



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**TRANSPORTE DE HUMEDAD ATMOSFÉRICA HACIA EL
NORTE DE SURAMÉRICA Y LA CUENCA DEL AMAZONAS
BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO**

Autora

María Lizeth Rendón Hurtado

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Medellín, Colombia

2021



Transporte de humedad atmosférica hacia el norte de Suramérica y la cuenca del Amazonas bajo escenarios de cambio climático

María Lizeth Rendón Hurtado

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería Ambiental

Directores:

Paola Andrea Arias Gómez, PhD &

J. Alejandro Martínez Agudelo, PhD.

Línea de Investigación:

Modelación Ambiental – Cambio Climático

Grupo de Investigación:

El Grupo de Investigación en Ingeniería y Gestión Ambiental – GIGA

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Medellín, Colombia

2021

Tabla de contenido

Resumen	4
Introducción.....	6
Marco teórico y estado del arte.....	8
Datos y metodología	14
Descripción de las bases de datos y modelos CMIP5 utilizados.....	14
Estimación del transporte de humedad atmosférica mediante el modelo DRM	16
Datos de entrada para el modelo DRM.....	20
Región de estudio	21
Salidas generales del modelo DRM	22
Metodología por capítulos.....	23
1. Capítulo I.....	26
1.1. Introducción.....	26
1.2. Resultados y análisis	26
1.3. Discusión y conclusiones.....	56
2. Capítulo II.....	59
2.1. Introducción.....	59
2.2. Resultados y análisis	60
2.3. Discusión y conclusiones.....	88
3. Capítulo III.....	99
3.1. Introducción.....	99
3.2. Resultados y análisis	100
3.3. Discusión y conclusiones.....	142
4. Capítulo IV.....	146
Apéndice A.....	152
Apéndice B.....	155
Agradecimientos.....	161
Referencias	162

Resumen

El cambio climático ha condicionado el desarrollo de los países alrededor del mundo. El norte de Suramérica y la cuenca del Amazonas se encuentran entre las regiones más vulnerables ante este fenómeno, según el quinto informe del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (Magrin et al., 2014). Uno de los mayores impactos generados por este fenómeno es la inestabilidad en la seguridad hídrica. La disponibilidad hídrica de estas regiones se encuentra determinada por complejos factores, como el transporte de humedad atmosférica desde regiones oceánicas y continentales, el cual está asociado con la circulación atmosférica de mayor escala pero también con la disponibilidad de vapor de agua en la atmósfera, que está condicionada en parte por el proceso de evaporación desde fuentes de agua y la transpiración desde la vegetación. Es por esto, que el análisis del transporte de humedad atmosférica bajo efectos y forzamientos de cambio climático es un tema totalmente relevante.

Este estudio analiza los cambios proyectados para finales del siglo XXI, bajo escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), del reciclaje y del transporte de humedad atmosférica hacia tres regiones estratégicas ubicadas en Suramérica: el norte de Suramérica, el norte del Amazonas y el sur del Amazonas. Los estimados de transporte y reciclaje de humedad se obtuvieron a partir de las proyecciones de 11 modelos de circulación general de la quinta fase del Proyecto de Comparación de Modelos Acoplados (CMIP5), bajo el escenario extremo RCP8.5 y a través de la implementación del modelo analítico semi-lagrangiano *Dynamic Recycling Model* (DRM), que, derivado de la ecuación de conservación de masa y utilizando datos de evaporación, precipitación, agua precipitable y vientos, proporciona estimados de transporte y reciclaje de humedad atmosférica.

Nuestros resultados sugieren aumentos de agua precipitable sobre todas las regiones estudiadas e incrementos de evaporación oceánica para finales del siglo XXI. Pese al aumento de vapor de agua disponible en la atmósfera, los modelos proyectan cambios heterogéneos espacialmente en la precipitación. Además, sobre las tres regiones de interés se proyectan disminuciones en cantidad y contribución del reciclaje de la precipitación (i.e. proveniente de humedad evaporada in situ) para finales de siglo respecto al periodo histórico, durante todas las temporadas. Las proyecciones de disminución en la cantidad de reciclaje de precipitación para las tres regiones de interés son mucho más marcadas durante las dos últimas temporadas del año (Junio a Agosto (JJA) y Septiembre a Noviembre (SON)), con valores diferentes entre regiones: 20% y 21% en el norte de Suramérica, 25% y 27% en el norte del Amazonas, y 40% y 31% en el sur del Amazonas, para JJA y SON, respectivamente. Incluso, los porcentajes de acuerdo entre los modelos CMIP5 para los cambios de reciclaje de precipitación durante estas dos temporadas son mayores que para el resto del año. En cuanto al transporte de humedad atmosférica desde otras regiones del dominio de estudio hacia las tres regiones de interés, se encuentra que el océano Atlántico Tropical Sur aumentará sus contribuciones en determinadas temporadas del año para finales del siglo XXI. Lo anterior podría estar relacionado con el fenómeno de expansión del cinturón tropical evidenciado y analizado por múltiples investigaciones durante las últimas décadas. Se destaca además, que las proyecciones para finales de siglo analizadas en este estudio indican una reducción marcada en el reciclaje de agua precipitable y precipitación sobre el Sur del Amazonas, principalmente durante la transición entre la temporada seca y la temporada lluviosa (SON). Múltiples líneas de evidencia muestran que la región del Amazonas viene experimentando una temporada seca de mayor duración durante las últimas décadas, así como una reducción de precipitación durante la temporada de transición a las lluvias (Septiembre a Noviembre). Más aún, análisis de proyecciones climáticas

sugieren que, en asociación con incrementos de concentraciones atmosféricas de GEI, la temporada seca en esta región podría seguirse extendiendo e intensificando. Nuestros resultados contribuyen a entender los mecanismos que pueden dar lugar a las disminuciones de precipitación y el alargamiento de la temporada seca en una región que ha experimentado grandes intervenciones antrópicas, no solo por los efectos de los aumentos de emisiones de GEI, sino también de los cambios de uso de suelo asociados a la deforestación.

Introducción

El cambio climático es una de las problemáticas socioambientales de mayor relevancia a nivel mundial. En particular, Colombia ha sido identificado como uno de los países con mayor vulnerabilidad ante este fenómeno, según el quinto informe del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC por sus iniciales en inglés) (Magrin et al., 2014). La disponibilidad de recursos hídricos en Colombia está determinada, principalmente, por la ubicación geográfica de su territorio, las condiciones orográficas y la influencia de la zona de convergencia intertropical (ZCIT) (González, 2018). La humedad atmosférica transportada desde diferentes regiones, tanto oceánicas como continentales, también determina esta disponibilidad. La matriz energética en Colombia se compone en más de dos terceras partes por la generación de energía hidroeléctrica, por lo que es altamente dependiente de dicha disponibilidad hídrica, especialmente del régimen de lluvias que provee los embalses en el centro del país entre Abril - Mayo y Septiembre - Noviembre (Montes, 2018), y de la humedad atmosférica transportada desde otras regiones.

Si bien los efectos del cambio climático sobre la disponibilidad del recurso hídrico en Suramérica han sido objeto de estudio desde hace varias décadas, es necesario continuar avanzando en la comprensión de las dinámicas asociadas a este fenómeno y sus posibles consecuencias en la disponibilidad de recursos naturales, la prestación de servicios ecosistémicos y las dinámicas sociales de la región. El IPCC ha publicado datos concretos que evidencian tendencias observadas en América del Sur, identificando aumentos en los extremos de temperatura en la mayor parte de las regiones tropicales y subtropicales (Magrin et al., 2014). En cuanto a las proyecciones, se estima que sobre Suramérica tropical, al este de los Andes, se observarán aumentos en los períodos de temporadas secas, así como incrementos en la cantidad de días y noches cálidas en la mayoría de la región para finales del siglo XXI (Magrin et al., 2014). Además de las proyecciones que sugiere el IPCC, son muchos los estudios que centran su atención en los cambios observados durante las últimas décadas sobre los Andes (Pabón-Caicedo et al., 2020). El acuerdo generalizado de todos estos sugiere el aumento de la temperatura y el aumento en la cantidad de días y noches cálidos, así como la disminución de noches y días fríos, sobre el oeste de América del Sur (Pabón-Caicedo et al., 2020). Algunos de los estudios que no se evalúan en el quinto informe del IPCC también reportan tendencias de dichos cambios sobre diferentes zonas de los Andes, entre ellos Carmona & Poveda (2014), Castino et al. (2017), Lavado et al. (2013), Marengo et al. (2012), Morán-Tejeda et al. (2016), Pabón-Caicedo (2012), Seiler et al. (2013a, 2013b), Skansi et al. (2013), y Vuille et al. (2015). Se destaca además que, aunque existe una señal clara de aumento de temperatura sobre los Andes, no ocurre lo mismo con la precipitación, ya que esta última variable exhibe cambios diferenciados por zonas (Pabón-Caicedo et al., 2020).

En este sentido, la comunidad científica local ha realizado diversos estudios sobre los efectos del cambio climático sobre la región, particularmente en Colombia, siendo cada vez más las investigaciones enfocadas en el análisis de las proyecciones de cambio climático recopiladas por el IPCC y cuyos resultados se vienen divulgando en revistas internacionales de alto impacto (p.e. Palomino-Lemus et al., 2017; Ruiz et al., 2008; Sierra et al., 2015, 2018). Dentro de los hallazgos más puntuales en cuanto a las proyecciones climáticas sobre Colombia se identifica el aumento de las precipitaciones al noroeste del país y disminución sobre sus Andes nororientales (Schoolmeester et al., 2016). En cuanto a las proyecciones de temperaturas para Colombia, estudios como el de Pabón-Caicedo (2012), el cual realiza un proceso de reducción de escala con métodos estadísticos de las proyecciones provenientes de modelos de escala global, sugieren que se presentarán incrementos paulatinos de temperatura a

nivel nacional de 3 a 4°C para finales del siglo XXI, teniendo los valles del Magdalena y del Cauca un calentamiento mayor (Pabón-Caicedo, 2012).

A pesar de todo lo anterior, es necesario generar más conocimiento científico y tecnológico a nivel regional en búsqueda de una mayor comprensión sobre la influencia de este fenómeno de escala global en la disponibilidad de recursos naturales y servicios ecosistémicos a escala local y regional, contribuyendo al diseño e implementación de estrategias de mitigación y adaptación. Es así como con este Trabajo de Investigación se pretende avanzar en el tema, aportando un mayor conocimiento sobre los efectos del cambio climático sobre la disponibilidad del recurso hídrico, específicamente sobre el transporte de humedad atmosférica hacia el norte de Suramérica y otras regiones estratégicas, como es el caso de la cuenca del Amazonas. La pregunta que orienta este estudio es entonces: ¿Cómo podría verse afectado el transporte de humedad atmosférica hacia el norte de Suramérica y otras regiones de interés como el Amazonas bajo escenarios de cambio climático?

