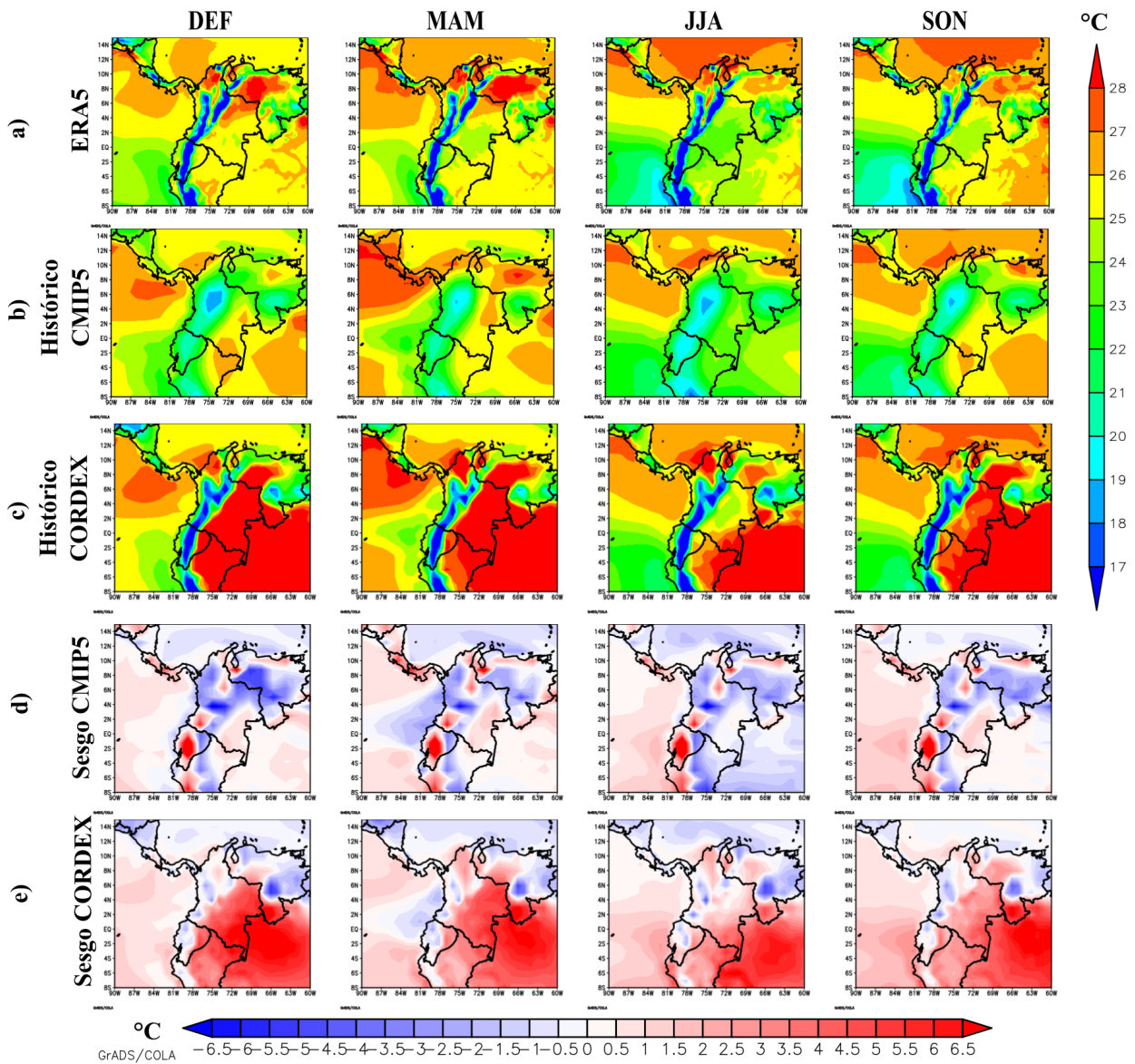


Figura A.2: Climatología de temperatura superficial del aire de ERA5 a), simulación histórica para el modelo HadGEM2-ES b), simulación CORDEX de este modelo c), y sus sesgos respecto a ERA5 d) y e), respectivamente.

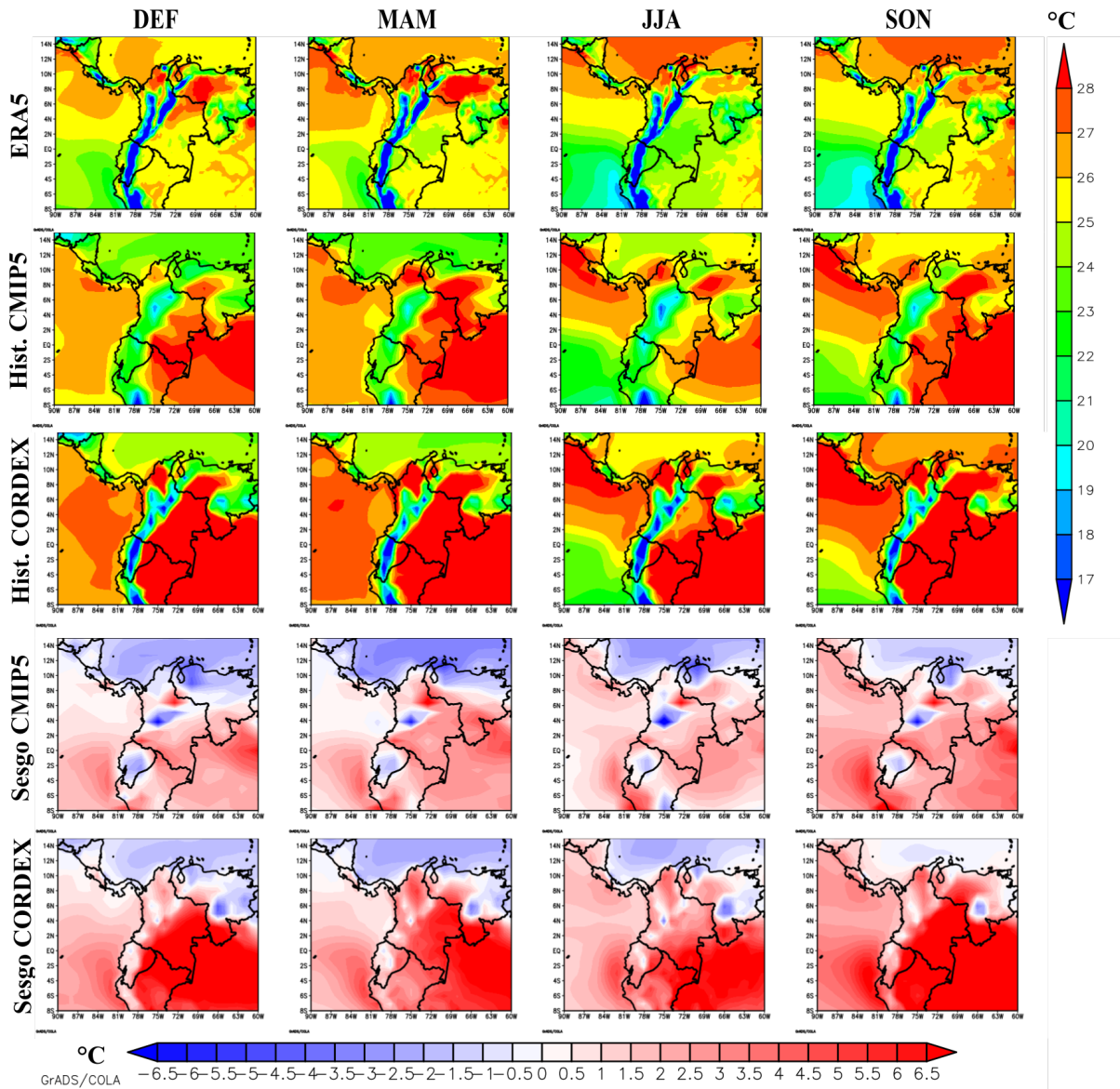


Figura A.3: Climatología de temperatura superficial del aire de ERA5 a), simulación histórica para el modelo IPSL-CM5A-MR b), simulación CORDEX de este modelo c), y sus sesgos respecto a ERA5 d) y e), respectivamente.

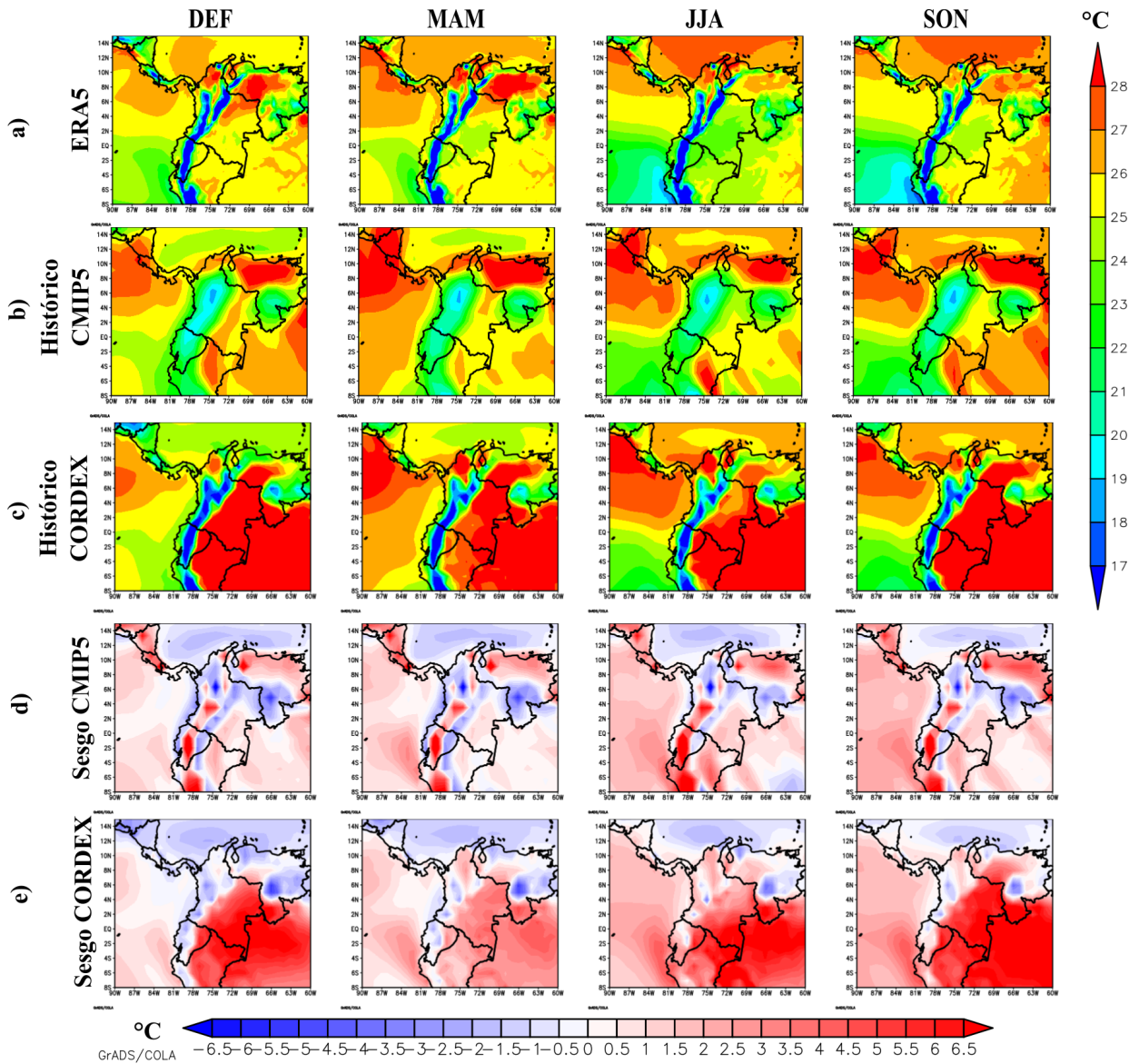


Figura A.4: Climatología de temperatura superficial del aire de ERA5 a), simulación histórica para el modelo MIROC5 b), simulación CORDEX de este modelo c), y sus sesgos respecto a ERA5 d) y e), respectivamente.