Así, este documento se encuentra dividido en cuatro capítulos: En el Capítulo I se analiza cómo las variables atmosféricas de entrada al modelo *Dynamic Recycling Model* (DRM) son representadas (tanto en simulaciones históricas como en proyecciones) por 11 modelos de la quinta fase del Proyecto de Comparación de Modelos Acoplados (CMIP5) con respecto al reanálisis climático ERA5; en el Capítulo II se analiza el transporte de humedad atmosférica estimado a partir de las simulaciones de los 11 modelos CMIP5 y del reanálisis ERA5 para el clima presente (1980-2005); en el Capítulo III se analizan los resultados de las proyecciones de transporte de humedad atmosférica para finales del siglo XXI (2070-2100) estimados a partir de los 11 modelos CMIP5 considerados bajo el escenario extremo RCP8.5; finalmente, el Capítulo IV discute las principales conclusiones de este trabajo, así como perspectivas de trabajo futuro.

Marco teórico y estado del arte

La comprensión de los efectos del cambio climático en la naturaleza e intensidad del ciclo hidrológico y su variabilidad en el tiempo es una de las principales tareas que enfrenta la humanidad. Los flujos de agua entre los océanos, la atmósfera y los reservorios terrestres, son elementos complejos del sistema climático global (Levang & Schmitt, 2015). El vapor de agua representa solo alrededor del 0,25% de la masa total de la atmósfera (Gimeno et al., 2012). A pesar de esta pequeña proporción, el vapor de agua tiene un papel fundamental en la conexión de reservas como océanos, ríos, suelos, etc., por medio del transporte de humedad, la evapotranspiración y la precipitación (Gimeno et al., 2012). La mayor parte del vapor de agua se genera en los océanos, donde la evaporación excede la precipitación (Trenberth et al., 2011), permitiendo que una parte de la humedad sea transportada atmosféricamente hacia los continentes, logrando influir en los procesos hidrológicos terrestres y generando impactos directos sobre las poblaciones humanas (Levang & Schmitt, 2015; Oki, 2006). Sin embargo, el agua que ingresa a la atmósfera continental en forma de vapor desde las superficies oceánicas no es la única fuente de humedad atmosférica. A nivel regional, la evapotranspiración que ocurre en zonas con vegetación es un aporte fundamental para alimentar el ciclo hidrológico y el transporte de la humedad hacia otras regiones (Marengo et al., 2004). Regionalmente, el Amazonas posee una gran importancia en cuanto a su capacidad para regular el ciclo hidrológico y el clima debido a que alberga grandes extensiones de selva tropical húmeda virgen (Aragão et al., 2014; IPCC, 2013; Nobre, 2014; Weng et al., 2018). Su afluencia hídrica y su ciclo hidrológico proporcionan vapor de agua a la atmósfera que circula regional y globalmente, aportando a la precipitación originada dentro y fuera de ella (Arraut et al., 2012; A. Drumond et al., 2014; IPCC, 2013; Marengo et al., 2004; Nobre et al., 2016; Sampaio et al., 2018; Spracklen & Garcia-Carreras, 2015; Zemp et al., 2014). En general, el ciclo hidrológico se puede describir como la evaporación de humedad y su precipitación, controlada y equilibrada por el transporte atmosférico, oceánico, y subterráneo del agua (Gimeno et al., 2012). Es así como la gran dependencia de la sociedad actual hacia los recursos de agua dulce ha generado la necesidad de comprender el ciclo hidrológico bajo escenarios de cambio climático actual y futuro (IPCC, 2013; Trenberth et al., 2011). Entender este ciclo, y en particular el transporte de humedad atmosférica, no es trivial.

El vapor de agua juega un papel decisivo sobre el clima del todo el planeta (IPCC, 2013). Los escenarios de cambio climático sugieren aumentos en la temperatura global, lo que a su vez provocará una mayor sensibilidad de la presión de vapor de saturación, intensificando el ciclo hidrológico, con mayores tasas de evaporación y precipitación en un mundo más cálido (Held & Soden, 2006). Respecto al futuro del Amazonas, los modelos climáticos sugieren proyecciones desalentadoras. Dichos modelos muestran, por lo general, proyecciones de reducción de precipitación al este de la región durante todos los meses del año, además de estaciones secas más largas al sur de la cuenca (Boisier et al., 2015; Fu et al., 2013; IPCC, 2014; Longo et al., 2018; Malhi et al., 2008; Marengo et al., 2018; Sena & Magnusdottir, 2020), lo cual elevaría el riesgo de sequías y de incendios intensos (Marengo et al., 2018). También se proyecta una disminución de las lluvias durante la transición entre la temporada seca y la temporada lluviosa en el Amazonas (Agosto a Octubre) para finales del siglo XXI, la cual podría variar entre 40% y 55% (Marengo et al., 2018). De acuerdo con los resultados de los modelos CMIP5, se proyecta un calentamiento de 6°C, aproximadamente, sobre la cuenca del Amazonas para finales del siglo XXI (bajo el escenario RCP8.5) (Marengo et al., 2018), pudiendo ser incluso mayor al sur y al este de la región (Marengo et al., 2018). En particular, el Quinto Informe (AR5) del IPCC indica una alta vulnerabilidad de la

hidrología del norte de Suramérica ante el cambio climático y los cambios de cobertura sobre el Amazonas (Magrin et al., 2014).

Se ha demostrado que las variables climáticas en la Amazonía están estrechamente relacionadas con las características de su superficie terrestre (Costa & Pires, 2010), por lo que aumentos en la temperatura de la atmósfera y el suelo en la región, podrían estar relacionados con el cambio de cobertura de la selva tropical (Lejeune et al., 2015; Medvigy et al., 2011; Nobre et al., 1991; Sampaio et al., 2007), afectando de esta manera su capacidad reguladora del clima. Estudios como el de Pires & Costa (2013), quienes analizaron por medio de simulaciones con modelos regionales cómo cambios en la cobertura en la cuenca del Amazonas pueden influir en el bioclima regional, concluyen que la humedad atmosférica se podría ver gravemente afectada por dichos cambios, especialmente la precipitación, como consecuencia de la variación en los componentes del balance de humedad, como la evapotranspiración y la convergencia de humedad (Pires & Costa, 2013). Otros estudios que soportan esta conclusión son Alves et al. (2017), Haghtalab et al. (2020), Lejeune et al. (2015), Llopart et al. (2018), Malhi et al. (2008), Ruiz-Vásquez et al. (2020), Spracklen et al. (2012) y Spracklen & Garcia-Carreras (2015), entre otros. Particularmente, Spracklen & Garcia-Carreras (2015) concluyeron, por medio de simulaciones de deforestación, que más del 90% de estas coinciden en que la deforestación tiene un influencia directa sobre la precipitación regional y que en general, dicha deforestación conduce a reducciones de lluvia (Spracklen & Garcia-Carreras, 2015). Estos autores encuentran que, en el año 2010, la deforestación logró reducir las lluvias medias anuales de la cuenca en $1.8 + 0.3\%$ debido a una reducción en el reciclaje de humedad atmosférica (Spracklen & Garcia-Carreras, 2015). El uso del suelo para expansión de la agricultura es una de las principales amenazas para el Amazonas, conduciendo a incrementos en las temperaturas superficiales y a la disminución de la evaporación y la precipitación (Sampaio et al., 2007). Las reducciones de flujos de calor latente, debidas a la disminución de evaporación, y aumentos de flujos de calor sensible hacen que la atmósfera sobre la superficie eleve considerablemente sus temperaturas. Lo anterior es identificado en el estudio de Llopart et al. (2018), quienes encontraron aumentos de hasta 2.5°C sobre áreas que se encuentran deforestadas sobre la selva Amazónica (Llopart et al., 2018; Ruiz-Vásquez et al., 2020).

Además del impacto que el cambio del uso del suelo puede generar sobre el clima de esta región boscosa, existe un gran acuerdo en que la deforestación sobre el Amazonas podría generar cambios en el transporte de humedad atmosférica desde esta hacia diferentes regiones en Suramérica. Diversos estudios sugieren que cambios en la cobertura vegetal del Amazonas pueden afectar el transporte de humedad atmosférica hacia el norte de Suramérica (Molina et al., 2019; Ruiz-Vásquez et al., 2020). Las interacciones suelo-atmósfera, y en especial el reciclaje de precipitación, dependen en gran medida de la presencia de bosques (Coe et al., 2009; Costa & Pires, 2010; Lawrence & Vandecar, 2015; Lima et al., 2014; Makarieva et al., 2013; Makarieva & Gorshkov, 2007; Salazar et al., 2018; Spracklen & Garcia-Carreras, 2015; Stickler et al., 2013; Zemp et al., 2017), y estas interacciones a su vez, regulan los flujos de humedad, como por ejemplo los flujos fluviales de la cuenca (Salazar et al., 2018). Es decir, la retroalimentación entre la vegetación y la atmósfera es un elemento clave para el entendimiento del funcionamiento del clima local y regional (Zemp et al., 2017).

La ubicación geográfica del norte de Suramérica favorece el transporte de grandes cantidades de humedad atmosférica hacia su interior desde ambos hemisferios, con grandes variaciones estacionales (Gimeno et al., 2012), provenientes, especialmente, del Océano Atlántico, el Océano Pacífico, el Mar Caribe y la cuenca del Amazonas (Arias, Martínez, et al., 2015; Hoyos et al., 2018; Poveda et al., 2014; Sakamoto et al., 2011). Estudios

demuestran que cerca del 50% del vapor de agua que ingresa al norte de Suramérica proviene del Mar Caribe y del Océano Atlántico, mientras que el 10% se genera mediante el reciclaje de humedad en la cuenca del Magdalena, además del transporte desde el norte de la cuenca del Amazonas (Arias, Martínez, et al., 2015; Hoyos et al., 2018). Particularmente, la cuenca del Amazonas aporta vapor de agua que luego es transportado por los vientos alisios que ingresan a la región (Agudelo et al., 2019; Arias, Martínez, et al., 2015; Hoyos et al., 2018).

Sin embargo, estas fuentes de humedad son diferentes durante todo el año. Por ejemplo, Sakamoto et al. (2011) analizaron, por medio de un enfoque Lagrangiano, las principales fuentes de humedad hacia el oeste de Colombia, encontrando que durante la temporada Diciembre a Febrero (DEF) se observa mayor transporte desde el Mar Caribe y el Atlántico Tropical Norte, posiblemente como resultado de la circulación de los vientos alisios cargados de humedad y el contraste de temperatura continente-oceano sobre el norte de Suramérica (Sakamoto et al., 2011). Por su parte, para las temporadas Marzo a Mayo (MAM) y Septiembre a Noviembre (SON), el Atlántico es la principal fuente de humedad, mientras que para la temporada Junio a Agosto (JJA), el posicionamiento de la ZCIT tiene una gran influencia sobre la humedad que se transporta desde el Atlántico Tropical hacia la Amazonía (Hoyos et al., 2018; Sakamoto et al., 2011).

Estas fuentes de humedad pueden verse afectadas bajo la ocurrencia de eventos El Niño y La Niña. Por ejemplo, el estudio realizado por Arias et al. (2015) considera un análisis sobre las principales fuentes de humedad durante la temporada anómala de lluvias sobre el norte de Suramérica ocurrida entre los años 2010 y 2012, asociada a la ocurrencia de dos eventos La Niña de gran magnitud. En dicho estudio, se identifica que las principales fuentes de humedad hacia la región para ambos eventos La Niña fueron el Océano Pacífico, el Mar Caribe y el Atlántico Tropical, resaltando que las contribuciones locales también fueron importantes durante esta temporada (Arias, Martínez, et al., 2015). Lo anterior resalta que el transporte de humedad atmosférica hacia nuestra región puede presentar una variabilidad interanual, influenciada por eventos como El Niño y La Niña, los cuales pueden alterar dicho transporte (Hoyos et al., 2019; Ruiz Vásquez et al., 2018). Múltiples estudios identifican que el fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) es un importante modo de variabilidad natural de la precipitación en el norte de Suramérica, particularmente Colombia (Arias, Martínez, et al., 2015; Bedoya-Soto et al., 2019; Cai et al., 2020; Hoyos et al., 2018; Navarro Monterroza et al., 2017; Poveda, 2004; Poveda et al., 2001, 2011; Poveda & Mesa, 1999, 1996), además, las fuentes de humedad oceánicas y continentales también se ven afectadas según la ocurrencia de las diferentes fases de dicho fenómeno (Ruiz Vásquez et al., 2018).

En la Figura 1 se muestran las principales fuentes de humedad para el norte de Suramérica identificadas en diferentes estudios (Arias, Martínez, et al., 2015; Hoyos et al., 2018; Sakamoto et al., 2011). Se evidencia cómo para cada temporada del año, las fuentes de humedad varían en función de las dinámicas ecoclimáticas regionales. Particularmente, el norte de la Amazonía tiene un aporte significativo hacia la región durante la temporada JJA.

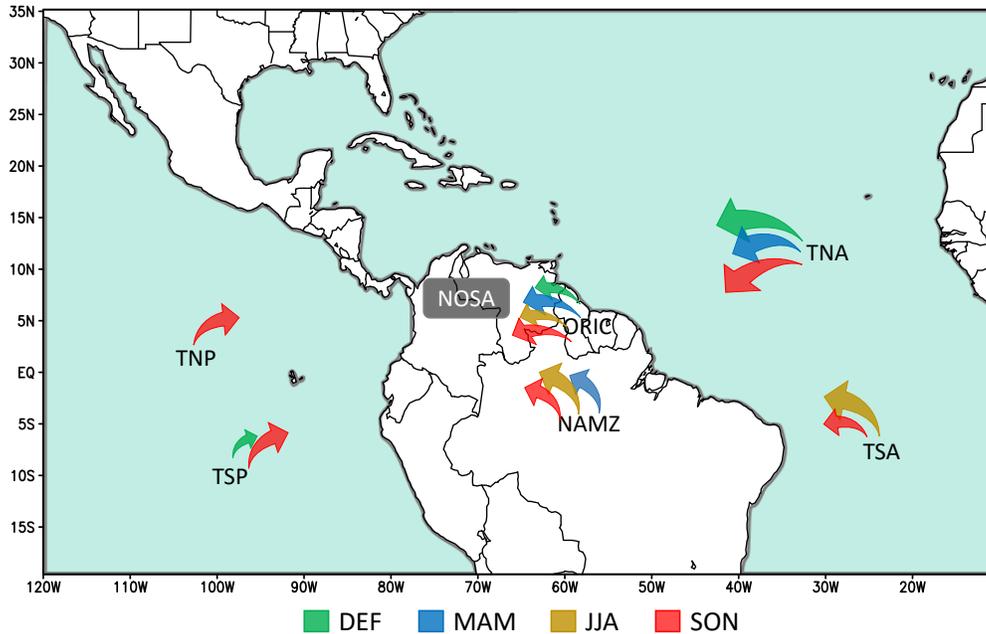


Figura 1. Principales fuentes de humedad atmosférica hacia el norte de Suramérica. Los colores indican la temporada del año en la que se observa el transporte.

Diversos estudios han evidenciado una mayor duración de la temporada seca en el sur del Amazonas durante las últimas tres décadas (Arias, Fu, et al., 2015; Debortoli et al., 2015; Espinoza et al., 2019; Fu et al., 2013; Pabón-Caicedo et al., 2020), generando modificaciones en el transporte de humedad atmosférica hacia el norte de Suramérica (Agudelo et al., 2019). Esta mayor duración en la temporada seca está asociada en parte a reducciones en la cobertura del bosque Amazónico (Alves et al., 2017; Costa & Pires, 2010; Ruiz-Vásquez et al., 2020) que generan un menor reciclaje de humedad en esta región y a alteraciones en la celda de Hadley en el norte de Suramérica, favoreciendo el transporte de humedad desde el Océano Atlántico y el Mar Caribe hacia dicha región (Agudelo et al., 2019; Arias, Martínez, et al., 2015; Espinoza et al., 2019; Ruiz-Vásquez et al., 2020). En particular, este patrón de cambios se intensifica durante los años en los que la temporada seca del sur del Amazonas presenta una mayor duración (Agudelo et al., 2019; Arias, Martínez, et al., 2015). La Figura 2 resume estos resultados.

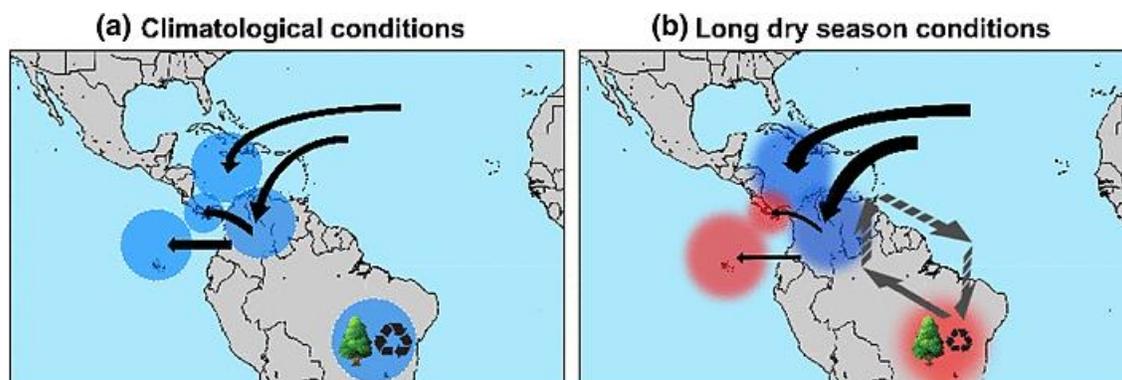


Figura 2. Cambios en el transporte de humedad sobre el norte de Suramérica y el Amazonas durante temporadas secas largas en el sur del Amazonas. Tomado de Agudelo et al. (2019).

Aunque se han realizado investigaciones enfocadas en el transporte de humedad atmosférica sobre el norte de Suramérica y el Amazonas, cómo dicho transporte puede verse modificado bajo condiciones de cambio climático ha sido poco explorado. Sobre otras regiones del planeta se han realizado estudios, principalmente sobre cómo algunas variables climatológicas, como temperatura, precipitación y evaporación, podrán cambiar para el futuro, según los modelos del IPCC. Por ejemplo, Liu y Allan (2013) concluyen que la precipitación a futuro podría tener un comportamiento en el que las regiones húmedas serán cada vez más húmedas y las secas cada vez más secas bajo efectos de cambio climático. Los eventos extremos relacionados con la precipitación también han sido de interés (Liu & Allan, 2013). Así Kharin et al. (2013), Sillmann et al. (2013), Toreti et al. (2013), Chen et al. (2014), Polade et al. (2014), entre otros autores, han llegado a la conclusión de que los eventos extremos de precipitación serán cada vez más frecuentes y con mayores magnitudes alrededor de globo (Trenberth et al., 2015). Para el norte de Suramérica, los modelos sugieren cambios de precipitación heterogéneos espacialmente, con mayores tasas de lluvia al noroeste de Colombia y disminuciones al noreste (Pabón-Caicedo et al., 2020). Además, se sugieren aumentos de temperatura sobre la región, principalmente durante las temporadas más secas (Barkhordarian et al., 2018).

Sin embargo, son escasos los estudios que están dedicados a comprender variables como el transporte de humedad atmosférica para el futuro bajo escenarios de cambio climático. Trabajos como los de Lavers et al. (2013), Laíné et al. (2014), Warner et al. (2015), Lavers et al. (2015) han estudiado el comportamiento del transporte de vapor de agua para algunos lugares del globo, bajo escenarios de cambio climático con modelos CMIP5. Lavers et al. (2013) estudian los cambios futuros en el comportamiento de los ríos atmosféricos en Gran Bretaña y sus implicaciones sobre las inundaciones de esta región, principalmente en invierno (Lavers et al., 2013). Sus resultados sugieren que el cambio a futuro de los ríos atmosféricos sobre esta región es una respuesta al forzamiento radiativo, proyectándose mayor transporte de humedad atmosférica, lo que implica además un mayor riesgo de inundaciones durante invierno en Gran Bretaña (Lavers et al., 2013). Por su parte, Warner et al. (2015) estudian cambios en los ríos atmosféricos de invierno a lo largo de la costa oeste de Norteamérica en los modelos climáticos CMIP5 (Warner et al., 2015), tanto para simulaciones históricas como para proyecciones para finales del siglo XXI, bajo un escenario extremo de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) (Warner et al., 2015). Los resultados de esta investigación sugieren que el transporte de vapor de agua en Norteamérica aumentará para el futuro (Warner et al., 2015). Lavers et al. (2015) encuentran un resultado similar por medio del

análisis del transporte horizontal de vapor de agua bajo efectos del cambio climático empleando modelos CMIP5, corroborando el aumento de este transporte a nivel global, principalmente en las altas latitudes del hemisferio norte, donde se observa una señal robusta de aumento de precipitación tanto en el presente como en proyecciones para finales del siglo XXI (Lavers et al., 2015).

Son pocos los estudios que se han centrado en comprender cómo podrá verse modificado el transporte de humedad atmosférica en el norte de Suramérica debido al incremento de emisiones atmosféricas de GEI. La diversidad de fuentes de humedad hacia esta región y su dependencia de las dinámicas ecoclimáticas a nivel regional, sugieren que es necesario avanzar en el conocimiento y en la identificación de posibles efectos de este fenómeno y su relación sobre la disponibilidad hídrica en la región. Este Trabajo de Investigación apunta a una idea novedosa, en donde se pretende explorar el comportamiento de este proceso atmosférico bajo escenarios de cambio climático sobre el norte de Suramérica y la cuenca del Amazonas.

Datos y metodología

A continuación se presentan, de manera general, los datos y la metodología utilizados para la realización de este Trabajo de Investigación. Al final de esta sección se detalla la metodología utilizada en cada uno de los tres capítulos en los que se reportan los principales resultados.

Descripción de las bases de datos y modelos CMIP5 utilizados

- Reanálisis ERA5

ERA5 es un reanálisis climático global producido por el Centro Europeo de Pronósticos Meteorológicos (ECMWF, por sus siglas en inglés), que posee datos disponibles desde el año 1979 hasta el presente. Los datos cubren todo el globo terrestre en una cuadrícula de 30 km y resuelven la atmósfera utilizando 137 niveles desde la superficie hasta una altura de 80 km (Hersbach et al., 2020). ERA5 eventualmente reemplazará al reanálisis ERA-Interim (Hersbach et al., 2020). En la actualidad, este reanálisis se ha convertido en el nuevo estado del arte en los estudios de seguimiento de la humedad atmosférica (Tuinenburg & Staal, 2020), y en este estudio es considerado como la línea base para los estimados de este transporte durante el periodo histórico para los modelos CMIP5 a evaluar.