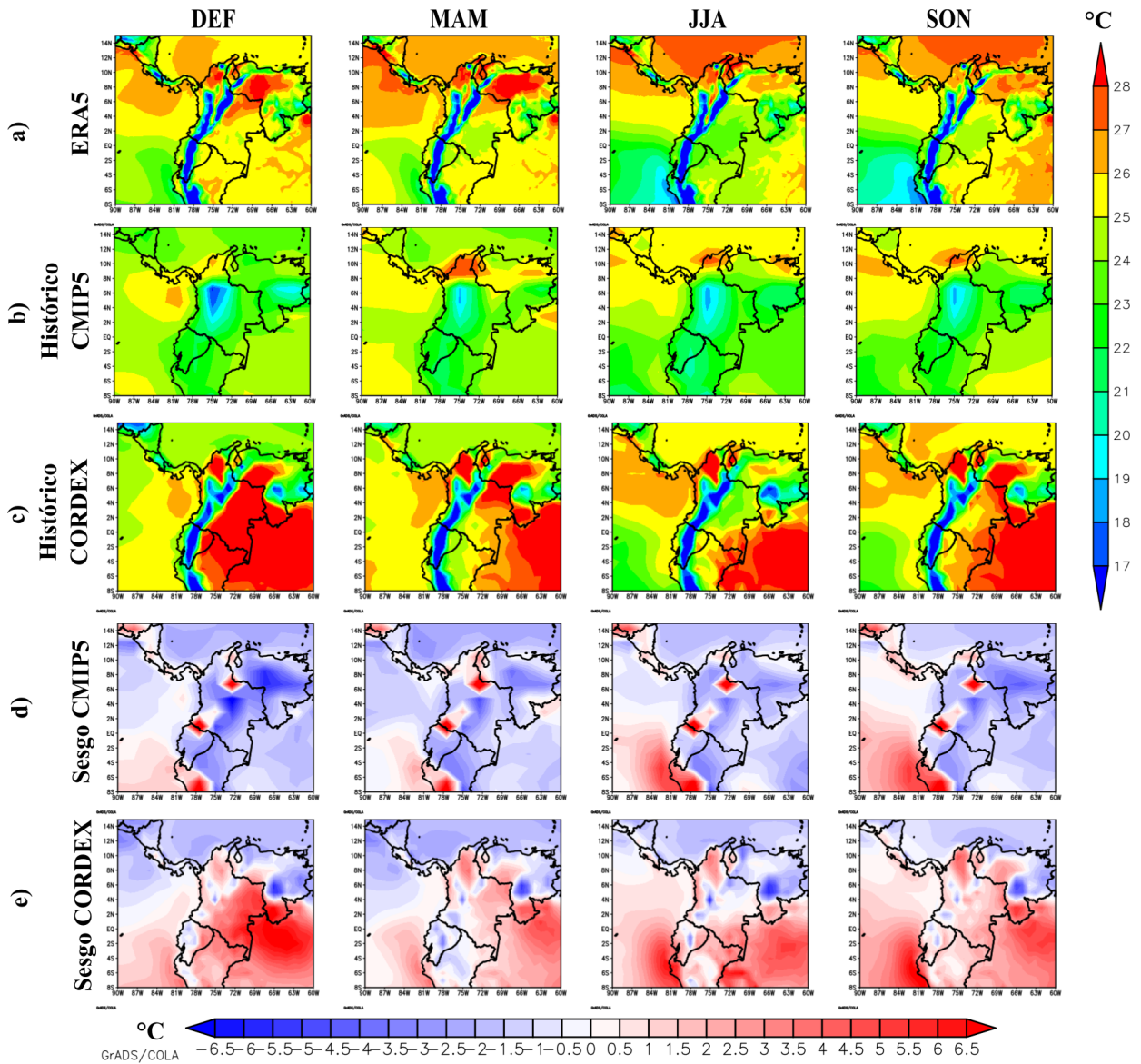


Figura A.5: Climatología de temperatura superficial del aire de ERA5 a), simulación histórica para el modelo NorESM1-M b), simulación CORDEX de este modelo c), y sus sesgos respecto a ERA5 d) y e), respectivamente.

Anexo B

Proyecciones de temperatura del aire en superficie de modelos CORDEX

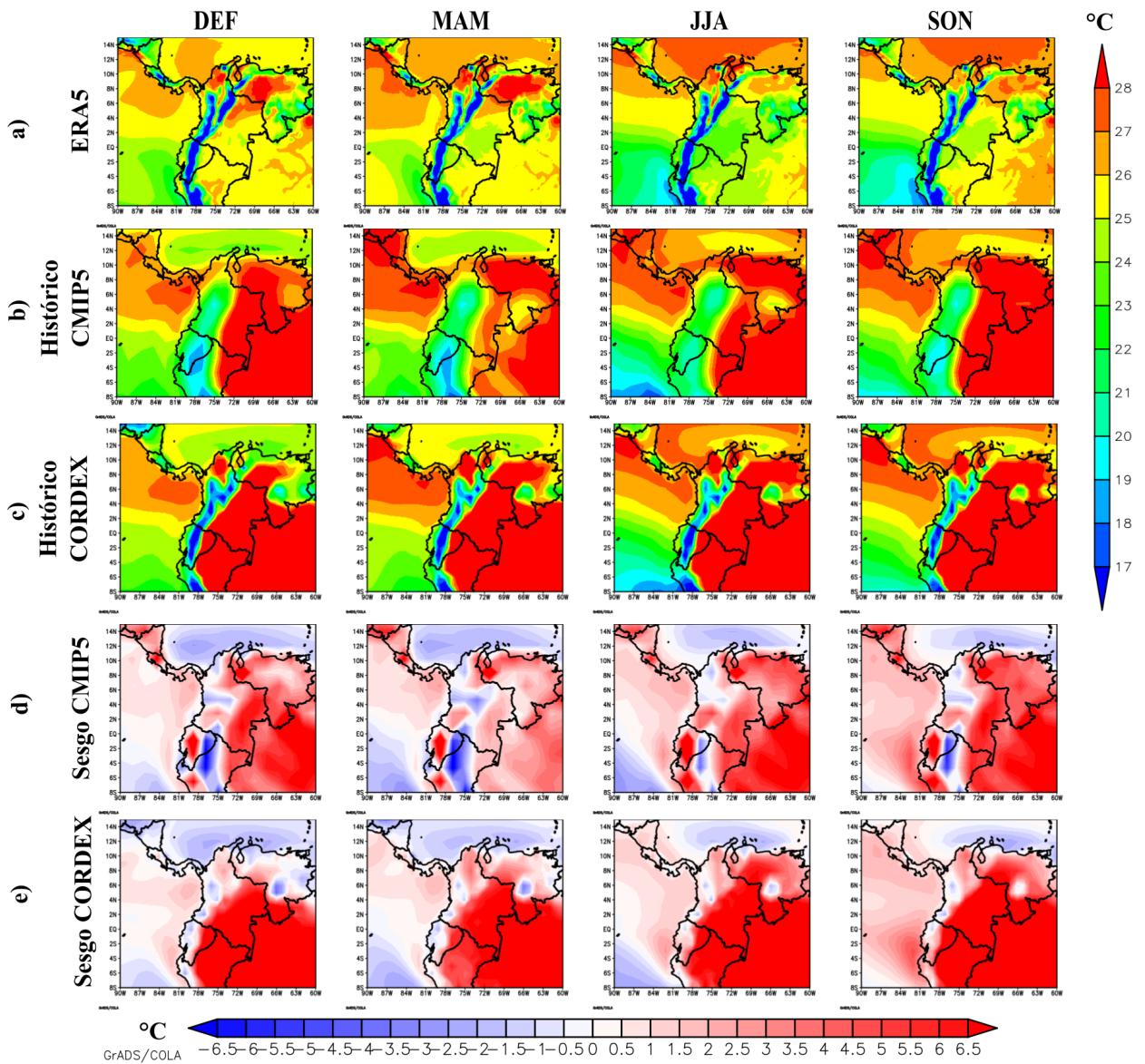


Figura B.1: Proyecciones de temperatura bajo el RCP 8.5 para el periodo 2071-2100 para el modelo CSIRO-Mk3-6-0 CMIP5 a), su simulación CORDEX b) y sus cambios respecto al periodo histórico c) y d) respectivamente.

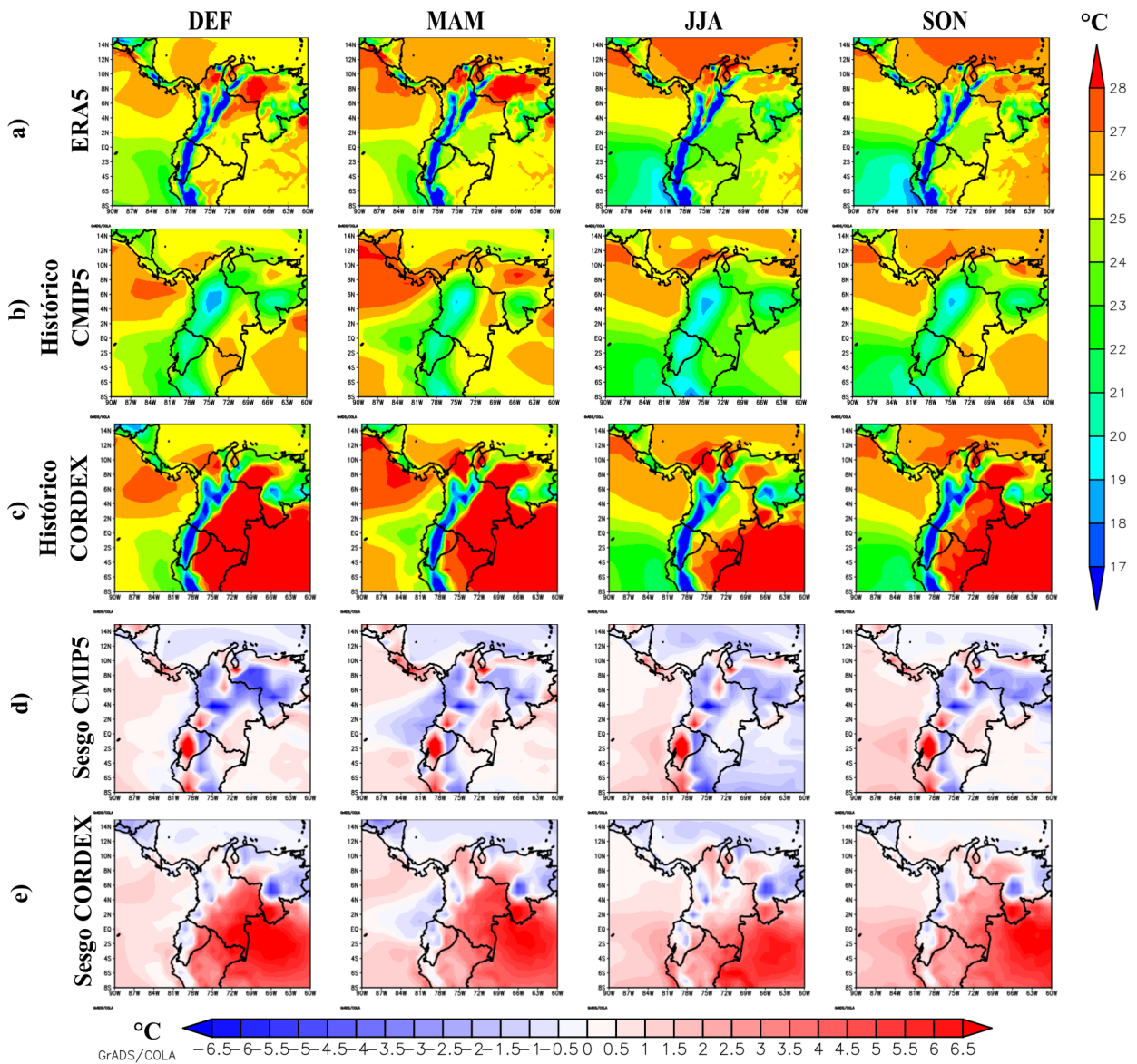


Figura B.2: Proyecciones de temperatura bajo el RCP 8.5 para el periodo 2071-2100 para el modelo HadGEM2-ES CMIP5 a), su simulación CORDEX b) y sus cambios respecto al periodo histórico c) y d) respectivamente.

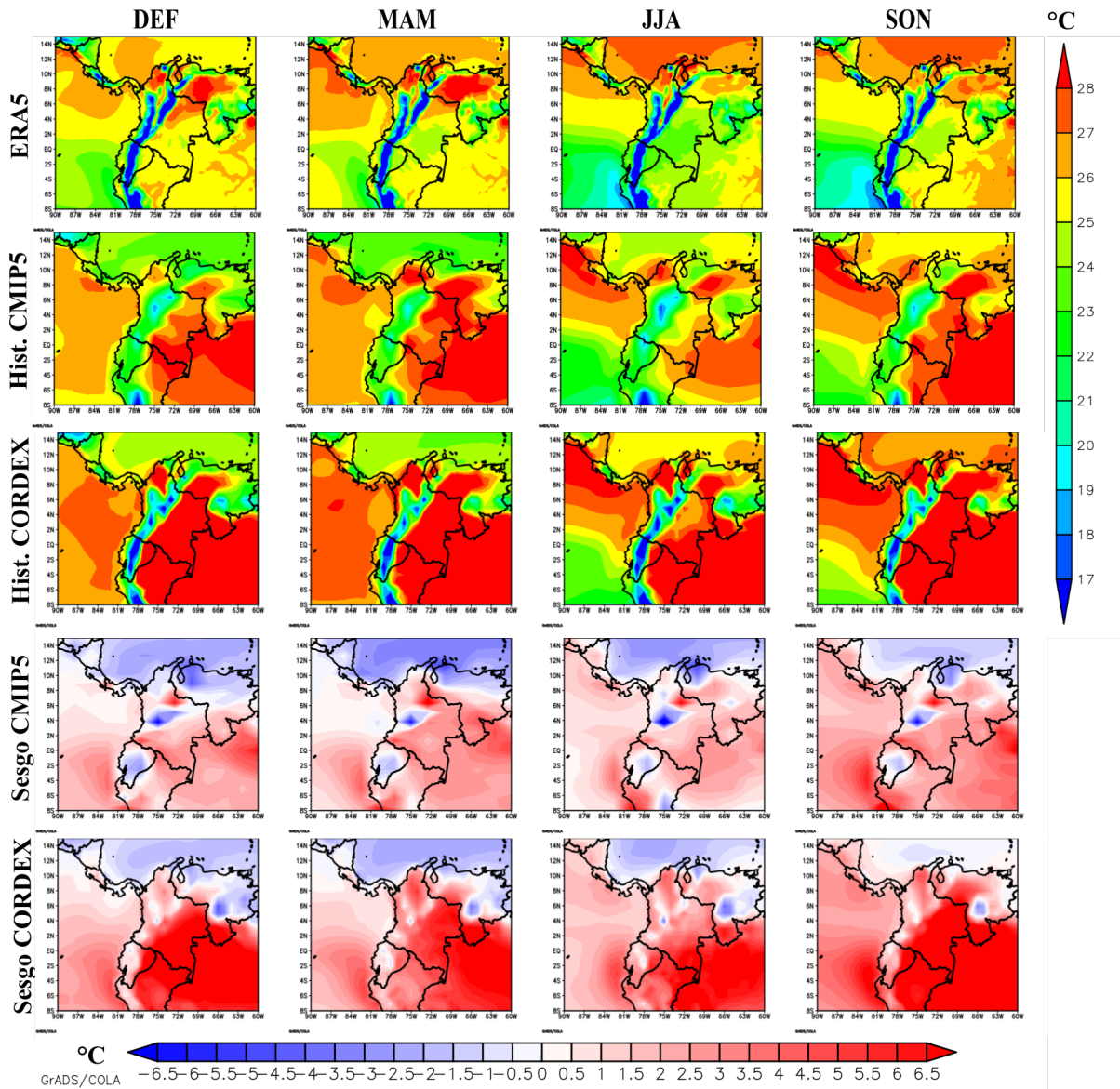


Figura B.3: Proyecciones de temperatura bajo el RCP 8.5 para el periodo 2071-2100 para el modelo IPSL-CM5A-MR CMIP5 a), su simulación CORDEX b) y sus cambios respecto al periodo histórico c) y d) respectivamente.