- Modelos CMIP5

CMIP5 corresponde a la quinta fase del Proyecto de Comparación de Modelos Acoplados del Programa *World Climate Research* (WCRP). Su objetivo es proporcionar un marco de referencia experimental de cambio climático que incluye simulaciones y proyecciones que fueron incorporadas en el AR5, publicado entre los años 2013 y 2014 (WCRP, 2019). CMIP5 promueve un conjunto estándar de simulaciones de modelos para evaluar qué tan realistas son los modelos para simular el clima global del pasado reciente, proporcionar proyecciones de cambio climático futuro y comprender algunos de los factores responsables de las diferencias en dichas proyecciones (WCRP, 2019). Además este amplio conjunto de salidas modeladas se encuentra disponible libremente a investigadores (Taylor et al., 2012).

Para este trabajo se considera el uso de 11 modelos incluidos en CMIP5 que cuentan con simulaciones históricas para el periodo 1980-2005 y proyecciones bajo diferentes escenarios de emisiones de GEI para el periodo 2070-2100. En su quinto informe, el IPCC realizó y evaluó las simulaciones en base a cuatro escenarios de forzamiento radiativo, o RCP (*Representative Concentration Pathways*) (IPCC, 2013). Dichos escenarios fueron diseñados para la investigación de los posibles impactos del cambio climático, dependiendo además de las políticas y respuestas ante el fenómeno (Moss et al., 2008; van Vuuren et al., 2011). Para el caso del RCP8.5, el escenario que da lugar a las mayores concentraciones atmosféricas de GEI para finales del siglo XXI, se tiene un forzamiento radiativo que aumenta a lo largo del siglo XXI logrando obtener un nivel de 8.5 W/m^2 para finales de siglo (Taylor et al., 2012). Este escenario combina suposiciones de alta población, baja tasa de avance tecnológico y un desarrollo socioeconómico que conduce a largo plazo a gran demanda de energía y emisiones de GEI, en ausencia de

políticas de cambio climático (Riahi et al., 2011). Dentro de los cuatro escenarios planteados, el RCP8.5 es el más pesimista; sin embargo, según las tendencias de emisiones de GEI actuales, se supone el más probable (Schwalm et al., 2020). Por tanto, este Trabajo de Investigación considera el análisis de proyecciones bajo este escenario.

En la Tabla 1 se detallan los modelos CMIP5 empleados para el desarrollo de este Trabajo de Investigación, especificando el instituto que lo desarrolló, el tipo de modelo y su resolución horizontal atmosférica.

Tabla 1. Modelos CMIP5 utilizados

Modelo CMIP5	Modelo CMIP5	Categoría	Instituto (país)	Resolución horizontal atmosférica
MPI-ESM-MR	Max Planck Institute for Meteorology - Earth System Model - Medium Resolution	Earth System Model (ESM)	Max Planck Institute for Meteorology – Alemania	1,875°x1,875°
MRI-ESM1	Meteorological Research Institute - Earth System Model Version 1	Earth System Model (ESM)	Meteorological Research Institute - Japón	1,125°x1,125°
MIROC-ESM	Model for Interdisciplinary Research on Climate - Earth System Model	Earth System Model (ESM)	Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology – Japón	2,8125°x2,8125°
MIROC-ESM-CHEM	Model for Interdisciplinary Research on Climate - Earth System Model - Chemical	Earth System Model (ESM)	Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology – Japón	2,8125°x2,8125°
GFDL-ESM2M	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory - Earth System Model 2M	Earth System Model (ESM)	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory – Estados Unidos	2,5°x2,5°
GFDL-ESM2G	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory - Earth System Model 2G	Earth System Model (ESM)	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory – Estados Unidos	2,5°x2,5°
NorESM-M	Norwegian Climate Centre - Earth System Model 1 - Medium Resolution	Earth System Model (ESM)	Norwegian Climate Centre (NorClim) - Noruega	2,5°x2,5°
CanESM2	Canadian Earth System Model	Earth System Model (ESM)	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, Victoria, British Columbia – Canadá	2,8125°x2,8125°
MIROC5	Model for Interdisciplinary Research on Climate	Atmosphere-Ocean Coupled General Circulation Model (AOGCM)	Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology – Japón	1,40625°x1,40625°
GFDL-CM3	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory - Coupled Model version 3	Atmosphere-Ocean Coupled General Circulation Model (AOGCM)	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory – Estados Unidos	2,5°x2,5°
MRI-CGCM3	Meteorological Research Institute Coupled General Circulation Model version 3	Atmosphere-Ocean Coupled General Circulation Model (AOGCM)	Meteorological Research Institute - Japón	1,125°x1,125°

Estimación del transporte de humedad atmosférica mediante el modelo DRM

La precipitación sobre una región terrestre posee dos componentes principales: la componente advectiva, resultante del flujo de vapor de agua externo, y la componente interna, resultante del flujo de vapor de agua debido a la evaporación local (Burde & Zangvil, 2001). El reciclaje de precipitación se define como la contribución de agua evaporada localmente al agua que se precipita sobre la misma región, y su estudio proporciona información útil sobre las posibles interacciones de la hidrología y el clima en una región (Burde & Zangvil, 2001).

En la actualidad existen tres métodos que son utilizados para establecer la relación fuente-receptor del vapor de agua atmosférico: los modelos analíticos, los trazadores numéricos, y los trazadores físicos (isotópicos) (Gimeno et al., 2012). En particular, todos los modelos analíticos se pueden derivar de la ecuación del balance de integración vertical de vapor de agua (Gimeno et al., 2012). El método más común para la estimación de reciclaje de precipitación fue desarrollado por Budyko y Drozdov en 1953 (Budyko & Drozdov, 1953), el cual se describe en el año 1974 (Budyko, 1974). Este modelo plantea una forma simple de expresar la proporción de reciclaje como una función de la evaporación regional, teniendo en cuenta tres supuestos principales: (1) cambio no significativo en el almacenamiento de agua en la atmósfera, (2) estimación de una sola dimensión (1-D) de reciclaje, y (3) atmósfera bien mezclada (Burde & Zangvil, 2001; Gimeno et al., 2012).

Después del modelo inicial de Budyko, diversos autores desarrollaron modelos para mejorar el análisis del reciclaje de precipitación, logrando extenderlos a dos dimensiones (Gimeno et al., 2012). Sin embargo, al igual que el modelo presentado por Budyko (1974), estos modelos continuaron trabajando en escalas de tiempo mensuales o mayores y, por lo tanto, el término de almacenamiento de humedad podía ser despreciado (Gimeno et al., 2012). Domínguez et al. (2006) desarrollaron el modelo DRM, el cual incorpora el almacenamiento de humedad, lo que le permitió ser utilizado a escalas de tiempo menores a un mes (Domínguez et al., 2006).

El DRM es un modelo analítico semi-lagrangiano derivado formalmente de la ecuación de conservación de masa (conservación del vapor de agua atmosférico), que proporciona estimados de reciclaje y transporte de vapor de agua a escalas de tiempo diaria, mensual y más largas (Domínguez et al., 2006). El modelo DRM incluye el almacenamiento de humedad en la columna atmosférica, lo que permite su aplicación a escalas de tiempo más pequeñas que la mayoría de los modelos analíticos tradicionales (Domínguez et al., 2006). Posteriormente, Martínez & Domínguez (2014) desarrollaron una modificación del DRM, logrando no sólo estimar el reciclaje de precipitación en una región determinada, sino además las contribuciones relativas de diferentes fuentes de humedad a una región dada (Martínez & Domínguez, 2014). Esta última modificación del modelo DRM es la que se emplea en el desarrollo de este Trabajo de Investigación.

Dado que el DRM es un modelo 2D, su enfoque ha sido debatido debido a que la componente vertical del viento puede inducir patrones de transporte de humedad que no se cuantifican en el modelo (Goessling & Reick, 2013; Van Der Ent et al., 2013). Sin embargo, el DRM puede proporcionar información valiosa cuando se utiliza en conjunto con los métodos más tradicionales, incluyendo análisis detallados de los patrones de viento, tanto horizontal como verticalmente (Agudelo et al., 2019). En particular, esta configuración del DRM puede representar de manera adecuada la variabilidad interanual del transporte de humedad atmosférica en diferentes regiones (Morales et al., 2020; Roy et al., 2019), incluyendo el norte de Suramérica (Hoyos et al., 2018).

Actualmente, los métodos Lagrangianos son herramientas cada vez más utilizadas para calcular cómo el agua se transporta a través de la atmósfera de un lugar a otro, además han sido identificados en recientes estudios como los que mejor describen el transporte de humedad atmosférica en áreas relativamente complejas, especialmente los tridimensionales (Tuinenburg & Staal, 2020). Estudios realizados para Norte y Suramérica, como los de Domínguez et al. (2006), Sakamoto et al. (2011), Martínez & Domínguez (2014), Drumond et al. (2014), Arias et al. (2015), Hoyos et al. (2018), entre otros, han empleado diferentes Modelos Lagrangianos para la estimación del reciclaje y del transporte de humedad en zonas específicas del continente, además de la identificación de las fuentes de humedad atmosférica más importantes para la región de interés. Este enfoque Lagrangiano también ha sido ampliamente utilizado en estudios alrededor del globo, como es el caso de China (Baker et al., 2015; Q. Hu et al., 2018), el Mar Mediterráneo y el norte de la Península Arábiga (Salah et al., 2018), el Ártico (Vázquez et al., 2018), la cuenca del río Danubio (Stojanovic et al., 2017), entre muchos otros. Este Trabajo de Investigación hace uso de estas herramientas, específicamente del modelo DRM, para identificar posibles efectos del cambio climático en el transporte de vapor de agua y el reciclaje de humedad sobre el norte de Suramérica y el Amazonas (ver Figura 3).

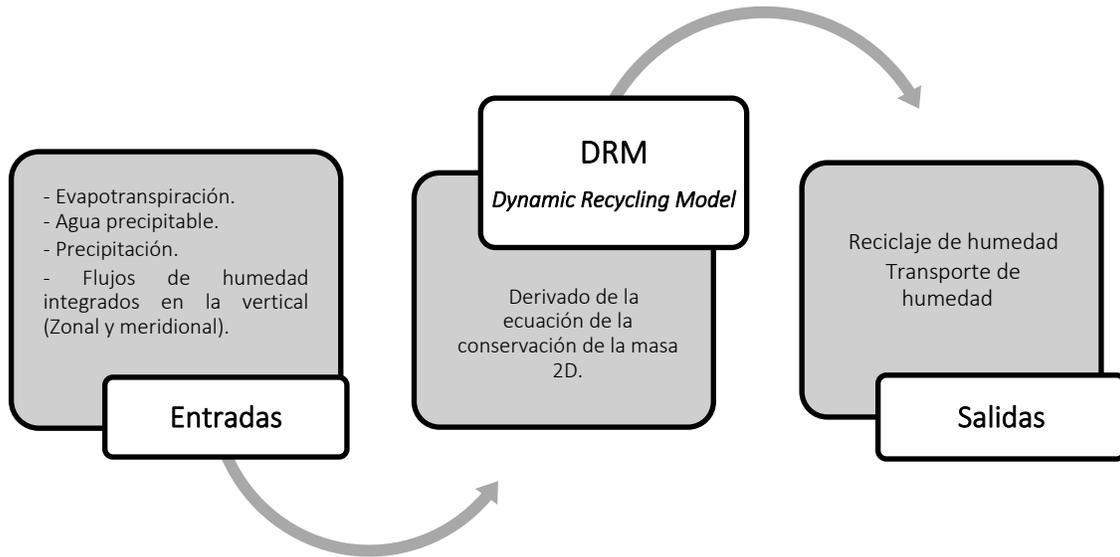


Figura 3. Esquema descriptivo del uso del modelo DRM desarrollado en este trabajo.

La modificación realizada al DRM por Martínez & Domínguez (2014), que corresponde a la versión empleada en este Trabajo de Investigación, permite la aplicación del modelo a escalas de tiempo más pequeñas que los modelos tradicionales (Martínez & Domínguez, 2014). Así, es posible expresar la ecuación de balance de integración vertical para el vapor de agua como (Domínguez et al., 2006):

$$\frac{\partial(w)}{\partial t} + \frac{\partial(wu)}{\partial x} + \frac{\partial(wv)}{\partial y} = E - P \quad (1)$$

donde el primer término es el almacenamiento de humedad, el segundo es la advección zonal y el tercero es la advección meridional (Domínguez et al., 2006). Para esta expresión se tiene que:

$$w = \int_0^{p_0} \bar{q} \frac{dp}{g}, \quad (2)$$

$$u = \frac{1}{w} \left(\int_0^{p_0} \bar{q} \bar{u} \frac{dp}{g} + \int_0^{p_0} \overline{q' \hat{u}'} \frac{dp}{g} \right), \quad (3)$$

$$v = \frac{1}{w} \left(\int_0^{p_0} \bar{q} \bar{v} \frac{dp}{g} + \int_0^{p_0} \overline{q' \hat{v}'} \frac{dp}{g} \right) \quad (4)$$

donde w es la cantidad de vapor de agua contenida en una columna de aire, E es la evapotranspiración, P es la precipitación y \bar{q} , q' , \bar{u} , \hat{u}' , \bar{v} , \hat{v}' son valores de humedad específica y componentes del viento zonal y meridional, respectivamente (Domínguez et al., 2006).

La mayoría de los modelos de reciclaje de humedad atmosférica asumen dos supuestos básicos. El primero es que la columna atmosférica se encuentra bien mezclada (Domínguez et al., 2006). Esto significa que la relación entre el vapor de agua advechado y el agua evaporada en la misma columna es igual a la relación entre la precipitación advechada y la precipitación reciclada (Domínguez et al., 2006):

$$\frac{Pa}{Pm} = \frac{Wa}{Wm} \quad \text{o} \quad \frac{Pa}{P} = \frac{Wa}{W} \quad \text{o} \quad \frac{Pm}{P} = \frac{Wm}{W} \quad (5)$$

donde los subíndices a y m se refieren a los componentes de advección y reciclaje, respectivamente (Domínguez et al., 2006).

El segundo supuesto es que a escalas mensuales o más largas de tiempo, el cambio en el almacenamiento de humedad atmosférica es muy pequeño comparado con los otros términos de la ecuación de balance de masa y se puede despreciar, pero el modelo DRM no lo hace, lo que permite su aplicación a escalas de tiempo más cortas (Domínguez et al., 2006).

De la solución de un marco Lagrangiano para la ecuación de la conservación del vapor de agua total en una columna (es decir agua precipitable), Domínguez et al. (2006) encontraron que la fracción R de la humedad atmosférica recogida por la columna de aire, a lo largo de su trayecto en los tiempos $\tau'=0$ y $\tau'=\tau$, está dada por:

$$R(x, y, t) = 1 - \exp \left[- \int_0^{\tau} \frac{E(x', y', \tau')}{W(x', y', \tau')} d\tau' \right] \quad (6)$$

donde E y W representan la evaporación y el agua precipitable, respectivamente, a lo largo de la trayectoria de dos dimensiones $[x'(\tau'), y(\tau')]$.

Luego, con base en la expresión (6), Martínez & Domínguez (2014) extendieron el modelo de Domínguez et al. (2006), logrando cuantificar no solo la contribución de una región a sí misma (reciclaje), sino también las contribuciones de diferentes regiones a una región dada.

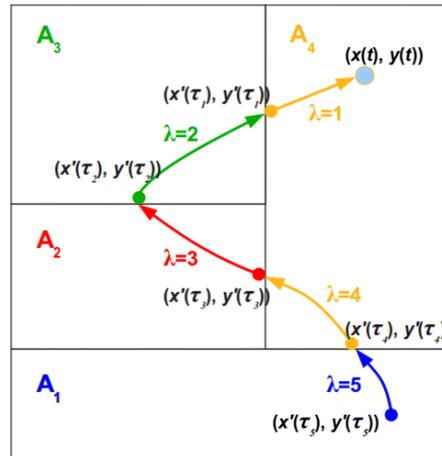


Figura 4. Esquema de la trayectoria de una columna de aire ideal. Tomado de Martínez & Domínguez (2014).

La Figura 4 muestra la trayectoria de una columna de aire ideal, la cual se divide en las regiones, A_1, A_2, A_3 y A_4 . Los λ son puntos específicos de la trayectoria de la columna de aire. Esta idea puede generalizarse a una trayectoria con un número arbitrario de partes (Martínez & Domínguez, 2014). De esta manera, la contribución de cada parte de la trayectoria λ se denominará c_λ , y en general puede demostrarse que (Martínez & Domínguez, 2014):

$$c_\lambda(x, y, t) = \left[\prod_{j=1}^{\lambda-1} \alpha_j(x, y, t) \right] R_\lambda(x, y, t) \quad (7)$$

Finalmente, se pueden agrupar las contribuciones de las diferentes partes de la trayectoria de acuerdo con algunas regiones predefinidas (Martínez & Domínguez, 2014):

$$a_k(x, y, t) = \sum_{\lambda \in A_k} c_\lambda(x, y, t) \quad (8)$$

donde la suma se realiza sobre todas las partes de la trayectoria λ que caen en la región A_k . Los campos $a_k(x, y)$ proporcionan una estimación de la fracción de la humedad de cada celda de la cuadrícula (x, y) que se originó por evapotranspiración en algún lugar de la región A_k . Por lo tanto (Martínez & Domínguez, 2014):

$$R(x, y, t) = \sum_{k=1}^{N_A} a_k(x, y, t) \quad (9)$$

donde (9) satisface (6), y N_A representa el número total de regiones.

Datos de entrada para el modelo DRM

De acuerdo con lo que se observa en la Figura 3, el DRM requiere como datos de entrada: evapotranspiración, agua precipitable, precipitación y flujos de humedad integrados en la vertical (VIMF, por sus siglas en inglés), tanto en dirección zonal como meridional, a escala diaria. Las variables necesarias para su implementación fueron descargadas del reanálisis climático ERA5, así como de las simulaciones históricas y las proyecciones RCP8.5 de 11 modelos CMIP5 (Tabla 1). Estos modelos fueron escogidos considerando que tuvieran disponibles las variables necesarias para correr el DRM.

El modelo DRM se corrió para cada uno de los 11 modelos considerados, tanto para el periodo histórico 1980-2005 como para las proyecciones para finales del siglo XXI (2070-2100). Además, se realizó una corrida para el reanálisis ERA5, la cual sirve como línea base en este estudio. Los resultados de las corridas del periodo histórico de cada modelo CMIP5 fueron comparados con la corrida realizada con los datos de ERA5. De esta manera, se pudo identificar los principales sesgos en las estimaciones derivadas de los modelos CMIP5 respecto a la representación generada por ERA5. Para el análisis de las proyecciones, se estimó la diferencia entre las estimaciones obtenidas para finales de siglo (2070-2100) y las simulaciones para el periodo histórico (1980-2005), para cada uno de los modelos. De esta manera, es posible identificar los cambios en el transporte y el reciclaje de humedad atmosférica para cada uno de los modelos seleccionados, en respuesta a las concentraciones de GEI representadas por el escenario RCP8.5.

En la Tabla 2 se presentan las variables descargadas de las diferentes bases de datos para correr el modelo DRM. Muchas de las variables requeridas fueron pre-procesadas para correr el modelo. Por ejemplo, la variable agua precipitable no se encuentra directamente disponible en los modelos CMIP5, por lo fue necesario calcular la integral vertical de la humedad específica. En el caso de los flujos de humedad integrados en la vertical, se necesitaron variables como la humedad específica y las componentes zonal y meridional del viento en 3D, ya que los modelos CMIP5 tampoco ofrecen esta variable directamente.

Tabla 2. Datos descargados para la implementación del modelo DRM.

Datos modelos CMIP5		Datos ERA 5	
Variable	Descripción	Variable	Descripción
Humedad específica 3D	En kg/kg. Para el cálculo de los flujos de humedad integrados en la vertical y el agua precipitable	Agua precipitable	En mm
Precipitación	En mm/s	Precipitación	En mm/s
Componentes zonal y meridional del viento 3D	En m/s. Para el cálculo de los flujos de humedad integrados en la vertical	Flujos de humedad integrados en la vertical 2D	En $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$
Flujo de calor latente de la superficie	En W/m^2 . Para el cálculo de la evapotranspiración	Evaporación	En mm/s

Región de estudio

Para la implementación el modelo DRM, además de las variables mencionadas en la Tabla 2, se hizo necesario definir un dominio de estudio en el cual estuviera contenido el norte de Suramérica y el Amazonas, nuestras regiones de interés. En la Figura 5 se pueden observar cada una de las 20 subregiones en las que se dividió este dominio. Las regiones presentadas corresponden a una modificación de las empleadas por Arias et al. (2015) y Agudelo et al. (2019). De las 20 subregiones en las que se divide el dominio seleccionado, 12 corresponden a regiones continentales, mientras que los 8 restantes son oceánicas. Las regiones consideradas para Suramérica se definen con el objetivo de representar de manera general las principales cuencas fluviales. La división de la cuenca del Amazonas en una región norte (NAMZ) y una región sur (SAMZ) se debe principalmente a que la hidroclimatología de ambas regiones presenta características diferentes, por lo que es necesario estudiarlas por separado (Agudelo et al., 2019; Arias et al., 2011; Marengo, 2009), además el transporte de humedad desde cada una de estas dos subregiones a otras áreas tienen variaciones importantes (Agudelo et al., 2019; Martínez & Domínguez, 2014). Centroamérica y México conforman una sola región (CAM), mientras que la zona continental de Estados Unidos se divide en dos subregiones (SWUS y SEUS). El Golfo de México (GOM) y el Mar Caribe (CABN) se definen aproximadamente por su dominio geográfico. Los demás océanos dentro del dominio se definieron de acuerdo con bandas latitudinales. Finalmente, la región definida como NOSA (norte de Suramérica) es una modificación con respecto a los estudios de Arias et al. (2015) y Agudelo et al. (2019), ya que se unen las cuencas de los ríos Magdalena y Orinoco. Esto se fundamenta en la baja resolución horizontal de los modelos CMIP5 (Tabla 1), por lo que la definición de regiones pequeñas no es adecuada. Las regiones consideradas se suponen aportantes de humedad atmosférica, en diferentes proporciones, hacia el norte de Suramérica y el Amazonas, como lo han demostrado estudios anteriores (Arias, Martínez, et al., 2015; Bosilovich & Chern, 2006; Hoyos et al., 2018; Poveda et al., 2014; Rocha et al., 2017; Sakamoto et al., 2011).