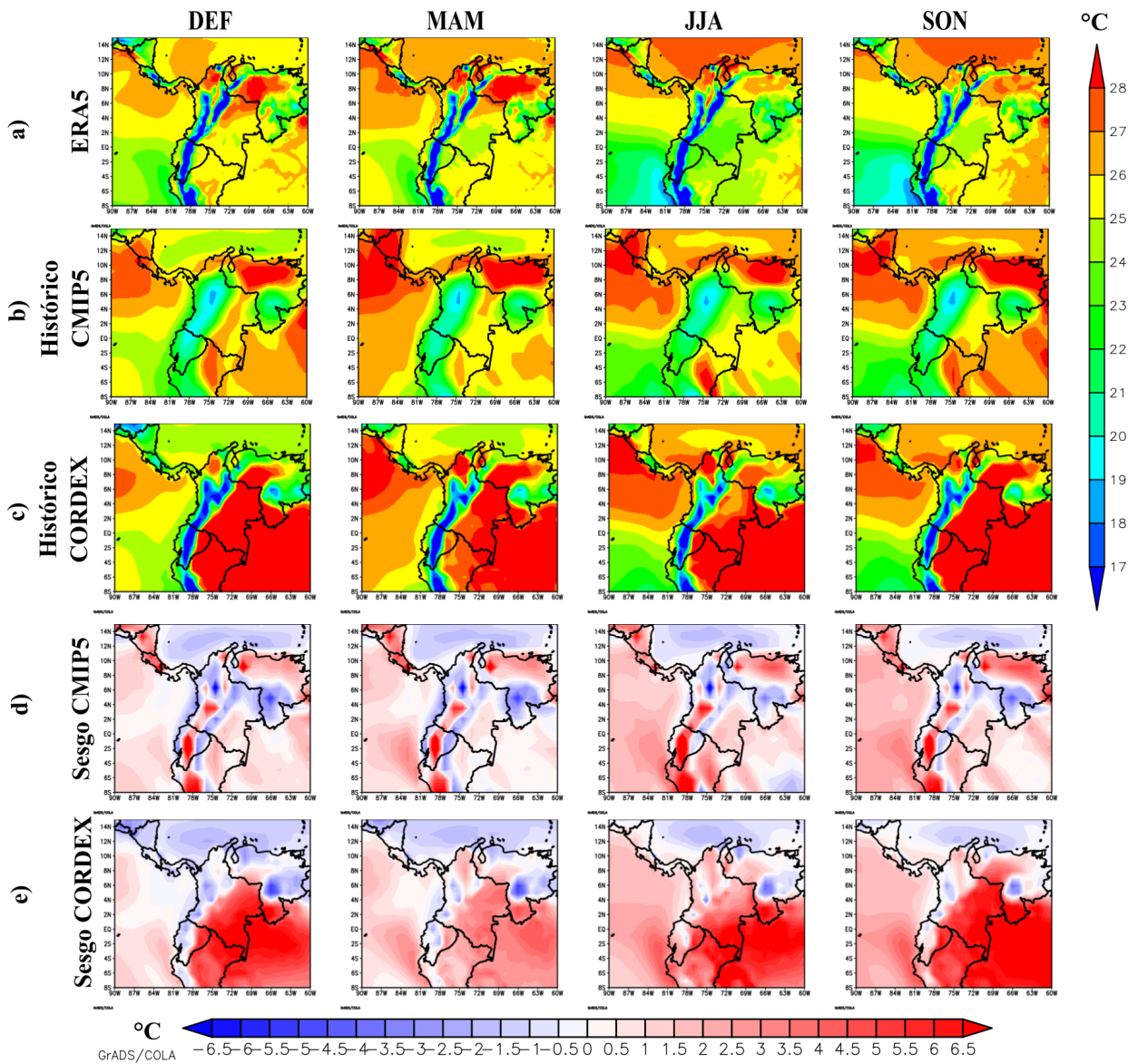


Figura B.4: Proyecciones de temperatura bajo el RCP 8.5 para el periodo 2071-2100 para el modelo MIROC5 CMIP5 a), su simulación CORDEX b) y sus cambios respecto al periodo histórico c) y d) respectivamente.

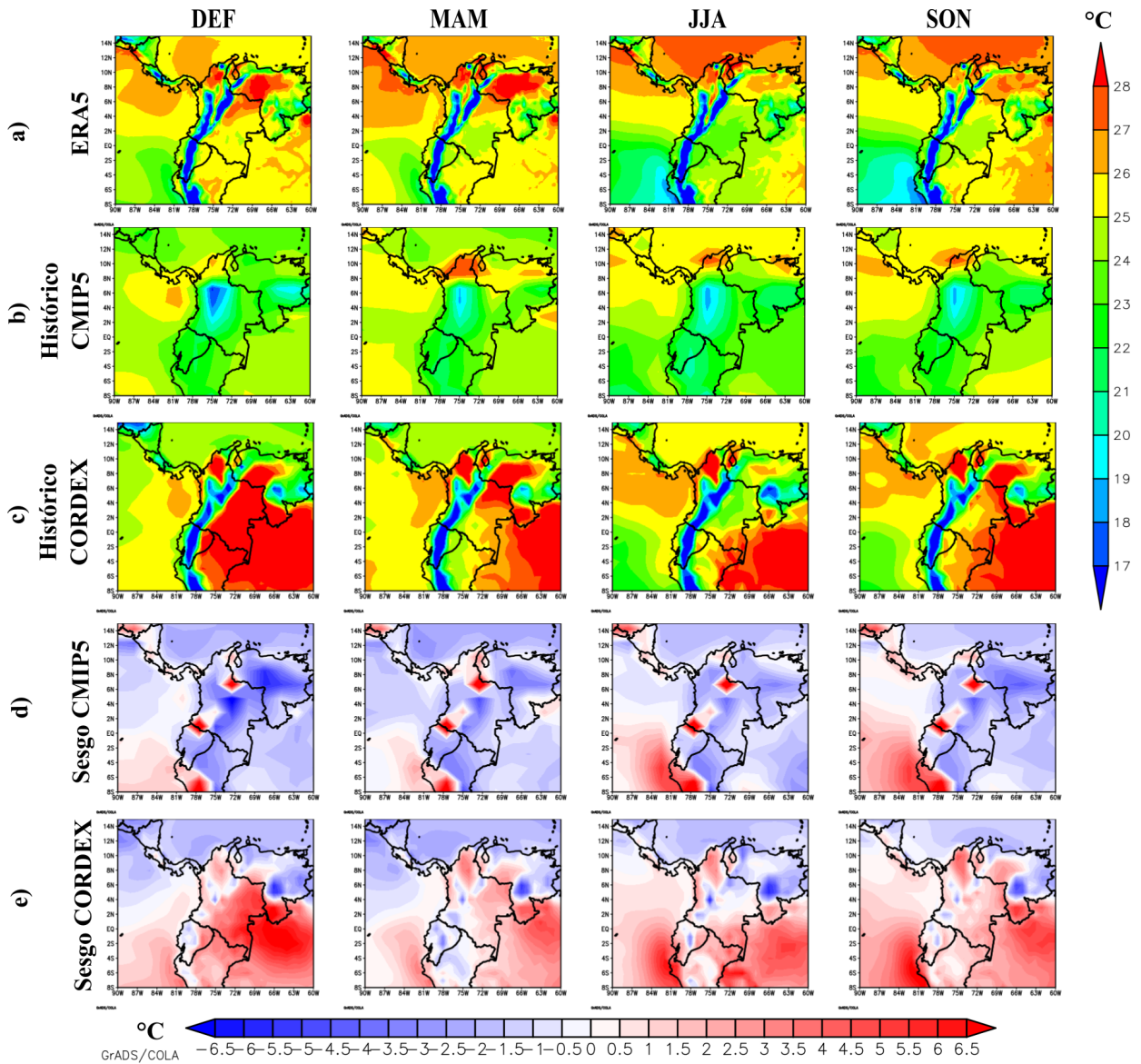


Figura B.5: Proyecciones de temperatura bajo el RCP 8.5 para el periodo 2071-2100 para el modelo NorESM1-M CMIP5 a), su simulación CORDEX b) y sus cambios respecto al periodo histórico c) y d) respectivamente.

Anexo C

Simulaciones históricas de precipitación de modelos CORDEX

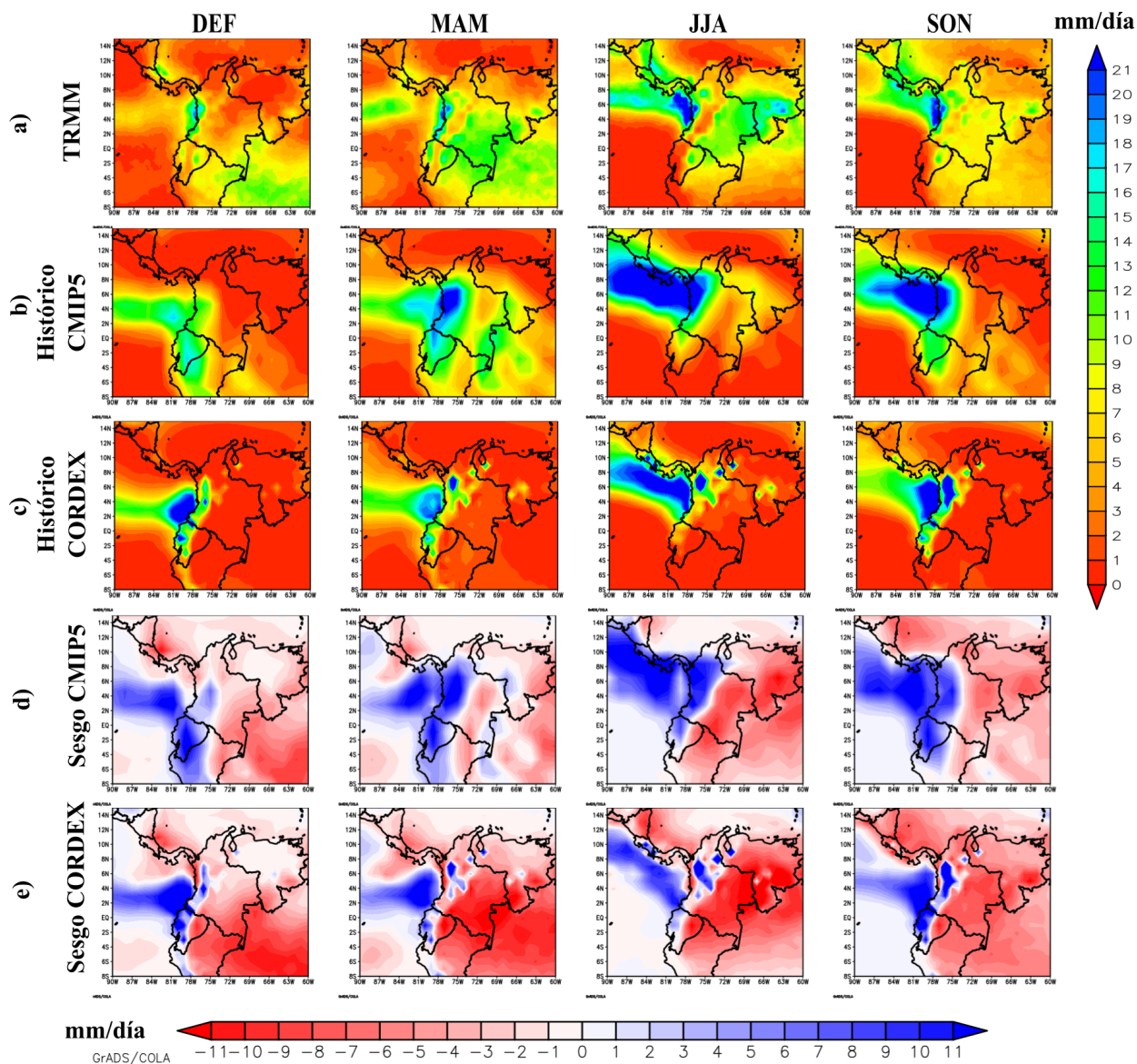


Figura C.1: Climatología de precipitación de TRMM a), simulación histórica para el modelo CSIRO-Mk3-6-0 b), simulación CORDEX de este modelo c), y sus sesgos respecto a TRMM d) y e), respectivamente.

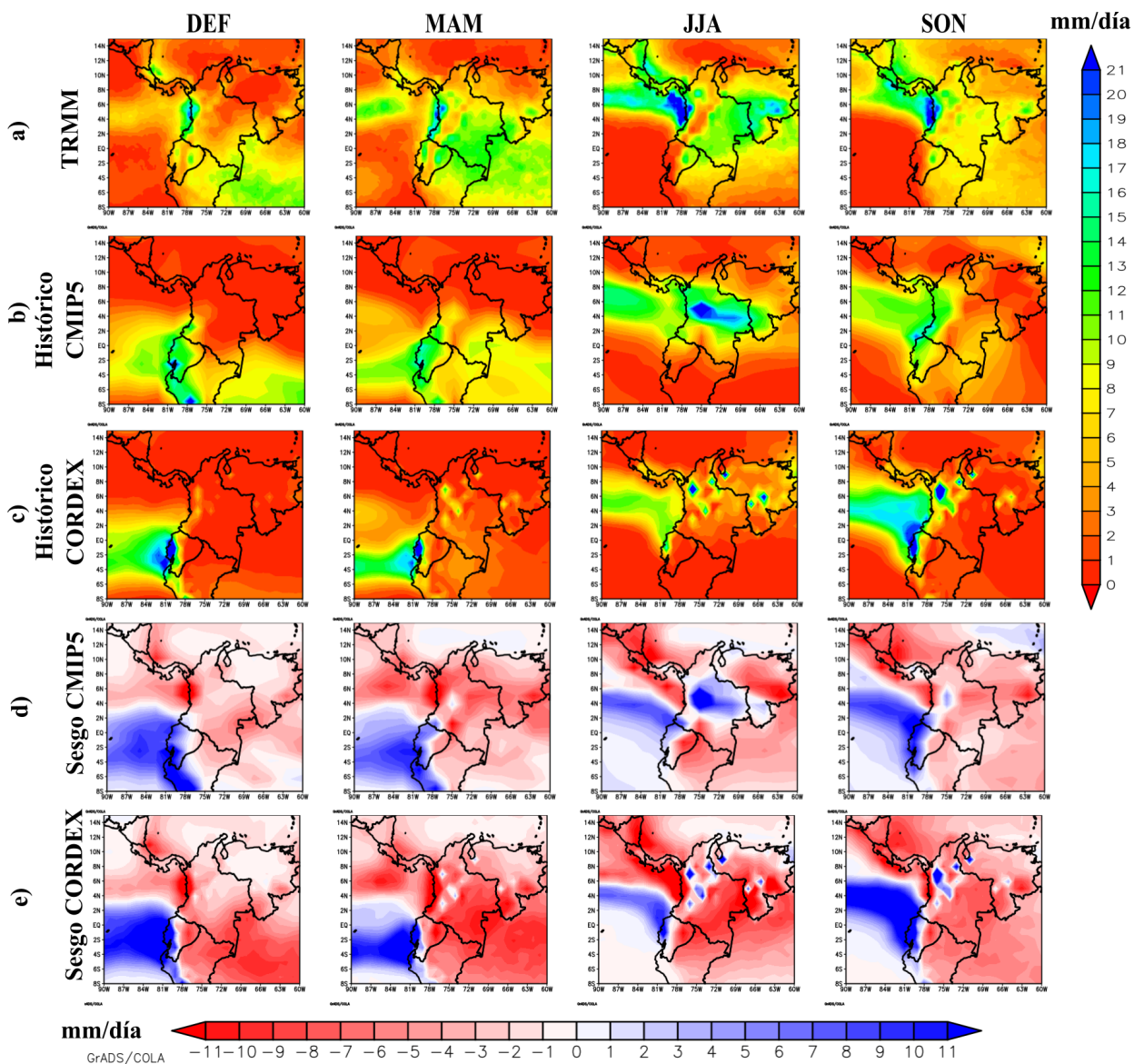


Figura C.2: Climatología de precipitación de TRMM a), simulación histórica para el modelo IPSL-CM5A-MR b), simulación CORDEX de este modelo c), y sus sesgos respecto a TRMM d) y e), respectivamente.

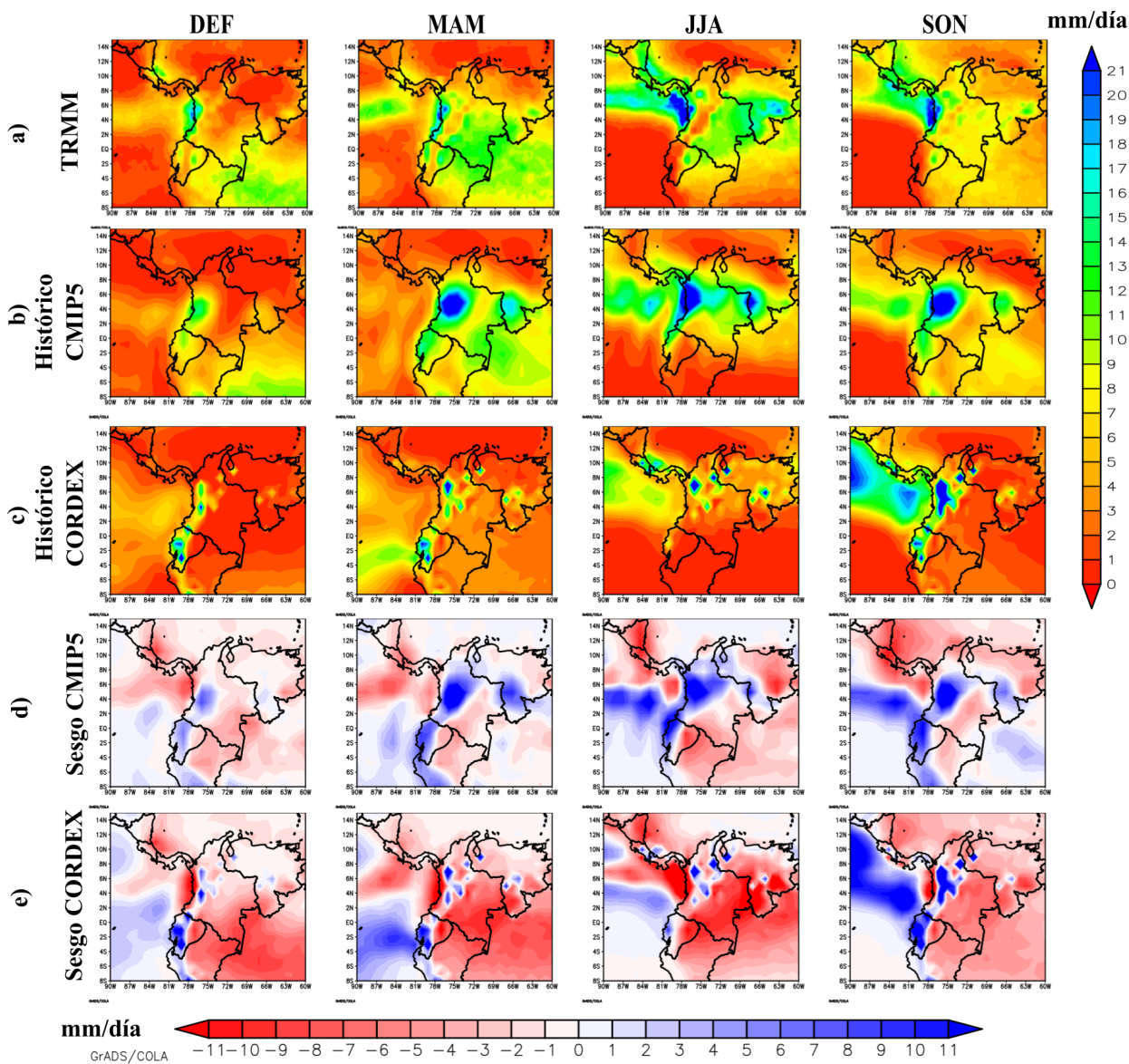


Figura C.3: Climatología de precipitación de TRMM a), simulación histórica para el modelo MIROC5 b), simulación CORDEX de este modelo c), y sus sesgos respecto a TRMM d) y e), respectivamente.

Anexo D

Proyecciones de precipitación de modelos CORDEX

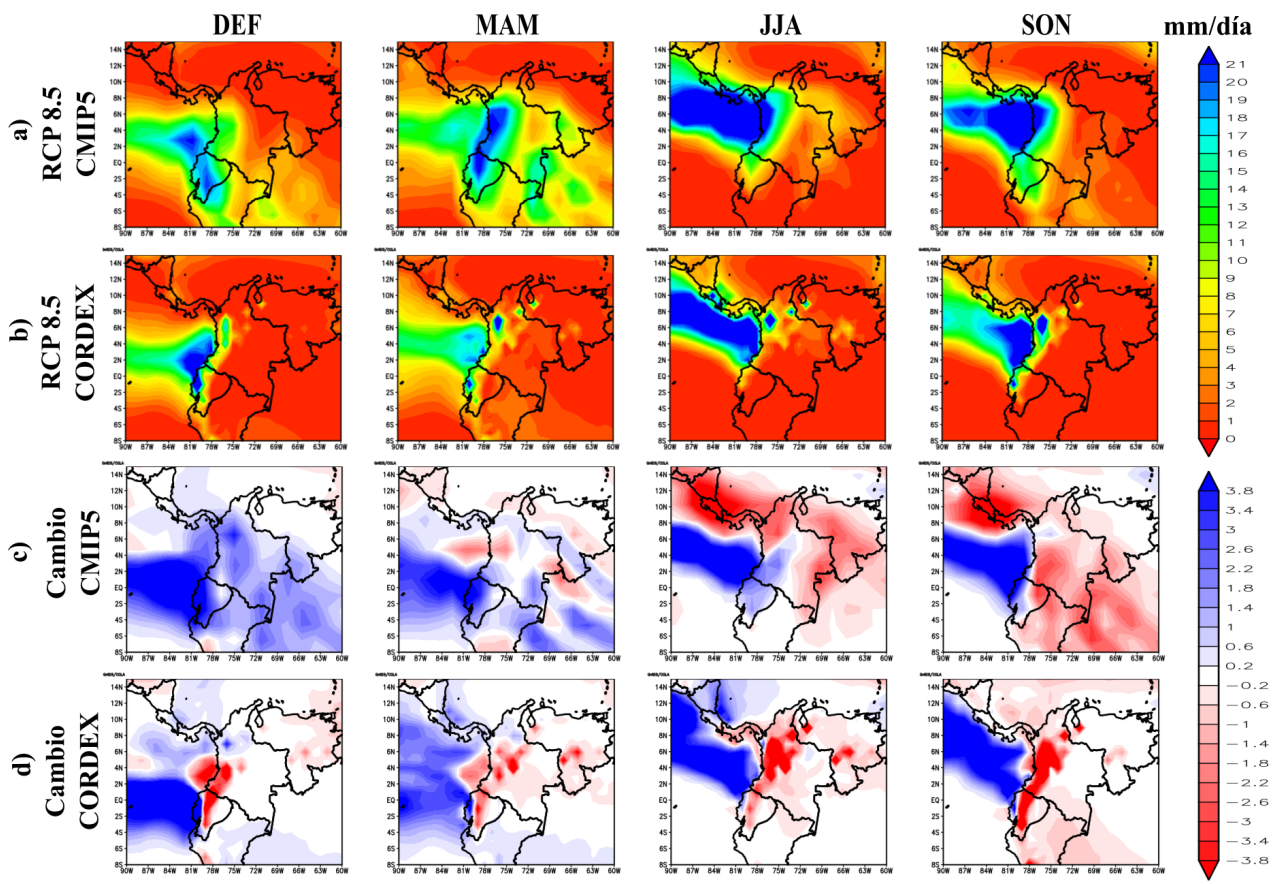


Figura D.1: Proyecciones de precipitación bajo el RCP 8.5 para el periodo 2071-2100 para el modelo CSIRO-Mk3-6-0 CMIP5 a), su simulación CORDEX b) y sus cambios respecto al periodo histórico c) y d) respectivamente.

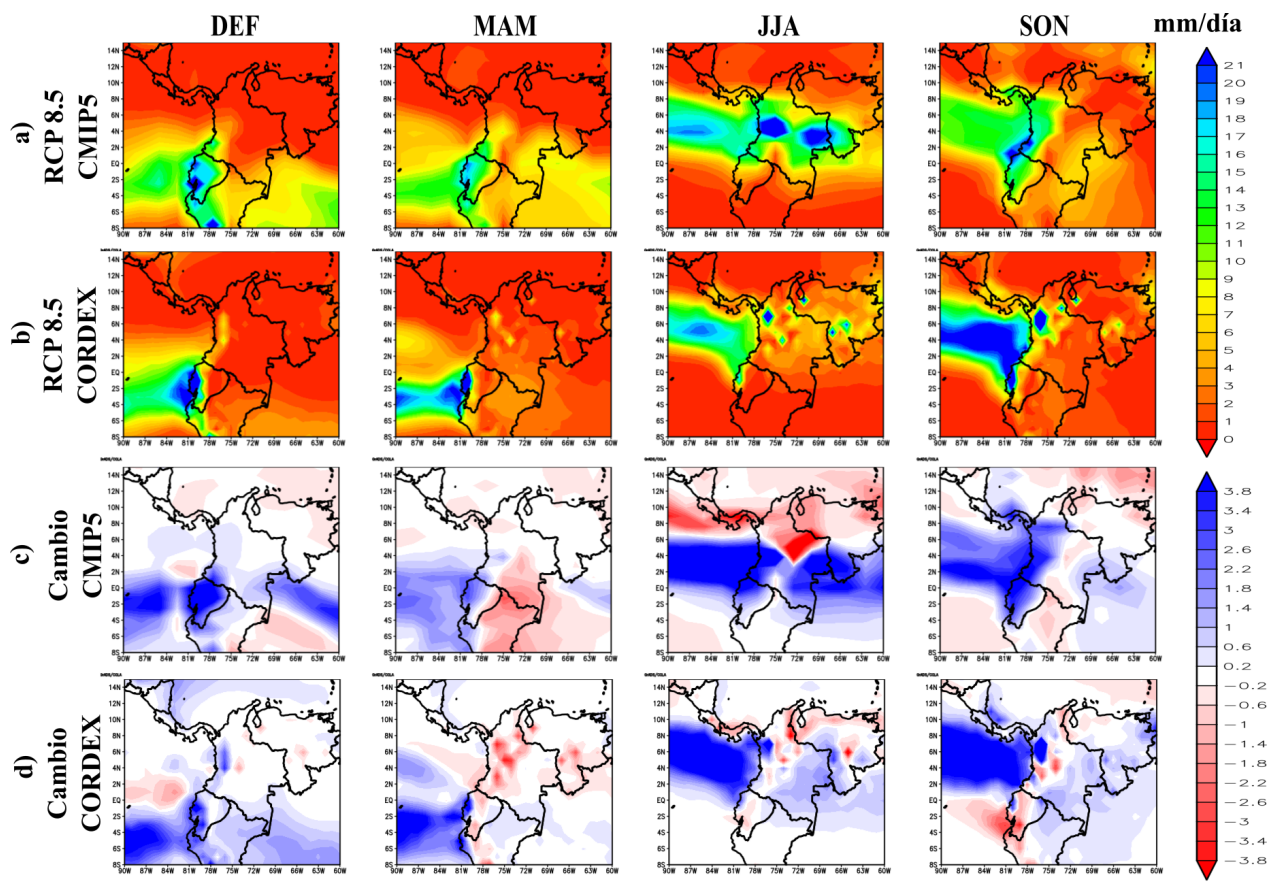


Figura D.2: Proyecciones de precipitación bajo el RCP 8.5 para el periodo 2071-2100 para el modelo IPSL-CM5A-MR CMIP5 a), su simulación CORDEX b) y sus cambios respecto al periodo histórico c) y d) respectivamente.