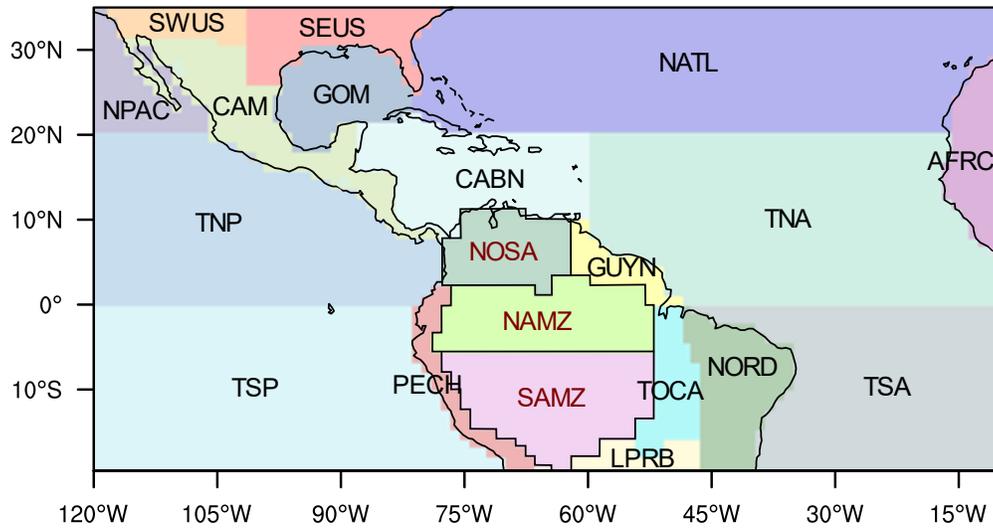


Figura 5. Subregiones consideradas para la estimación de transporte de humedad atmosférica mediante el modelo DRM: NOSA “Northern South America”, NPAC “Northern Pacific”, TNP “Tropical North Pacific”, TSP “Tropical South Pacific”, NATL “North Atlantic”, TNA “Tropical North Atlantic”, TSA “Tropical South Atlantic”, CAM “Central America”, GOM “Gulf of Mexico”, CABN “Caribbean Sea”, GUYN “Guyanas”, PECH “Peru-Chile”, NAMZ “Northern Amazon”, SAMZ “Southern Amazon”, TOCA “Tocantins river”, NORD “Brazil’s Nordeste”, LPRB “La Plata River Basin”, AFRC “Africa”, SEUS “South Eastern United States”, SWUS “South Western United States”. La resolución presentada en la figura corresponde a la del modelo MPI-ESM-MR (1,875°x1,875°). Las regiones delimitadas por el contorno corresponden a las fuentes de humedad en las que se concentrará el análisis de esta investigación.

Salidas generales del modelo DRM

Las salidas del modelo DRM brindan estimados de transporte y reciclaje de humedad atmosférica de cada una de las 20 regiones consideradas (Figura 5). Para este estudio, se analizaron las contribuciones de vapor de agua que llegan al norte de Suramérica y a las dos regiones Amazónicas desde cada una de las regiones restantes. En general, las salidas del modelo DRM se analizaron de la siguiente manera:

- Mapas

Los resultados que genera el DRM son relaciones R_m . Estas razones se encuentran directamente relacionadas con una suposición que hace el modelo: “la relación entre la precipitación que llega desde la fuente m y la precipitación total es igual a la relación entre el agua precipitable que llega desde la misma fuente m y el agua precipitable total”:

$$R_m = \frac{P_m}{P_t} = \frac{W_m}{W_t} \quad (10)$$

donde P_m es la precipitación de origen m , P_t es la precipitación total, W_m es el agua precipitable de origen m y W_t es el agua precipitable total.

Sin embargo, estas relaciones R_m , en algunas ocasiones, son difíciles de interpretar, por lo que lo más conveniente es analizar los resultados de DRM en términos de agua precipitable o precipitación. Supongamos que queremos obtener los resultados en términos del agua precipitable que llega de alguna fuente hacia una región de interés. Para ello debemos despejar W_m de la expresión (10):

$$W_m(x, y, t) = R_m * W_t \quad (11)$$

De esta manera se obtiene el estimado de agua precipitable que se originó desde la fuente m . Teniendo la información anterior se puede, por ejemplo, realizar mapas del agua precipitable que se originó en determinada región y cómo este vapor de agua es transportado sobre toda la región de estudio.

- Promedios regionales

Dentro de los resultados que entrega el DRM están los promedios regionales de humedad atmosférica que es transportada desde cada región fuente hacia cada región sumidero. Es decir, no sólo se puede detallar cómo la humedad atmosférica originada en una región dada se distribuye a través de todo el dominio de estudio, sino que además se puede ver cómo la humedad de una fuente se transporta hacia un sumidero específico. De esta manera, se pudo determinar las contribuciones de cada una de las fuentes consideradas hacia el norte de Suramérica y el Amazonas.

Metodología por capítulos

Capítulo I: Análisis de variables de entrada al modelo DRM

Antes de estimar el transporte y el reciclaje de humedad atmosférica simulado por cada modelo CMIP5 durante el periodo histórico y los cambios proyectados por cada modelo para finales del siglo XXI bajo el escenario RCP8.5, se hizo necesario analizar la representación histórica y los cambios proyectados de las variables involucradas en esta estimación. Con el objeto de identificar los sesgos de los diferentes modelos CMIP5 considerados en la representación de las variables de entrada a DRM, se comparó la simulación de estas, durante el periodo histórico (1980-2005), para cada modelo con respecto al reanálisis ERA5. El análisis de estos sesgos considera el uso de métodos estadísticos, como por ejemplo, la elaboración de diagramas de Taylor (Taylor, 2001). Este método consiste en un análisis gráfico de una variable determinada con respecto a una base de datos de referencia, que en este estudio es ERA5. De esta manera, se elaboraron diagramas de Taylor para precipitación, evaporación, agua precipitable y P-E, para cada uno de los 11 modelos CMIP5. Según esta metodología, los modelos que

poseen la mejor representación son aquellos que: (1) poseen mayores valores de coeficiente de correlación R, el cual da cuenta de qué tan parecida es la fase de las variables, (2) tienen una relación de las desviaciones estándar más cercana a uno, lo cual da cuenta de la varianza de la variable del modelo con respecto al conjunto de datos de referencia, y (3) poseen un error cuadrático medio (RMS) cercano a cero (Ortega & Arias, 2018; Taylor, 2001).

Además, dentro de la evaluación del desempeño de los modelos para representar las variables de interés, se consideró el análisis de los ciclos anuales multianuales de estas variables para diferentes subregiones. Estas subregiones se eligieron considerando estudios anteriores que clasifican las fuentes de humedad climatológicas más importantes para el norte de Suramérica (Arias, Martínez, et al., 2015; Hoyos et al., 2018). Así, las regiones oceánicas escogidas son: TNP “Tropical North Pacific”, TSP “Tropical South Pacific”, NATL “North Atlantic”, TNA “Tropical North Atlantic”, TSA “Tropical South Atlantic” y CABN “Caribbean Sea”. Por su parte, las regiones continentales son: CAM “Central America”, NOSA “Northern South America”, NAMZ “Northern Amazon” y SAMZ “Southern Amazon”.

De otro lado, fue fundamental evaluar los cambios que cada modelo proyecta para la precipitación, la evapotranspiración, el agua precipitable y P-E (precipitación menos evaporación) sobre la región de estudio, así como los cambios de estas variables en cada modelo entre el periodo futuro (2070-2100) y el período histórico (1980-2005). De esta manera, es posible analizar con mayores elementos físicos las proyecciones de transporte de humedad planteadas por cada uno de los modelos CMIP5 considerados (Capítulo III).

Capítulo II: Análisis de transporte de humedad atmosférica durante el periodo histórico (1980-2005)

Para el desarrollo de este capítulo, se corrió el modelo DRM con datos históricos del reanálisis climático ERA5 durante el periodo 1980-2005. Esto permitió estimar el transporte de humedad atmosférica hacia el norte de Suramérica y la cuenca del Amazonas desde las diferentes regiones presentadas en la Figura 5, obteniendo patrones observados de transporte de humedad atmosférica a escala mensual, anual e interanual.

Además, se corrió el modelo DRM con los datos de las simulaciones históricas de los 11 modelos de circulación global de CMIP5 descritos en la Tabla 1. El periodo de análisis para las simulaciones históricas es 1980-2005. El DRM se corrió a la resolución horizontal de cada uno de los 11 modelos. De esta manera, se pudo obtener estimados mensuales, anuales e interanuales de transporte de humedad atmosférica hacia el norte de Suramérica y las regiones Amazónicas, considerando los 11 modelos descritos. Finalmente, se analizaron los sesgos que presentan estos modelos al simular el transporte de humedad en el norte de Suramérica y el Amazonas con respecto a lo estimado mediante el reanálisis ERA5 para el clima presente.

Capítulo III: Análisis de proyecciones de transporte de humedad atmosférica para finales del siglo XXI (2070-2100) bajo el escenario RCP8.5

Para explorar los posibles efectos del cambio climático en el transporte de humedad atmosférica hacia las regiones de interés, se analizaron las proyecciones para un escenario extremo de emisiones de GEI planteado por el IPCC. Para ello, se corrió el DRM empleando las proyecciones provenientes de los 11 modelos CMIP5 bajo el escenario RCP8.5, durante el periodo 2070-2100 (finales del siglo XXI).

Finalmente, las proyecciones de transporte y reciclaje de humedad obtenidas fueron comparadas con las simulaciones históricas obtenidas para cada uno de los modelos CMIP5, analizadas en el Capítulo II. De esta manera, fue posible identificar los cambios proyectados por los diferentes modelos considerados en cuanto al transporte y el reciclaje de humedad en la región de estudio para finales del siglo XXI, con respecto a lo observado en el clima presente. Los resultados del Capítulo I fueron fundamentales en la interpretación de los cambios proyectados en el Capítulo III.

Todos los análisis aquí planteados se desarrollaron para cada una de las cuatro temporadas del año: Diciembre a Febrero (DEF), Marzo a Mayo (MAM), Junio a Agosto (JJA) y Septiembre a Octubre (SON).