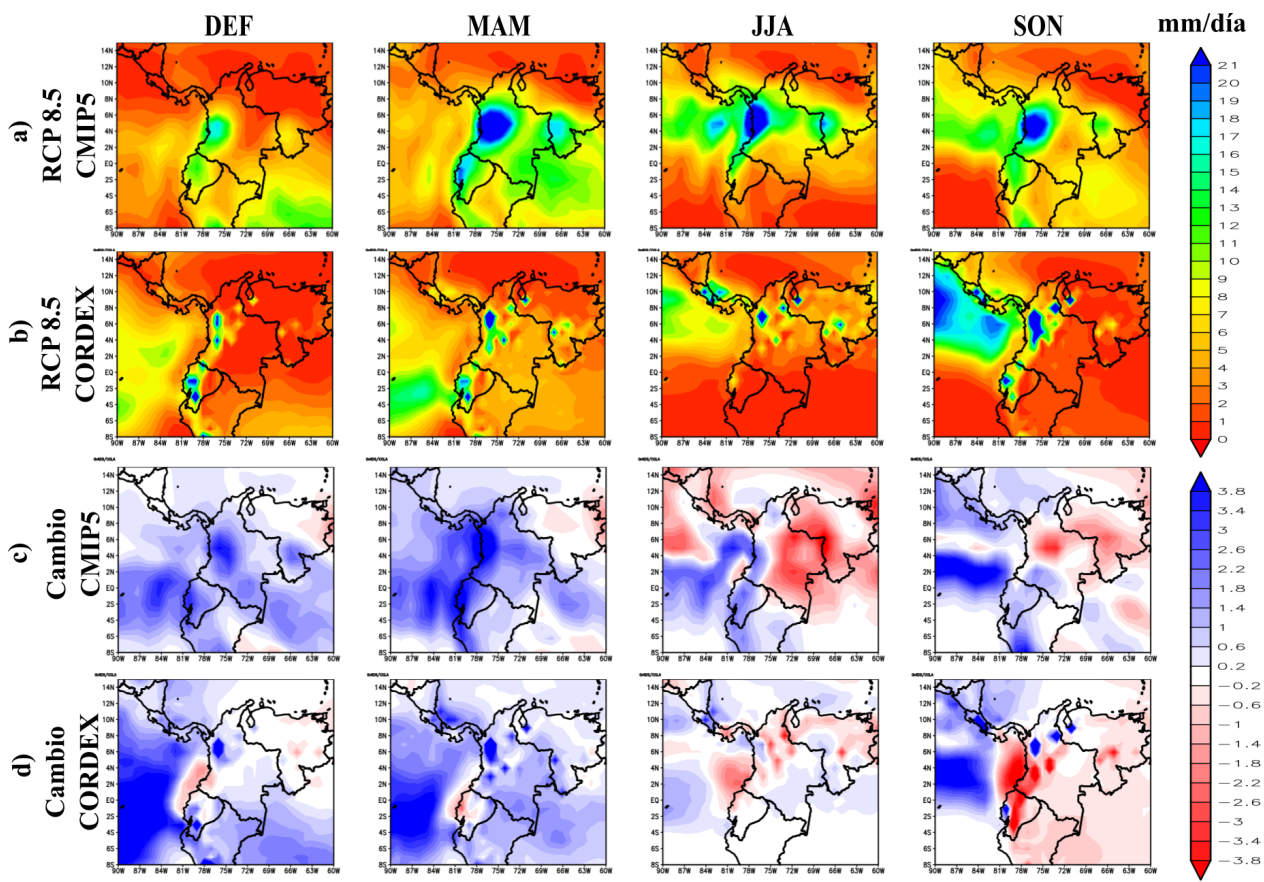


Figura D.3: Proyecciones de precipitación bajo el RCP 8.5 para el periodo 2071-2100 para el modelo MIROC5 CMIP5 a), su simulación CORDEX b) y sus cambios respecto al periodo histórico c) y d) respectivamente.

Anexo E

Comparación entre las Comunicaciones Nacionales de Colombia

Tabla E.1: Comparación entre Comunicaciones Nacionales de Colombia y el presente trabajo de grado.

Documento	Año de publicación	Período de observaciones	Datos de Observaciones	Período Clima presente	Modelo Clima presente	Período proyecciones	Escenarios utilizados	MCG	Reducción de escala
Segunda CNCC (IDEAM, 2010)	2010	1979-1998	Estaciones meteorológicas Ideam	1971-2000	Precis (con condiciones iniciales de ERA40)	2011-2100 y 2071-2100	A2, A2 (Sulfato), B2, B2 (Sulfato), A1B (S)	HadAM3P, ECHAM4, HasAM3Q	Dinámica Precis
				1979-1998	GCM-MRI (con condiciones iniciales de CCM3)	2080-2090	A1B	CCM3	Dinámica GCM-MRI
		No especificado	No especificado	1990	WRF(con condiciones iniciales de CAM)	2020-2100 (Cada 10 años)	A2	CAM	Dinámica WRF
Tercera CNCC (IDEAM y cols. 2015) (IDEAM y cols. 2017)	2017	1976-2005	Estaciones meteorológicas Ideam	1976-2005	Histórico de 20 modelos CMIP5 para temperatura y 15 para precipitación (ver tabla 1) .	2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100	RCPs 2.6, 4.5, 6.0, 8.5 (generados para cada estación meteorológica)	Proyecciones de 20 modelos CMIP5 para temperatura y 15 para precipitación (ver tabla 1)	Estadística
Trabajo de Grado	2021	1979-2005 (temperatura) y 1998-2005 (precipitación)	ERA5 (temperatura) y TRMM (precipitación)	1976-2005	<p>TM: Histórico de 20 modelos CMIP5 para temperatura y 15 para precipitación (ver tabla 1).</p> <p>MM: histórico de 6 modelos CMIP5 para temperatura y precipitación.</p> <p>Comparación CMIP5-CORDEX: histórico de 5 modelos para temperatura y 3 modelos para precipitación (ver tabla 1).</p>	2011-2100	2.6, 4.5, 6.0, 8.5	<p>TM: Proyecciones de 20 modelos CMIP5 para temperatura y 15 para precipitación (ver tabla 1).</p> <p>MM: proyecciones de 6 modelos CMIP5 para temperatura y precipitación.</p> <p>Comparación CMIP5-CORDEX: proyecciones de 5 modelos para temperatura y 3 modelos para precipitación (ver tabla 1).</p>	Dinámica CORDEX

Documento	Método de ensamble	Resultados proyecciones de temperatura					
		Periodo	RCP2.6	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5	Multiescenario
Segunda CNCC (IDEAM, 2010)	<p>Ensamble multimodelo para temperaturas mínima (T_{mín}) y máxima (T_{máx}).</p> <p>Ensamble multiescenario utilizando los resultados del modelo Precis para cada periodo considerado e incluyendo en el último el escenario A1B de GCM-MRI</p>	2011-2040	No aplica			Mayores aumentos en T _{máx} en zonas del Tolima, Cauca y Valle del Cauca (2-3°C) y de 1°C para la mayoría del territorio.	
		2041-2070	No aplica			Aumento de 2.4°C en promedio para todo el territorio.	
		2071-2100	No aplica			Aumentos T _{máx} en región Caribe y Andina (3-4°C); en Magdalena, Magdalena Medio y Catatumbo (>4°C); en río Sogamoso, sabana de Bogotá, noroeste de la Sierra Nevada de Santa Marta, cuenca del Cesar y cuenca del río Patía y regiones Orinoquía y Amazonas (2-4°C).	
Tercera CNCC (IDEAM y cols. 2015) (IDEAM y cols. 2017)	<p>Ensamble multimodelo: Promedio de Fiabilidad Conjunta REA: criterio de desempeño y criterio de convergencia.</p> <p>Precipitación: Espacialización de valores proyectados para los diferentes periodos y RCP y uso de SIG para hallar cambio en la precipitación. Interpolación con método EBK. Luego se relacionó la precipitación con la cobertura de la Tierra proporcionada por CORINE Land Cover. Luego se usó IDW para espacialización de diferencias de precipitación. Uso de Geostatistical Wizard para evaluar confiabilidad de la interpolación.</p> <p>Temperatura: Espacialización a partir de datos observados, uso de DEM30, regresión lineal, uso de SIG. Se espacializaron ambas variables sobre la orografía simulada a partir de 14 modelos CMIP5.</p> <p>Ensamble multiescenario: promedio de los cambios mostrados por los 4 RCP para cada periodo, y determinación de los valores mínimo y máximo obtenido entre los 4 RCP.</p>	2011-2040	Aumento de 1.0°C en T _{media} .			Aumentos de 0-1.2°C para todo el país	
		2041-2070	Aumento de alrededor de 1.0-1.5°C	1.0-2.0°C, mayores valores en Orinoquía y Cordillera de los Andes.	1.0-2.0°C, mayores valores en Orinoquía.	Aumento de 1.5-3.5°C, mayores valores en Orinoquía, Andina y Caribe.	0.5-2.0°C con valores más bajos sobre los Andes
		2071-2100	Aumento 0.5-1.5°C con mayores valores en regiones Orinoquía y Andina	1.5-3.5°C con máximos al este de la orinoquía y sobre los Andes	1.5-3.5°C con máximos sobre la orinoquía, seguido de la región Andina	Aumento de 2.0-5.0°C. Con máximos en la región Andina y al este del país.	Aumentos de hasta 3.0°C para todo el país excepto para los Andes donde el aumento es de 0.5-2.0°C
Trabajo de Grado	Ensamble multimodelo: interpolación bilineal.	2011-2040	Aumentos de hasta 1.6°C en todo el territorio (TM y MM)			1.2°C para todo el país (TM y MM)	
		2041-2070	Aumentos de 1.2-2.4°C con mayores valores distribuidos por todo el país en DEF (TM y MM)		Aumentos de hasta 3.6°C para todo el territorio y el año (TM y MM).	1.2-2.4°C (TM y MM)	
		2071-2100	0.8-1.6°C (TM) y 1.2-2.0°C (MM) para todo el país	2.0-3.2°C para todo el territorio (TM y MM)		3.2-4.0°C para las regiones Pacífico, Andina y Caribe (TM y MM), para la Orinoquía 3.2 hasta >5.2°C (TM) y hasta 4.8°C (MM) con mayores aumentos en DEF y SON y en la región amazónica aumentos de 3.6-4.8°C con máximos al sur durante JJA y SON (TM y MM).	2.0-3.2°C (TM y MM)

Documento	Resultados proyecciones de precipitación				
	RCP2.6	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5	Multiescenario
Segunda CNCC (IDEAM, 2010)	No aplica			Disminución de precipitación >= 10% en Córdoba, Antioquia, Caldas, Quindío, Risaralda, Tolima, Valle del Cauca, Cauca, Huila, Nariño y Putumayo.	
	No aplica			No especificado	
	No aplica			Reducciones cercanas al 15% en Huila, Putumayo, Nariño, Cauca, Tolima, Córdoba, Bolívar y Risaralda. Aumentos del 10% en el Chocó. Para este periodo y para el escenario A2 se estiman reducciones de hasta el 20 y 30% en la precipitación en Córdoba, Cauca, Bolívar, Caldas, Sucre, Valle, Antioquia, Nariño y Risaralda. Reducción de precipitación en zonas montañosas.	
Tercera CNCC (IDEAM y cols. 2015) (IDEAM y cols. 2017)	Aumentos del 10-40% en región Andina y disminuciones del 10-40% en regiones Caribe, Amazonía y Orinoquía.			Disminución de la precipitación del orden de 10-40% en regiones Caribe y Amazonía. Incrementos de 10-30% en centro y norte de la región Andina con mayores aumentos en el eje Cafetero, el Altiplano Cundiboyacense y la cuenca alta del río Cauca.	
	Aumentos del 10-40% en región Andina con intensificaciones sobre el Eje cafetero y el sur de la región Andina y disminuciones del 10-40% en regiones Caribe, Amazonía y Orinoquía.				
	Aumentos del 10-40% en región Andina con intensificaciones sobre el Eje Cafetero, Cordillera Occidental, Sabana de Bogotá y valle del Alto Magdalena y disminuciones del 10-40% en regiones Orinoquía, Caribe y Amazonía , siendo mayores en estas dos últimas.				
Trabajo de Grado	Aumentos de 0.6mm/día en la zona occidente y central del país para los 3 primeros trimestres del año en TM y para los dos primeros trimestres en MM. Ligeras disminuciones de -0.6 mm/día al occidente en SON en TM y en el último semestre del año para MM con mayor intensidad.	Aumentos de 0.6mm/día en DEF y JJA (TM) y disminuciones de -0.6mm/día en SON (MM).	Aumentos principalmente en DEF y JJA de 0.6mm/día (TM) y de hasta 1mm/día en DEF y MAM y disminuciones de -0.6mm/día en JJA y SON (MM).		Aumentos de 0.6mm/día en DEF y JJA (TM) y disminuciones de -0.6mm/día en SON (MM).
	Aumentos de hasta 1.4mm/día en los primeros 3 trimestres del año para la mayor parte del territorio con mayores valores en RCP8.5 y disminuciones de -0.6mm/día al norte (JJA) y este (SON) del país (TM y MM).			Aumentos de hasta 1.0mm/día en los primeros 3 trimestres del año para la mayor parte del territorio y disminuciones de -0.6mm/día al norte (JJA) y este (SON) del país (TM) y al occidente en MM.	
	Aumentos de 0.6mm/día (TM) y disminuciones de -0.6mm/día al occidente del país en SON (MM).	Aumentos de hasta 1.4mm/día siendo mayores sobre el Pacífico en JJA y disminuciones de -0.6 sobre el Caribe en JJA y sobre la Orinoquía en SON (TM y MM).	>2.6mm/día con mayor intensidad en JJA en la región Pacífica, disminuciones de hasta -1.8 el mismo trimestre sobre el Caribe y de hasta -1.4mm/día para la Orinoquía en JJA y SON (TM y MM).		Aumentos de hasta 1.4mm/día siendo mayores sobre el Pacífico en JJA y disminuciones de -0.6 sobre el Caribe en JJA y sobre la Orinoquía en SON (TM y MM).