Capítulo I

Análisis de variables de entrada al modelo DRM

1.1. Introducción

El ciclo hidrológico y los cambios que puede presentar a través del tiempo son de gran interés, especialmente bajo la influencia del cambio climático (Trenberth et al., 2011). El ciclo del agua se puede resumir en términos de la evaporación generada desde las superficies terrestres (oceánicas y continentales) y su posterior precipitación, todo equilibrado por el transporte atmosférico, oceánico y terrestre del agua (Gimeno et al., 2012). La humedad presente en la atmósfera posee diferentes orígenes, tanto oceánicos como continentales (Gimeno et al., 2012). Esta fluye, por medio de los vientos a diferentes regiones del globo, por lo que el vapor de agua que es generado en una región específica puede ser clave para la disponibilidad de agua atmosférica en otra. Este transporte depende no solo de la circulación atmosférica sino también de variables como la precipitación, la evapotranspiración y el agua disponible en la atmósfera. Este capítulo pretende dar un primer vistazo sobre cómo los 11 modelos de circulación general del proyecto CMIP5 considerados en este trabajo (Tabla 1) representan las variables de entrada al modelo DRM (precipitación (P), evaporación (E), agua precipitable (W), y P-E), sobre el norte de Suramérica, la Amazonía y otras regiones del dominio de estudio (Figura 5). Para esta evaluación, se considera el reanálisis ERA5 como referencia durante el periodo 1980-2005. Esta comparación permite identificar los sesgos que los modelos CMIP5 presentan en sus simulaciones de clima presente para las variables de interés. Además, se analizan los cambios proyectados por cada uno de los modelos para las diferentes variables. Para ello, se analizó el cambio de las proyecciones bajo el escenario RCP8.5 durante el periodo 2070-2100, con respecto a la simulación histórica (1980-2005) de cada modelo. Lo anterior nos permite identificar características de los modelos considerados para una mejor interpretación de los cambios proyectados en transporte y reciclaje de humedad atmosférica para finales del siglo XXI.

1.2. Resultados y análisis

1.2.1. Simulaciones históricas (1980-2005)

1.2.1.1. Precipitación

La Figura 1.1 muestra los promedios estacionales de precipitación sobre todo el dominio de estudio durante el periodo 1980-2005, según el reanálisis ERA5 y los 11 modelos CMIP5 considerados (Tabla 1). Para todos los modelos, la representación de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) es clara, con desplazamientos hacia el norte mayormente marcados en la temporada JJA (verano boreal), consistentemente con lo representado por ERA5. Del mismo modo, durante el verano austral (DEF), tanto ERA5 como los modelos CMIP5 reproducen la migración hacia el sur de la ZCIT. Estos modelos representan espacialmente de manera similar las tasas de

precipitación sobre la región de estudio (Yin et al., 2013). En general, los modelos CMIP5 considerados muestran sus mayores sesgos de precipitación durante las temporadas DEF y MAM, cuando la mayoría de ellos presentan el sesgo conocido como “doble ZCIT”, el cual consiste en la representación errada de dos bandas estrechas y elongadas de alta precipitación sobre la franja tropical y que se extiende al norte y al sur del ecuador (Adam et al., 2018; Tian & Dong, 2020). Este sesgo de la “doble ZCIT” se puede observar en los modelos tanto estacional como espacialmente sobre el Pacífico oriental y el Atlántico, donde en invierno y primavera boreal se desplaza más al sur de lo observado, y sobre el Pacífico occidental, donde se simula una ZCIT doble y más ancha que la observada durante todo el año (Adam et al., 2018). Este sesgo ha sido identificado en modelos de generaciones anteriores como CMIP3, y persiste en las generaciones posteriores de modelos CMIP5 (Hirota & Takayabu, 2013; Ortega et al., 2020; Zhang et al., 2015) y CMIP6 (Ortega et al., 2020; Tian & Dong, 2020; Zhou et al., 2020), aunque estudios sugieren que este sesgo disminuyó en los modelos CMIP5, en comparación con CMIP3 (Hirota & Takayabu, 2013). Específicamente, para CMIP5 este sesgo es ocasionado por múltiples factores que incluyen dificultades para representar la circulación tropical y la sensibilidad climática de los modelos (Tian, 2015). Estudios que evalúan fenómenos regionales como el Chorro del Chocó (Poveda & Mesa, 2000) señalan que existe una relación directa entre este y la ubicación de la ZCIT, concluyendo que los peores modelos en la representación del Chorro del Chocó son aquellos en los que la ZCIT presenta un mayor sesgo de ubicación sobre el Océano Pacífico tropical oriental (Sierra et al., 2018). A pesar de estos sesgos y debido a la falta de observaciones espaciales y temporales, los modelos de circulación general continúan siendo fundamentales en el entendimiento histórico y futuro del sistema climático terrestre (Palomino-Lemus et al., 2017; Samanta et al., 2019).

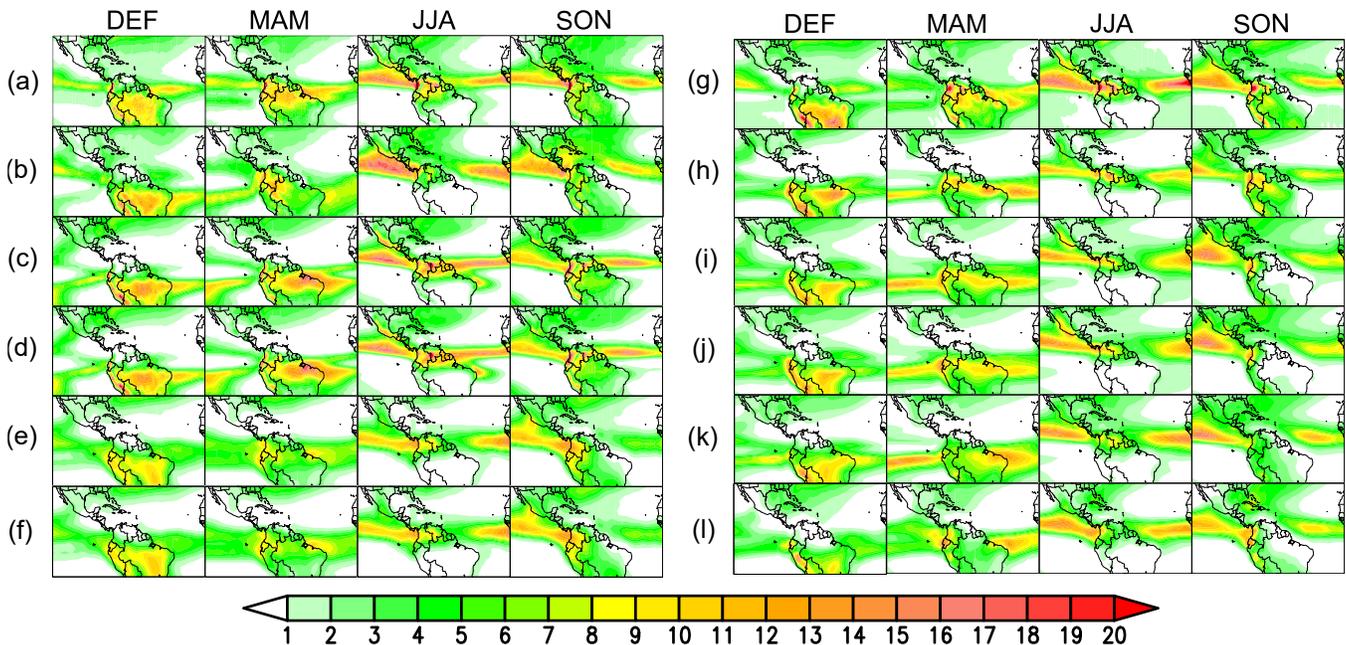


Figura 1.1. Promedios estacionales de precipitación durante el período histórico 1980-2005, para (a) ERA5 y 11 modelos CMIP5: (b) MPI-ESM-MR, (c) MRI-ESM1, (d) MRI-CGCM3, (e) MIROC-ESM, (f) MIROC-ESM-CHEM, (g) MIROC5, (h) NorESM1-M, (i) GFDL-ESM2M, (j) GFDL-ESM2G, (k) GFDL-CM3, y (l) CanESM2. Unidades en mm/d.

Con el objeto de identificar de forma más clara los sesgos de los diferentes modelos CMIP5 en su representación de la precipitación sobre la región de estudio, se analizaron los ciclos anuales de la variable dados por estos durante el periodo 1980-2005, para las subregiones con mayores contribuciones de humedad atmosférica al norte de Suramérica (Figura 5).

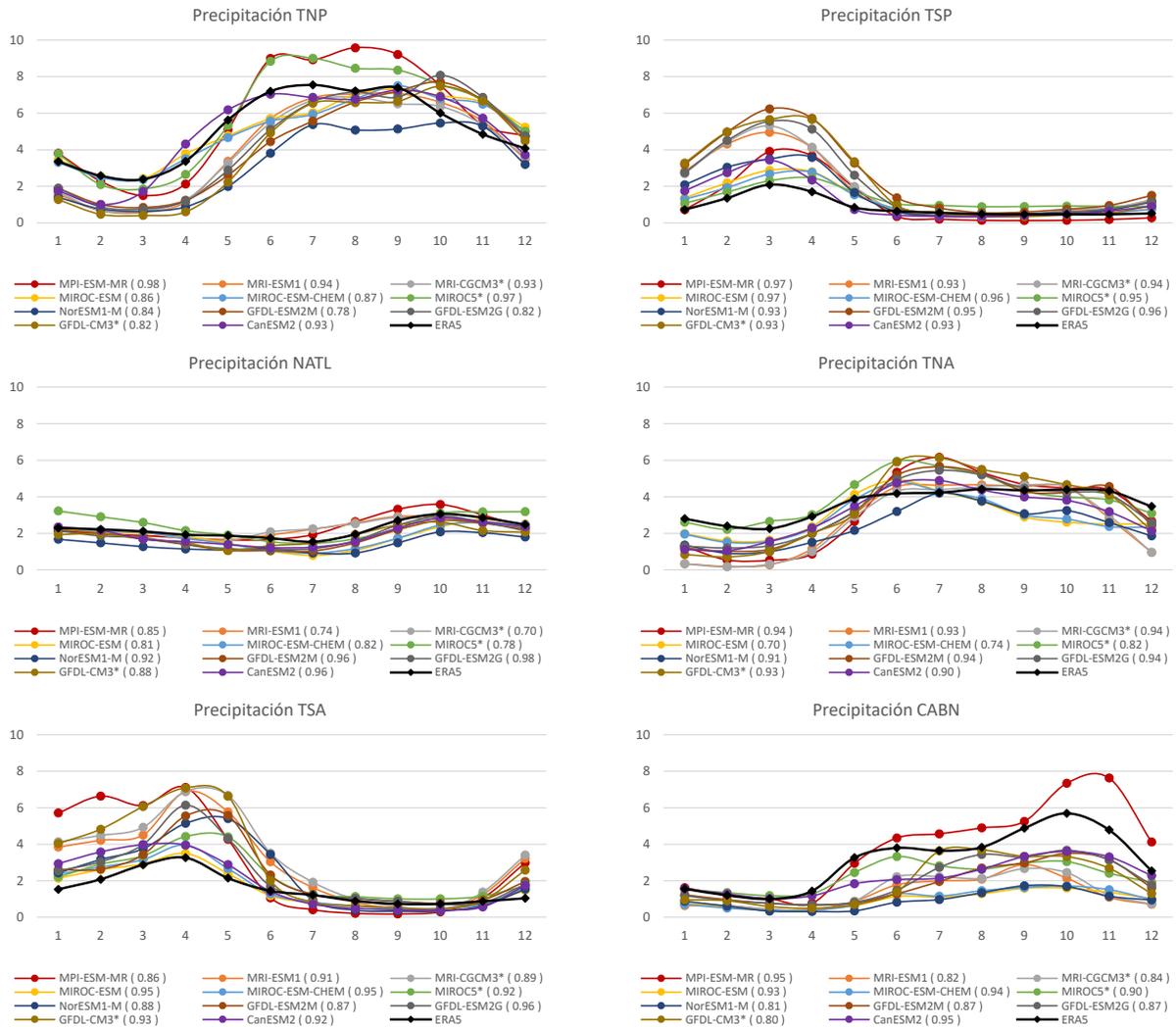


Figura 1.2. Ciclos anuales climatológicos de precipitación de ERA5 y los 11 modelos CMIP5 durante el periodo histórico 1980-2005, para las regiones oceánicas con mayores contribuciones de humedad atmosférica hacia el norte de Suramérica (Figura 5). Unidades en mm/d. Los valores entre paréntesis corresponden a los coeficientes de correlación entre el ciclo anual del respectivo modelo y el ciclo anual de ERA5.