Anexo F

Revisión de Comunicaciones Nacionales de otros países

Tabla F.1: Revisión de Comunicaciones Nacionales de otros países.

País	Documento	Fecha de publicación	Inventario GEI (Gg de CO ₂ eq.)	Escenarios utilizados	Observaciones	Período observaciones	Modelos	Períodos proyecciones	Reducción de escala	Ensamble multiescenario	Referencias
Alemania	Séptima CNCC	2017	901,932 (2015)	RCP 2.6, 4.5, 8.5 y SRES A1B	DWD/BfG-HYRAS-TAS	1951-2006	No especificado	2021-2050 y 2071-2100	Dinámica	No	(Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Building and Nuclear Safety (BMUB), 2017)
Argentina	Tercera CNCC	2015	429437,4 (2012)	RCP 4.5 y 8.5	No especificado	1961-1975	42 modelos CMIP5	2015-2039 y 2075-2099	Dinámica CLARIS-LP B y corrección estadística.	No	(Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación, 2015)
Australia	Séptima CNCC	2017	525600 (2015)	No especificado	No especificado	No especificado	40 modelos globales	2021-2040, 2041-2060, 2061-2080 y 2081-2100	Dinámica	No	(Commonwealth of Australia Department of the Environment and Energy, 2008)
Bolivia	Segunda CNCC	2009	85331,17 (2004)	A1B, A2 y B2	No especificado	No especificado	ECHAM4, Earth Simulator	2001-2030 y 2071-2100	Dinámica AIM, PRECIS	No	(Rada y cols. 2009)
Brasil	Cuarta CNCC	2020	1467000 (2016)	SWL1.5, SWL2 y SWL4	No especificado	No especificado	HadGEM2-ES, MIROC5, IPSL-CM5A-LR, GFDL-ESM2M, IPSL-CM5A-MR, MIROC-ESM-CHEM y ACCESS1-0 (CMIP5) y HadGEM3-A (CMIP6)	2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100	Dinámica Eta y HadGEM3-A	No	(Ministry of Science, Technology and Innovations, 2020)

País	Documento	Fecha de publicación	Inventario GEI (Gg de CO2 eq.)	Escenarios utilizados	Observaciones	Período observaciones	Modelos	Períodos proyecciones	Reducción de escala	Ensamble multiescenario	Referencias
Canadá	Séptima CNCC	2017	722000 (2015)	RCP 4.5	No especificado	No especificado	Modelos CMIP5	2046–2065 y 2081–2100	No	No	(Environnement et changement climatique Canada, 2017)
Chile	Tercera CNCC	2016	109908,8 (2013)	RCP2.6 y 8.5	Estaciones meteorológicas	No especificado	Modelos CMIP5	2031-2050	No	No	(Ministerio del Medio Ambiente, 2016)
				A1B	Estaciones meteorológicas	No especificado	Modelos CMIP3	2031-2050	Dinámica PRECIS-ECHAM5	No	
China	Tercera CNCC	2018	10544000 (2010)	RCP 2.6, 4.5 y 8.5	No especificado	No especificado	39 modelos globales	2046-2065 y 2081-2100	Dinámica	No	(Ministry of Ecology and Environment, 2018)
Cuba	Tercera CNCC	2020	50213,7 (2016)	RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 y SRESA1B	No especificado	No especificado	HadCM3, ECHAM5, HadGEM-ES	2021-2040, 2041-2060 y 2061-2080	Dinámica PRECIS	No	(Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente, 2020)
Ecuador	Tercera CNCC	2017	81 289,63 (2012)	RCP 2.6, 4.5, 6.0 y 8.5	Estaciones meteorológicas con 85% de integridad	1981-2005	42 modelos CMIP5, selección de 15 modelos y posteriormente 4 mejores modelos: GISS-E2-R, IPSL-CM5A-MR, CSIRO-Mk3-6-0 Y MIROC-ESM	2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100	Dinámica WRF	No	(Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2017)
EE.UU.	Sexta CNCC	2014	5797300 (2011)	No especificado	No especificado	No especificado	No especificado	No especificado	No especificado	No especificado	(U.S. Department of State, 2014)

País	Documento	Fecha de publicación	Inventario GEI (Gg de CO2 eq.)	Escenarios utilizados	Observaciones	Período observaciones	Modelos	Períodos proyecciones	Reducción de escala	Ensamble multiescenario	Referencias
Egipto	Tercera CNCC	2016	247970 (2005)	SRES A2 y B1	No especificado	No especificado	11 modelos de circulación global	2010-2039, 2040-2069 y 2070-2099	Dinámica	No	(Egyptian Environmental Affairs Agency, 2016)
El Salvador	Tercera CNCC	2018	20394,9 (2014)	RCP 2.6, 4.5, 6.0 y 8.5	Estaciones con 85% de datos y ERA-20CM	1961-1999	MRI-CGCM3, HadGEM2-AO, MIROC5, GFDL-CM3, CSIRO-Mk3-6-0,	2021-2050 y 2071-2100	Estadística	No	(Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2018)
España	Séptima CNCC	2017	335662 (2015)	RCPy SRES	No especificado	No especificado	CMIP5 y CORDEX	No especificado	Dinámica CORDEX	No	(Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, 2017)
Etiopía	Segunda CNCC	2015	146160 (2013)	RCP 2.6, 4.5, 6.0 y 8.5	No especificado	No especificado	CCCM, GFDL, UKMO-89 y GFDL-Transient	2016-2035, 2046-2065 y 2081-2100	No	No	(Ministry of Environment and Forest, 2015)
Finlandia	Séptima CNCC	2017	55600 (2015)	RCP 4.5 y 8.5	No especificado	No especificado	Ensamble multimodelo de 28 MCG	2025-2085, 2070-2099	No	No	(Ministry of the Environment and Statistics Finland, 2017)
Francia	Séptima CNCC	2017	457100 (2015)	No especificado	No especificado	No especificado	No especificado	No especificado	No especificado	No especificado	(Ministère de la Transition Écologique et Solidaire, 2017)

País	Documento	Fecha de publicación	Inventario GEI (Gg de CO2 eq.)	Escenarios utilizados	Observaciones	Período observaciones	Modelos	Períodos proyecciones	Reducción de escala	Ensamble multiescenario	Referencias
Ghana	Cuarta CNCC	2020	42200 (2016)	RCP 2.6 y 8.5	Estaciones meteorológicas con 85% de integridad	1980-2014	MPI-ESM-LR, CNRM-CM5, GFDL-ESM2G, CM5A-LR y MIROC5	2015-2040, 2041-2060 y 2061-2080	Estadística y Dinámica SMHI, REMO y CORDEX	No	(Environmental Protection Agency, 2020)
India	Segunda CNCC	2012	1523777,44 (2000)	SRES A1B	No especificado	No especificado	HadAM3H	2011-2040, 2041-2070 y 2071-2098	Dinámica PRECIS	No	(Ministry of Environment & Forests Government of India, 2012)
Japón	Séptima CNCC	2017	1324700 (2015)	RCP 2.6, 4.5, 6.0, 8.5 y SRES A1B	No especificado	No especificado	MRI-AGCM3.2S, MRI-AGCM3.2H	2016-2035, 2076-2095 y 2080-2100 (diferentes investigaciones)	Dinámica NHRCM	No especificado	(The Government of Japan, 2017)
Madagascar	Tercera CNCC	2017	151671,7 (2010)	MAGICC-S CENGEN	No especificado	No especificado	HadCM3, CSIRO MK.0, ECHAM5/MPI-O	2025, 2050, 2075, 2100	No	No	(Ministère de l'Environnement, de l'Écologie et des Forêts, 2017)

País	Documento	Fecha de publicación	Inventario GEI (Gg de CO2 eq.)	Escenarios utilizados	Observaciones	Período observaciones	Modelos	Períodos proyecciones	Reducción de escala	Ensamble multiescenario	Referencias
México	Sexta CNCC	2018	699564,3 (2015)	RCP 4.5 y 8.5	Era-Interim (para modelos regionales)	No especificado	BBC-CSM1, CanESM, CNRM-CM5, CSIRO-Mk3, GDFL-CM3, GISS-E2-R, HADGEM2-ES, INM, IPSL-CM5A LR, MIROC-ESM, MIROC-ESM-CHEM, MIROC5, MPI-ESM-LR, MRI CGCM3 y NCC-NorESM1	2015-2039, 2045-2069 y 2075-2099	Estadística y dinámica RegCM-4.6.0	No	(Semarnat e Inecc, 2018)
Noruega	Séptima CNCC	2018	53900 (2015)	RCP 4.5 y 8.5	No especificado	1900-2014	10 simulaciones de MCR	2031-2061y 2071-2100	Estadística y dinámica	No	(Norwegian Ministry of Climate and Environment, 2018)
Palestina	Primera CNCC	2016	3226,3	RCP 2.6 y 6.0	No especificado	No especificado	No especificado	2016-2035, 2046-2065 y 2081-2100	CORDEX	No	(Environment Quality Authority, 2016)
Paraguay	Tercera CNCC	2017	183607,37 (2012)	RCP 4.5 y 8.5 (AR5)	Datos del CRU (Climatic Research Unit)	1961-1990	Eta_HadGEM2-ES	2011-2020, 2021-2030, 2031-2040 y 2041-2050	Dinámica Eta	No	(SEAM/PNUD/FMAM, 2017)
				A2 y B2 (AR4)	No especificado	1961-1990	PRECIS	2010-2039, 2040-2069 y 2070-2100.	Dinámica PRECIS	No	

País	Documento	Fecha de publicación	Inventario GEI (Gg de CO2 eq.)	Escenarios utilizados	Observaciones	Período observaciones	Modelos	Períodos proyecciones	Reducción de escala	Ensamble multiescenario	Referencias
Perú	Tercera CNCC	2016	171310 (2012)	RCP 4.5 y 8.5	Estaciones meteorológicas	1971-2000	CanESM2, CNRM-CM5 y MPI-ESM-MR	2036-2065	Estadística para escenario nacional y dinámica WRF y Eta para escenarios regionales	No	(Ministerio del Ambiente, 2016)
Somalia	Primera CNCC	2018	62920 (2015)	RCP 2.6, 4.5 y 8.5	No especificado	1950 – 2005	MPI-ESM-LR y CORDEX	2006-2035, 2016-2045, 2036-2065 y 2055-2085	Dinámica RCA4 CORDEX	No	(Office of the Prime Minister, the Federal Republic of Somalia, 2018)
Sri Lanka	Segunda CNCC	2011	18842,95 (2000)	A1FI, A2 y B1	No especificado	No especificado	HadCM3, CSIRO y CGCM	2050 y 2100	No	No	(Climate Change Secretariat, Ministry of Environment, 2011)
Sudáfrica	Tercera CNCC	2018	539100 (2012)	RCP 4.5	No especificado	No especificado	No especificado	2046-2065 y 2080-2099	Estadística y dinámica	No especificado	(Department of Environmental Affairs Republic of South Africa, 2018)
Suecia	Séptima CNCC	2017	53700 (2015)	RCP 4.5 y 8.5	No especificado	No especificado	9 MCG	2071-2100	Sí	No	(The Swedish Environmental Protection Agency, 2017)

País	Documento	Fecha de publicación	Inventario GEI (Gg de CO2 eq.)	Escenarios utilizados	Observaciones	Período observaciones	Modelos	Períodos proyecciones	Reducción de escala	Ensamble multiescenario	Referencias
Tailandia	Tercera CNCC	2018	318662 (2013)	RCP 2.6, 4.5 y 8.5	No especificado	No especificado	IPSL-CM5A-MR, GFDL-CM3 y MRI-CGCM3	2016 – 2045 y 2071 – 2100	Estadística	No	(Ministry of Natural Resources and Environment, 2018)
Turquía	Séptima CNCC	2018	496070 (2016)	RCP 4.5 y 8.5	CRU, UDEL, UDEL-C, GSMs RAW DATA	1971-2000	HadGEM2-ES, GFDL-ES-M2M, MPI-ESM-MR	2016-2040, 2041-2070 y 2071-2099.	Dinámica RegCM3.4.	No	(Republic of Turkey Ministry of Environment and Urbanization, 2018)
Unión Europea	Séptima CNCC	2017	4307968 (2015)	RCP 4.5 y 8.5	No especificado	No especificado	Simulaciones de Circulación Global y Regional del proyecto EURO-CORDEX	2071-2100	Dinámica	No	(European Commission, 2017)
Uruguay	Quinta CNCC	2019	24492,4 (2016)	SSP245, SSP370 y SSP585	No especificado	No especificado	EC_Earth3, EC_Earth3-Veg, CAMS, CanESM5 y MRI_ESM5 (CMIP6)	2020-2044 y 2075-2099	No	No	(Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente (MVOTMA) de la República Oriental del Uruguay, 2019)
Venezuela	Segunda CNCC	2017	243380 (2010)	RCP 4.5 y 8.5 (AR5)	Estaciones nacionales.	No especificado	Eta_HadGEM2 y Eta_MIROC5	2016-2045, 2046-2075 y 2080-2099	Dinámica Eta	No	(Benítez Torres y cols. 2017)

Referencias

- Allen, M.R., O.P. Dube, W. Solecki, F. Aragón-Durand, W. Cramer, S. Humphreys, ... K. Zickfeld (2018). Framing and Context. En *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. ([Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. In Press)
- Bao, Y., Song, Z., y Qiao, F. (2020). FIO-ESM Version 2.0: Model Description and Evaluation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 125(6), e2019JC016036. Descargado 2021-01-21, de <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2019JC016036> (_eprint: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2019JC016036>) doi: <https://doi.org/10.1029/2019JC016036>
- Bedoya-Soto, J. M., Aristizábal, E., Carmona, A. M., y Poveda, G. (2019). Seasonal Shift of the Diurnal Cycle of Rainfall Over Medellín's Valley, Central Andes of Colombia (1998–2005). *Frontiers in Earth Science*, 7. Descargado 2021-01-08, de <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/feart.2019.00092/full> (Publisher: Frontiers) doi: 10.3389/feart.2019.00092
- Bentsen, M., Bethke, I., Debernard, J. B., Iversen, T., Kirkevåg, A., Seland, O., ... Kristjánsson, J. E. (2012, septiembre). The Norwegian Earth System Model, NorESM1-M - Part 1: Description and basic evaluation. *Geoscientific Model Development Discussions*, 5, 2843–2931. Descargado 2021-01-21, de <http://adsabs.harvard.edu/abs/2012GMDD...5.2843B> doi: 10.5194/gmdd-5-2843-2012
- Benítez Torres, M. E., de Educación Ambiental (Venezuela), F. (Venezuela), I. F. L., Venezuela, y on Climate Change (Organization), U. N. F. C. (Eds.). (2017). *Venezuela Segunda comunicación nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Caracas, Venezuela: Fundambiente : PNUD : Fundación IFLA Instituto Forestal Latinoamericano : MINEA Ministerio del Poder Popular para Ecosocialismo y Aguas. (OCLC: on1038280175)
- Bonilla-Ovallos, C. A., y Sánchez, O. J. M. (2017, marzo). Validación de la precipitación estimada por modelos climáticos acoplados del proyecto de intercomparación CMIP5 en Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 41(158), 107–118. Descargado 2021-01-17, de <https://raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/427> (Number: 158) doi: 10.18257/raccefyn.427

- Bruckner, M. (2012, junio). Climate change vulnerability and the identification of least developed countries. *United Nations, Department of Economics and Social Affairs*. Descargado 2021-01-14, de <https://ideas.repec.org/p/une/cpaper/015.html> (Publication Title: CDP Background Papers)
- Climate Change Secretariat, Ministry of Environment. (2011). *Sri Lanka's Second National Communication on Climate Change*. Descargado de www.climatechange.lk
- CMNUCC. (1997). *CONVENCIÓN MARCO DE LAS NACIONES UNIDAS SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO*.
- CMNUCC. (2003). *INFORME DE LA CONFERENCIA DE LAS PARTES SOBRE SU OCTAVO PERÍODO DE SESIONES, CELEBRADO EN NUEVA DELHI DEL 23 DE OCTUBRE AL 1° DE NOVIEMBRE DE 2002*.
- CMNUCC. (2007). *UNITING ON CLIMATE*. Descargado de https://unfccc.int/resource/docs/publications/unitingonclimate_eng.pdf
- CMNUCC. (2012). *Informe de la Conferencia de las Partes sobre su 17° período de sesiones, celebrado en Durban del 28 de noviembre al 11 de diciembre de 2011*.
- Commonwealth of Australia (Department of the Environment and Energy). (2008). *Australia's 7th National Communication on Climate Change*. Supervising Scientist.
- del Medio Ambiente, M. (2016). *Tercera comunicación Nacional de Chile ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre cambio climático*. Santiago de Chile: Ministerio de Medio Ambiente. (OCLC: 1041454709)
- Department of Environmental Affairs Republic of South Africa. (2018). *South Africa's Third National Communication Under the United Nations Framework Convention on Climate Change*.
- Dufresne, J.-L., Foujols, M.-A., Denvil, S., Caubel, A., Marti, O., Aumont, O., ... Vuichard, N. (2013, mayo). Climate change projections using the IPSL-CM5 Earth System Model: from CMIP3 to CMIP5. *Climate Dynamics*, 40(9), 2123–2165. Descargado 2021-01-21, de <https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-012-1636-1> (Company: Springer Distributor: Springer Institution: Springer Label: Springer Number: 9 Publisher: Springer-Verlag) doi: 10.1007/s00382-012-1636-1
- Dunne, J. P., John, J. G., Adcroft, A. J., Griffies, S. M., Hallberg, R. W., Shevliakova, E., ... Zadeh, N. (2012, octubre). GFDL's ESM2 Global Coupled Climate–Carbon Earth System Models. Part I: Physical Formulation and Baseline Simulation Characteristics. *Journal of Climate*, 25(19), 6646–6665. Descargado 2021-01-21, de <https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/25/19/jcli-d-11-00560.1.xml> (Publisher: American Meteorological Society Section: Journal of Climate) doi: 10.1175/JCLI-D-11-00560.1
- Egyptian Environmental Affairs Agency. (2016). *Egypt Third National Communication Under the United Nations Framework Convention on Climate Change*.
- Environment Quality Authority (EQA). (2016). *Initial National Communication Report to the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC)*.
- Environmental Protection Agency (EPA). (2020). *Ghana's Fourth National Communication to the United Nations Framework Convention on Climate Change*.
- Environnement et changement climatique Canada. (2017). *7e communication nationale sur les changements climatiques et 3e rapport biennal du Canada*. Descargado 2020-12-04, de http://epe.lac-bac.gc.ca/100/201/301/weekly_acquisitions_list-ef/2018/18-50/publications.gc.ca/collections/collection_2018/eccc/

- En4-73-2017-fra.pdf (OCLC: 1080313316)
- European Commission. (2017). *7th National Communication & 3rd Biennial Report from the European Union under the UN Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) (required under the UNFCCC and the Kyoto Protocol)*.
- Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Building and Nuclear Safety (BMUB). (2017). *Germany's Seventh National Communication on Climate Change*. BMUB, Unit KI I 1.
- Gent, P. R., Danabasoglu, G., Donner, L. J., Holland, M. M., Hunke, E. C., Jayne, S. R., ... Zhang, M. (2011, octubre). The Community Climate System Model Version 4. *Journal of Climate*, 24(19), 4973–4991. Descargado 2021-01-21, de <https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/24/19/2011jcli4083.1.xml> (Publisher: American Meteorological Society Section: Journal of Climate) doi: 10.1175/2011JCLI4083.1
- Gettelman, A., y Rood, R. B. (2016). *Demystifying Climate Models* (Vol. 2). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. Descargado 2021-01-07, de <http://link.springer.com/10.1007/978-3-662-48959-8> doi: 10.1007/978-3-662-48959-8
- Giorgi, F., y Gutowski, W. J. (2015). Regional Dynamical Downscaling and the CORDEX Initiative. *Annual Review of Environment and Resources*, 40(1), 467–490. Descargado 2021-01-06, de <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102014-021217> (eprint: <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102014-021217>) doi: 10.1146/annurev-environ-102014-021217
- Giraldo Gómez, L., Mejía Fernández, F., y Zambrano Nájera, J. (2018). Sistema Integrado de Monitoreo Ambiental de Caldas – Simac. , 9.
- Gutowski, W. J., Ullrich, P. A., Hall, A., Leung, L. R., O'Brien, T. A., Patricola, C. M., ... Zarzycki, C. (2020, mayo). The Ongoing Need for High-Resolution Regional Climate Models: Process Understanding and Stakeholder Information. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 101(5), E664–E683. Descargado 2021-01-12, de <https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/101/5/bams-d-19-0113.1.xml> (Publisher: American Meteorological Society Section: Bulletin of the American Meteorological Society) doi: 10.1175/BAMS-D-19-0113.1
- Hoegh-Guldberg, O., Jacob, D., Taylor, M., Bindi, M., Brown, S., Camilloni, I., ... Sherstyukov, B. (2018). Impacts of 1.5°C of Global Warming on Natural and Human Systems. , 138.
- Hoogewind, K. A., Baldwin, M. E., y Trapp, R. J. (2017, diciembre). The Impact of Climate Change on Hazardous Convective Weather in the United States: Insight from High-Resolution Dynamical Downscaling. *Journal of Climate*, 30(24), 10081–10100. Descargado 2021-01-21, de <https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/30/24/jcli-d-16-0885.1.xml> (Publisher: American Meteorological Society Section: Journal of Climate) doi: 10.1175/JCLI-D-16-0885.1
- IDEAM. (2001). *Colombia Primera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*.
- IDEAM. (2010). *República de Colombia Segunda Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático*.
- IDEAM, PNUD, MADS, DNP, y CANCELLEERÍA. (2015a). *Escenarios de Cambio Climático para Precipitación y Temperatura para Colombia 2011-2100 Herramientas Científicas para la Toma de Decisiones – Estudio Técnico Completo: Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático*.

- IDEAM, PNUD, MADS, DNP, y CANCELLEERÍA. (2015b). *Nuevos Escenarios de Cambio Climático para Colombia 2011-2100 Herramientas Científicas para la Toma de Decisiones – Enfoque Nacional – Departamental: Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático.*
- IDEAM, PNUD, MADS, DNP, y CANCELLEERÍA. (2017). *Tercera Comunicación Nacional De Colombia a La Convención Marco De Las Naciones Unidas Sobre Cambio Climático (CMNUCC).* Bogotá D.C., Colombia. (Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático. IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLEERÍA, FMAM)
- Intergovernmental Panel on Climate Change, Intergovernmental Panel on Climate Change, y Working Group III. (2000). *Escenario de emisiones: resumen para responsables de políticas.* Ginebra: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (OCLC: 428317719)
- IPCC. (1990). *Climate Change The IPCC Scientific Assessment.* Descargado de https://www.nrel.colostate.edu/assets/nrel_files/labs/ryan-lab/pubs/Melillo_et_al_1990_IPCC1_WG1.PDF
- IPCC. (2000). *Special report on emissions scenarios: a special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Nebojsa Nakicenovic y Rob Swart, Eds.). Cambridge ; New York: Cambridge University Press. (OCLC: ocm44652561)
- IPCC. (2013). *Ficha informativa del IPCC: ¿Qué es el IPCC?* Descargado de https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/04/FS_what_ipcc_es.pdf
- IPCC. (2014). *Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)].* Descargado de www.ipcc.ch (IPCC, Ginebra, Suiza)
- IPCC. (2018). Summary for Policymakers. En *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty.* ([Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. In Press.)
- Jaramillo-Robledo, A., y Chaves-Córdoba, B. (2000). DISTRIBUCIÓN DE LA PRECIPITACIÓN EN COLOMBIA ANALIZADA MEDIANTE CONGLOMERACIÓN ESTADÍSTICA. , 12.
- Kjellström, E., Barring, L., Nikulin, G., Nilsson, C., Persson, G., y Strandberg, G. (2016, septiembre). Production and use of regional climate model projections – A Swedish perspective on building climate services. *Climate Services*, 2-3, 15–29. Descargado 2020-06-30, de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405880716300334> doi: 10.1016/j.cliser.2016.06.004
- Knutti, R., Furrer, R., Tebaldi, C., Cermak, J., y Meehl, G. A. (2010, mayo). Challenges in Combining Projections from Multiple Climate Models. *Journal of Climate*, 23(10), 2739–2758. Descargado 2021-01-15, de <https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/23/10/2009jcli3361.1.xml> (Publisher: American Meteorological Society Section: Journal of Climate) doi: 10.1175/2009JCLI3361.1
- Kumar, P., Sarthi, P. P., Kumar, S., Barat, A., y Sinha, A. K. (2020, febrero). Evaluation of CORDEX-RCMS and their driving GCMs of CMIP5 in simulation of Indian summer monsoon rainfall and its future projections. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(5), 225.

- Descargado 2020-06-30, de <https://doi.org/10.1007/s12517-020-5081-x> doi: 10.1007/s12517-020-5081-x
- Lewis, S. L., y Maslin, M. A. (2015, marzo). Defining the Anthropocene. *Nature*, 519(7542), 171–180. Descargado 2021-01-17, de <https://www.nature.com/articles/nature14258> (Number: 7542 Publisher: Nature Publishing Group) doi: 10.1038/nature14258
- Martin, T. H. D. T. G. M., Bellouin, N., Collins, W. J., Culverwell, I. D., Halloran, P. R., Hardiman, S. C., ... Wiltshire, A. (2011, septiembre). The HadGEM2 family of Met Office Unified Model climate configurations. *Geoscientific Model Development*, 4(3), 723–757. Descargado 2021-01-21, de <https://gmd.copernicus.org/articles/4/723/2011/gmd-4-723-2011.html> (Publisher: Copernicus GmbH) doi: <https://doi.org/10.5194/gmd-4-723-2011>
- Martinez, J. A., Arias, P. A., Castro, C., Chang, H.-I., y Ochoa-Moya, C. A. (2019). Sea surface temperature-related response of precipitation in northern South America according to a WRF multi-decadal simulation. *International Journal of Climatology*, 39(4), 2136–2155. Descargado 2021-01-14, de <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/joc.5940> (_eprint: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/joc.5940>) doi: <https://doi.org/10.1002/joc.5940>
- Masui, T., Matsumoto, K., Hijioka, Y., Kinoshita, T., Nozawa, T., Ishiwatari, S., ... Kainuma, M. (2011, noviembre). An emission pathway for stabilization at 6 Wm⁻² radiative forcing. *Climatic Change*, 109(1-2), 59–76. Descargado 2020-08-05, de <http://link.springer.com/10.1007/s10584-011-0150-5> doi: 10.1007/s10584-011-0150-5
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017). *Política Nacional de Cambio Climático*. (Bogotá, D. C.: Colombia.)
- Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente. (2020). *Cuba Tercera Comunicación Nacional a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático* (Citmatel ed.). La Habana.
- Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2018). *Tercera Comunicación de Cambio Climático de El Salvador*. Descargado de www.marn.gob.sv
- Ministerio del Ambiente. (2016). *El Perú y el Cambio Climático Tercera Comunicación Nacional del Perú a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático*. (Lima, Perú)
- Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2017). *Tercera Comunicación Nacional del Ecuador a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*.
- Ministerio de Agricultura y Pesca, A. y. M. A. (2017). *Séptima Comunicación Nacional de España Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*.
- Ministerio de Vivienda, O. T. y. M. A. M. d. I. R. O. d. U. (2019). *Uruguay Quinta Comunicación Nacional a la Conferencia de las Partes en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*.
- Ministry of Ecology and Environment. (2018). *The People's Republic of China Third National Communication on Climate Change*.
- Ministry of Environment & Forests Government of India. (2012). *India Second National Communication to the United Nations Framework Convention on Climate Change*.
- Ministry of Environment and Forest. (2015). *Ethiopia's Second National Communication to the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC)*.

- Ministry of Natural Resources and Environment. (2018). *Thailand's Third National Communication to the United Nations Framework Convention on Climate Change*.
- Ministry of Science, Technology and Innovations. (2020). *Fourth National Communication of Brazil to the UNFCCC*.
- Ministry of the Environment and Statistics Finland. (2017). *Finland's Seventh National Communication under the United Nations Framework Convention on Climate Change*. (Helsinki. 314 p.)
- Ministère de la Transition Écologique et Solidaire. (2017). *Septième communication nationale de la France Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques*.
- Ministère de l'Environnement, d. l. e. d. F. (2017). *Troisième Communication Nationale à la Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique*.
- Navarro-Monterroza, E., Arias, P. A., y Vieira, S. C. (2019, marzo). El Niño-Oscilación del Sur, fase Modoki, y sus efectos en la variabilidad espacio-temporal de la precipitación en Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 43(166), 120–132. Descargado 2021-01-14, de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0370-39082019000100120&lng=en&nrm=iso&tlng=es doi: 10.18257/raccefyn.704
- Norwegian Ministry of Climate and Environment. (2018). *Norway's Seventh National Communication Under the Framework Convention on Climate Change*.
- NU. (2015). *Acuerdo de París*.
- Office of the Prime Minister, the Federal Republic of Somalia. (2018). *The Initial National Communication of Somalia to the United Nations Framework Convention on Climate Change*.
- Oglesby, R., Rowe, C., Grunwaldt, A., Ferreira, I., Ruiz, F., Campbell, J., ... Perez, J. (2016, mayo). A High-Resolution Modeling Strategy to Assess Impacts of Climate Change for Mesoamerica and the Caribbean. *American Journal of Climate Change*, 5(2), 202–228. Descargado 2021-01-14, de <http://www.scirp.org/Journal/Paperabs.aspx?paperid=67596> (Number: 2 Publisher: Scientific Research Publishing) doi: 10.4236/ajcc.2016.52019
- Ortega, G., Arias, P. A., y Villegas, J. C. (2019). *Present-day and future climate in the Neotropics according to CMIP5 models* (Tesis de Master no publicada). Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
- Ortega, G., Arias, P. A., Villegas, J. C., Marquet, P., y Nobre, P. (2020). Present-day and future climate over Central and South America according to CMIP5/CMIP6 models. *International Journal of Climatology, in revision.*
- Pabón-Caicedo, J. D., Eslava-Ramírez, J. A., y Gómez-Torres, R. E. (2001). Generalidades de la distribución espacial y temporal de la temperatura del aire y de la precipitación en Colombia. *Meteorología Colombiana*, 4, 47–59. (Bogotá, D.C. – Colombia)
- Patt, A. G., Tadross, M., Nussbaumer, P., Asante, K., Metzger, M., Rafael, J., ... Brundrit, G. (2010, enero). Estimating least-developed countries' vulnerability to climate-related extreme events over the next 50 years. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(4), 1333–1337. Descargado 2021-01-14, de <https://www.pnas.org/content/107/4/1333> (Publisher: National Academy of Sciences Section: Social Sciences) doi: 10.1073/pnas.0910253107
- Posada-Marín, J. A., Rendón, A. M., Salazar, J. F., Mejía, J. F., y Villegas, J. C. (2019, marzo). WRF

- downscaling improves ERA-Interim representation of precipitation around a tropical Andean valley during El Niño: implications for GCM-scale simulation of precipitation over complex terrain. *Climate Dynamics*, 52(5), 3609–3629. Descargado 2021-01-12, de <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4403-0> doi: 10.1007/s00382-018-4403-0
- Poveda, G. (2004, enero). La hidroclimatología de Colombia: Una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diurna. *Rev. Acad. Colomb. Cienc*, 28, 201–222.
- Poveda, G., Jaramillo, L., y Vallejo, L. F. (2014). Seasonal precipitation patterns along pathways of South American low-level jets and aerial rivers. *Water Resources Research*, 50(1), 98–118. Descargado 2021-01-14, de <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/2013WR014087> (_eprint: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/2013WR014087>) doi: <https://doi.org/10.1002/2013WR014087>
- Poveda, G., y Mesa, O. (1999, enero). La Corriente de Chorro Superficial del Oeste (“del CHOCÓ”) y otras dos corrientes de chorro atmosféricas sobre Colombia: Climatología y Variabilidad durante las fases del ENSO. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales*, 23, 517–528.
- Poveda, G., y Mesa, O. J. (2000). On the existence of Lloró (the rainiest locality on Earth): Enhanced ocean-land-atmosphere interaction by a low-level jet. *Geophysical Research Letters*, 27(11), 1675–1678. Descargado 2021-01-14, de <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/1999GL006091> (_eprint: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/1999GL006091>) doi: <https://doi.org/10.1029/1999GL006091>
- Poveda, G., Mesa, O. J., Salazar, L. F., Arias, P. A., Moreno, H. A., Vieira, S. C., ... Alvarez, J. F. (2005, enero). The Diurnal Cycle of Precipitation in the Tropical Andes of Colombia. *Monthly Weather Review*, 133(1), 228–240. Descargado 2021-01-14, de <https://journals.ametsoc.org/view/journals/mwre/133/1/mwr-2853.1.xml> (Publisher: American Meteorological Society Section: Monthly Weather Review) doi: 10.1175/MWR-2853.1
- Rada, O. P., Romero, M., Pinto, M., Apaza, E., y Mantilla, R. (2009). *Segunda Comunicación Nacional del Estado Plurinacional de Bolivia ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*.
- Republic of Turkey Ministry of Environment and Urbanization. (2018). *Seventh National Communication of Turkey under the UNFCCC*.
- Riahi, K., Rao, S., Krey, V., Cho, C., Chirkov, V., Fischer, G., ... Rafaj, P. (2011, noviembre). RCP 8.5—A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. *Climatic Change*, 109(1-2), 33–57. Descargado 2020-08-05, de <http://link.springer.com/10.1007/s10584-011-0149-y> doi: 10.1007/s10584-011-0149-y
- Rogelj, J., Shindell, D., Jiang, K., Fifita, S., Forster, P., Ginzburg, V., ... Schaeffer, R. (s.f.). Mitigation Pathways Compatible with 1.5°C in the Context of Sustainable Development. , 82.
- Roncancio, D., Cutter, S., y Nardocci, A. (2020, noviembre). Social vulnerability in Colombia. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 50, 101872. Descargado 2021-01-14, de <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212420920313741> doi: 10.1016/j.ijdr.2020.101872
- S. Watanabe, T. Hajima, K. Sudo, T. Nagashima, T. Takemura, H. Okajima, ... M. Kawami-

- ya (2011). MIROC-ESM 2010: model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments.
- Schmidt, G. A., Kelley, M., Nazarenko, L., Ruedy, R., Russell, G. L., Aleinov, I., ... Zhang, J. (2014). Configuration and assessment of the GISS ModelE2 contributions to the CMIP5 archive. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 6(1), 141–184. Descargado 2021-01-21, de <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/2013MS000265> (eprint: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/2013MS000265>) doi: <https://doi.org/10.1002/2013MS000265>
- Schwalm, C. R., Glendon, S., y Duffy, P. B. (2020, agosto). RCP8.5 tracks cumulative CO₂ emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 202007117. Descargado 2020-08-06, de <http://www.pnas.org/lookup/doi/10.1073/pnas.2007117117> doi: 10.1073/pnas.2007117117
- SEAM/PNUD/FMAM. (2017). *Tercera Comunicación Nacional de Paraguay a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. (Proyecto TCN e IBA. Asunción, Py. 532P)
- Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación. (2015). *Tercera Comunicación Nacional de la República Argentina a la Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre Cambio Climático*.
- (Semarnat) Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, y (Inecc) Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2018). México, Sexta Comunicación Nacional y Segundo Informe Bienal de Actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Descargado 2021-01-14, de <http://cambioclimatico.gob.mx:8080/xmlui/handle/publicaciones/117> (Accepted: 2018-11-30T23:36:05Z)
- Sierra, J., Arias, P., y Vieira, S. (2016). *Sobre la representación de la precipitación en el norte de Suramérica por los modelos del CMIP5*. (Journal Abbreviation: SOCIEDAD COLOMBIANA DE INGENIEROS XXII SEMINARIO NACIONAL DE HIDRÁULICA E HIDROLOGÍA Publication Title: SOCIEDAD COLOMBIANA DE INGENIEROS XXII SEMINARIO NACIONAL DE HIDRÁULICA E HIDROLOGÍA)
- The Government of Japan. (2017). *Japan's Seventh National Communication under the United Nations Framework Convention on Climate Change*.
- The Swedish Environmental Protection Agency. (2017). *Sweden's Seventh National Communication on Climate Change*. Descargado de www.naturvardsverket.se (Naturvårdsverket, SE-106 48 Stockholm, Sweden)
- Thomson, A. M., Calvin, K. V., Smith, S. J., Kyle, G. P., Volke, A., Patel, P., ... Edmonds, J. A. (2011, noviembre). RCP4.5: a pathway for stabilization of radiative forcing by 2100. *Climatic Change*, 109(1-2), 77–94. Descargado 2020-08-05, de <http://link.springer.com/10.1007/s10584-011-0151-4> doi: 10.1007/s10584-011-0151-4
- Tjiputra, J. F., Roelandt, C., Bentsen, M., Lawrence, D. M., Lorentzen, T., Schwinger, J., ... Heinze, C. (2013, marzo). Evaluation of the carbon cycle components in the Norwegian Earth System Model (NorESM). *Geoscientific Model Development*, 6(2), 301–325. Descargado 2021-01-21, de <https://gmd.copernicus.org/articles/6/301/2013/> doi: 10.5194/gmd-6-301-2013
- U.S. Department of State. (2014). *United States Climate Action Report 2014*. Descargado de <http://www.state.gov/e/oes/rls/rpts/car6/index.htm>
- Vallejo-Bernal, S. M., Urrea, V., Bedolla-Soto, J. M., Posada, D., Olarte, A., Cárdenas-Posso, Y.,

- ... Poveda, G. (2021). Ground Validation of TRMM 3B43 V7 Precipitation Estimates over Colombia. Part I: Monthly and Seasonal Timescales. *International Journal of Climatology*, 1(41), 601–624. doi: 10.1002/joc.6640
- Van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., ... Rose, S. K. (2011, agosto). The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*, 109(1), 5. Descargado 2021-01-05, de <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z> doi: 10.1007/s10584-011-0148-z
- Van Vuuren, D. P., Stehfest, E., den Elzen, M. G. J., Kram, T., van Vliet, J., Deetman, S., ... van Ruijven, B. (2011, noviembre). RCP2.6: exploring the possibility to keep global mean temperature increase below 2°C. *Climatic Change*, 109(1-2), 95–116. Descargado 2020-08-05, de <http://link.springer.com/10.1007/s10584-011-0152-3> doi: 10.1007/s10584-011-0152-3
- Wang, L., Liu, X., y Brown, H. (2017, diciembre). Prediction of the impacts of climate change on energy consumption for a medium-size office building with two climate models. *Energy and Buildings*, 157, 218–226. Descargado 2021-01-21, de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778817300312> doi: 10.1016/j.enbuild.2017.01.007
- Wang, Y., Leung, L. R., McGREGOR, J. L., Lee, D.-K., Wang, W.-C., Ding, Y., y Kimura, F. (2004). Regional Climate Modeling: Progress, Challenges, and Prospects. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 82(6), 1599–1628. Descargado 2021-01-07, de https://www.jstage.jst.go.jp/article/jmsj/82/6/82_6_1599/_article doi: 10.2151/jmsj.82.1599
- Watanabe, M., Suzuki, T., O'ishi, R., Komuro, Y., Watanabe, S., Emori, S., ... Kimoto, M. (2010, diciembre). Improved Climate Simulation by MIROC5: Mean States, Variability, and Climate Sensitivity. *Journal of Climate*, 23(23), 6312–6335. Descargado 2021-01-21, de <https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/23/23/2010jcli3679.1.xml> (Publisher: American Meteorological Society Section: Journal of Climate) doi: 10.1175/2010JCLI3679.1
- Wu, T., Li, W., Ji, J., Xin, X., Li, L., Wang, Z., ... Zhang, J. (2013). Global carbon budgets simulated by the Beijing Climate Center Climate System Model for the last century. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(10), 4326–4347. Descargado 2021-01-21, de <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/jgrd.50320> (eprint: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/jgrd.50320>) doi: <https://doi.org/10.1002/jgrd.50320>
- Wu, T., Song, L., Li, W., Wang, Z., Zhang, H., Xin, X., ... Zhou, M. (2014, febrero). An overview of BCC climate system model development and application for climate change studies. *Journal of Meteorological Research*, 28(1), 34–56. Descargado 2021-01-21, de <https://link.springer.com/article/10.1007/s13351-014-3041-7> (Company: Springer Distributor: Springer Institution: Springer Label: Springer Number: 1 Publisher: The Chinese Meteorological Society) doi: 10.1007/s13351-014-3041-7
- Yin, L., Fu, R., Shevliakova, E., y Dickinson, R. E. (2012, diciembre). How well can CMIP5 simulate precipitation and its controlling processes over tropical South America? *Climate Dynamics*, 41(11-12), 3127–3143. Descargado 2021-01-17, de <http://link.springer.com/10.1007/s00382-012-1582-y> doi: 10.1007/s00382-012-1582-y
- Yukimoto, S., Adachi, Y., Hosaka, M., Sakami, T., Yoshimura, H., Hirabara, M., ... Kitoh, A.

- (2012). A New Global Climate Model of the Meteorological Research Institute: MRI-CGCM3 —Model Description and Basic Performance—. . 2, 90A, 23–64. doi: 10.2151/jmsj.2012-A02
- Zhang, D.-F., Han, Z.-Y., y Shi, Y. (2017, diciembre). Comparison of climate projections between driving CSIRO-Mk3.6.0 and downscaling simulation of RegCM4.4 over China. *Advances in Climate Change Research*, 8(4), 245–255. Descargado 2021-01-21, de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674927817300928> doi: 10.1016/j.accre.2017.10.001