La Figura 1.2 muestra los ciclos anuales climatológicos de precipitación para las subregiones oceánicas durante el periodo histórico 1980-2005, según el reanálisis ERA5 y los 11 modelos CMIP5 considerados. Los mayores sesgos se observan en las regiones TSP y TSA para las temporadas DEF y MAM. Las subregiones del océano Pacífico (TNP y TSP) presentan una mayor variación entre modelos que las subregiones del océano Atlántico (NATL y TNA). A

pesar de que los modelos presentan magnitudes diferentes a las presentadas por ERA5, los ciclos anuales simulados siguen el comportamiento del reanálisis. Esto ha sido previamente identificado en otros estudios que evidencian que los modelos son capaces de representar el comportamiento del ciclo anual de precipitación sobre esas regiones, aunque tienen problemas para representar sus magnitudes, sobrestimando o subestimando los valores observados durante las temporadas lluviosas y secas (Ortega et al., 2020; Ortega & Arias, 2018). Las regiones TSP y TSA son un claro ejemplo de lo anterior, pues los modelos muestran sobrestimaciones de precipitación durante las temporadas más lluviosas. El caso contrario se observa en la región CABN, para la que la mayoría de modelos subestiman la precipitación durante la temporada lluviosa. Para la región TNP, los modelos muestran una subestimación de la precipitación durante la temporada seca, especialmente entre los meses de Febrero y Marzo.

Por otro lado, las correlaciones entre el ciclo anual de precipitación de ERA5 y los modelos CMIP5 muestran los mayores valores para la región TSP, con coeficientes superiores a 0.9 en todos los casos. Esto sugiere que la estacionalidad de la variable está mejor representada sobre esta región oceánica que en las otras cinco, a pesar de que las magnitudes son sobrestimadas con respecto a ERA5 durante la primera mitad del año.

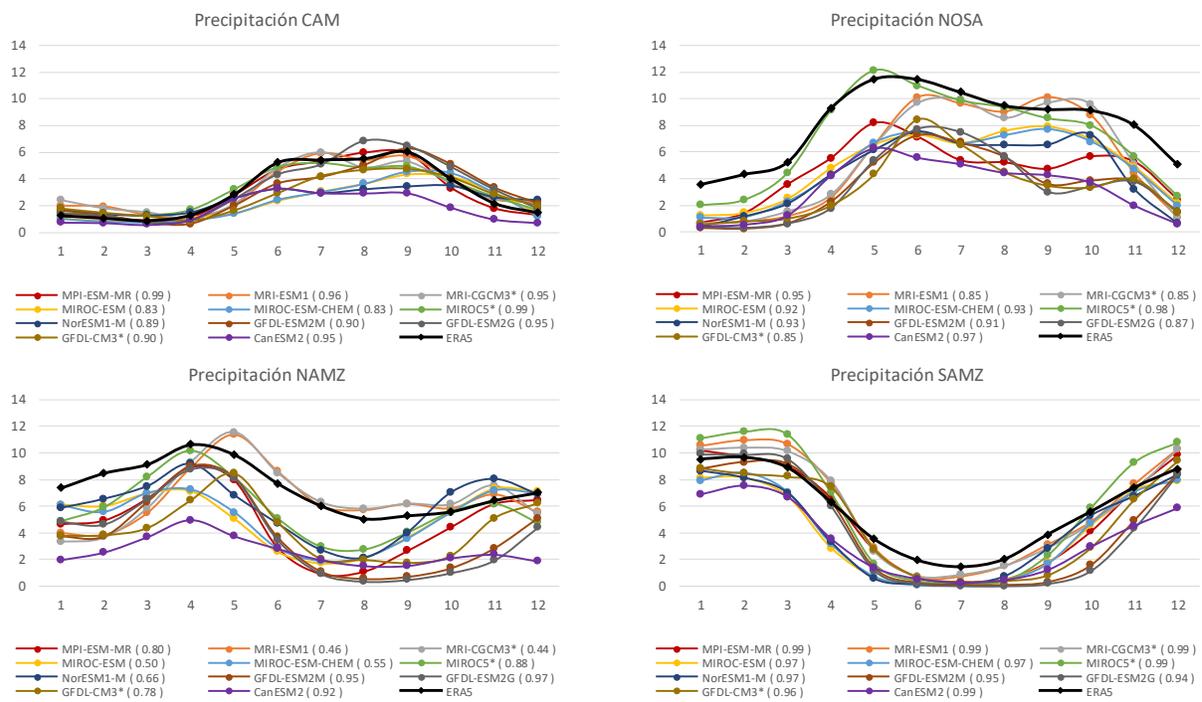


Figura 1.3. Ciclos anuales climatológicos de precipitación de ERA5 y los 11 modelos CMIP5 durante el periodo histórico 1980-2005, para las regiones continentales con mayores contribuciones de humedad atmosférica hacia el norte de Suramérica (Figura 5). Unidades en mm/d. Los valores entre paréntesis corresponden a los coeficientes de correlación entre el ciclo anual del respectivo modelo y el ciclo anual de ERA5.

La Figura 1.3 muestra el ciclo anual climatológico de precipitación para el periodo histórico 1980-2005 de las regiones continentales con mayores contribuciones de humedad atmosférica al norte de Suramérica (Figura 5).

En contraste con los ciclos anuales sobre las regiones oceánicas, los ciclos anuales de precipitación en las regiones continentales presentan mayores diferencias con respecto a ERA5. La mayoría de los modelos subestiman la precipitación en las cuatro de las regiones consideradas durante la mayor parte del año climatológico, en particular NOSA y NAMZ. En general, todos los modelos son capaces de representar de una manera más adecuada la estacionalidad de la precipitación de las regiones CAM y SAMZ, a pesar de que las magnitudes difieren respecto a los valores del reanálisis durante casi todo el año.

Los modelos presentan subestimaciones de precipitación en el norte y el sur del Amazonas. En el caso de NAMZ, las subestimaciones se presentan durante casi todo el año, siendo más notables durante los meses de Mayo a Septiembre. Para SAMZ, las subestimaciones con respecto al reanálisis están dadas principalmente para los meses de Mayo a Septiembre; incluso, algunos de los modelos presentan precipitación cercana a cero durante estos meses. Esto coincide con lo que se ha mostrado en varios estudios, que identifican que los modelos CMIP5 subestiman la precipitación en el Amazonas durante todo el año, especialmente en la temporada seca (JJA), con cero precipitación para algunos modelos (Martins et al., 2015; Yin et al., 2013). La Figura 1.3 muestra que los modelos CMIP5 subestiman la precipitación durante la temporada seca del Amazonas (Joetzier et al., 2013; Martins et al., 2015; Yin et al., 2013), a pesar de que la resolución espacial de estos modelos es más fina que sus versiones anteriores incluidas en el proyecto CMIP3 (Joetzier et al., 2013; Martins et al., 2015). El modelo canadiense CanESM2 presenta una mayor subestimación de precipitación durante todo el año climatológico para las cuatro regiones continentales consideradas, como también fue identificado por Ortega & Arias (2018). A pesar de esto, este modelo presenta una estacionalidad similar a la representada por ERA5 para las cuatro regiones continentales, con valores de correlación superiores a 0.9. Es decir, a pesar de que CanESM2 subestima fuertemente las magnitudes de precipitación en todas las regiones, representa adecuadamente los meses del año en los que se observan las temporadas lluviosas y secas.

Tal y como lo indican los coeficientes de correlación observados para el norte del Amazonas, los modelos CMIP5 presentan una mayor dificultad para representar la estacionalidad del ciclo anual de precipitación en esta región. Los únicos modelos que presentan correlaciones superiores a 0.9 son GFDL-ESM2M (0.95), GFDL-ESM2G (0.97) y CanESM2 (0.92). De manera contrastante, los modelos presentan una mejor representación de la estacionalidad de la precipitación en el sur de la Amazonía. Para esta última región, se tienen valores de correlación entre el ciclo anual de los modelos CMIP5 y el reanálisis ERA5 superiores a 0.94. En particular, se observan correlaciones de hasta 0.99 para los modelos MPI-ESM-MR, MRI-ESM1, MRI-CGCM3, MIROC5 y CanESM2. Como muestran Figueroa & Nobre (1990) y Fisch et al. (1998), la precipitación al sur del Amazonas alcanza su máximo durante el verano austral (DEF) debido a la migración meridional de la ZCIT (Marengo et al., 2018), lo cual es evidente en la representación dada por todos los modelos aquí analizados.

Para un análisis más cuantitativo de la habilidad de los modelos para representar la precipitación en la región de interés, se elaboraron diagramas de Taylor considerando como conjunto de datos de referencia el reanálisis ERA5 (Figura 1.4). Estos diagramas se obtuvieron para las cuatro temporadas del año, durante el periodo 1980-2005. Además, se consideraron tres tipos de dominios espaciales: todo el dominio de estudio (Figura 5), solo el dominio continental, y solo el dominio oceánico, para identificar en donde se presentan los mayores sesgos. En este punto es importante resaltar que aunque los reanálisis climáticos presentan grandes sesgos en la estimación de la precipitación (Ceglár et al., 2017; Essou et al., 2016; Rusticucci et al., 2014; Serreze & Hurst, 2000), por lo que generalmente se emplean bases de datos satelitales o de estaciones in situ para validar simulaciones de modelos,

en este trabajo se emplea ERA5 como conjunto de referencia con el objeto de ser consistentes en la identificación de sesgos respecto a este reanálisis, pues las estimaciones de transporte de humedad atmosférica generadas por los modelos se comparan con este mismo reanálisis.

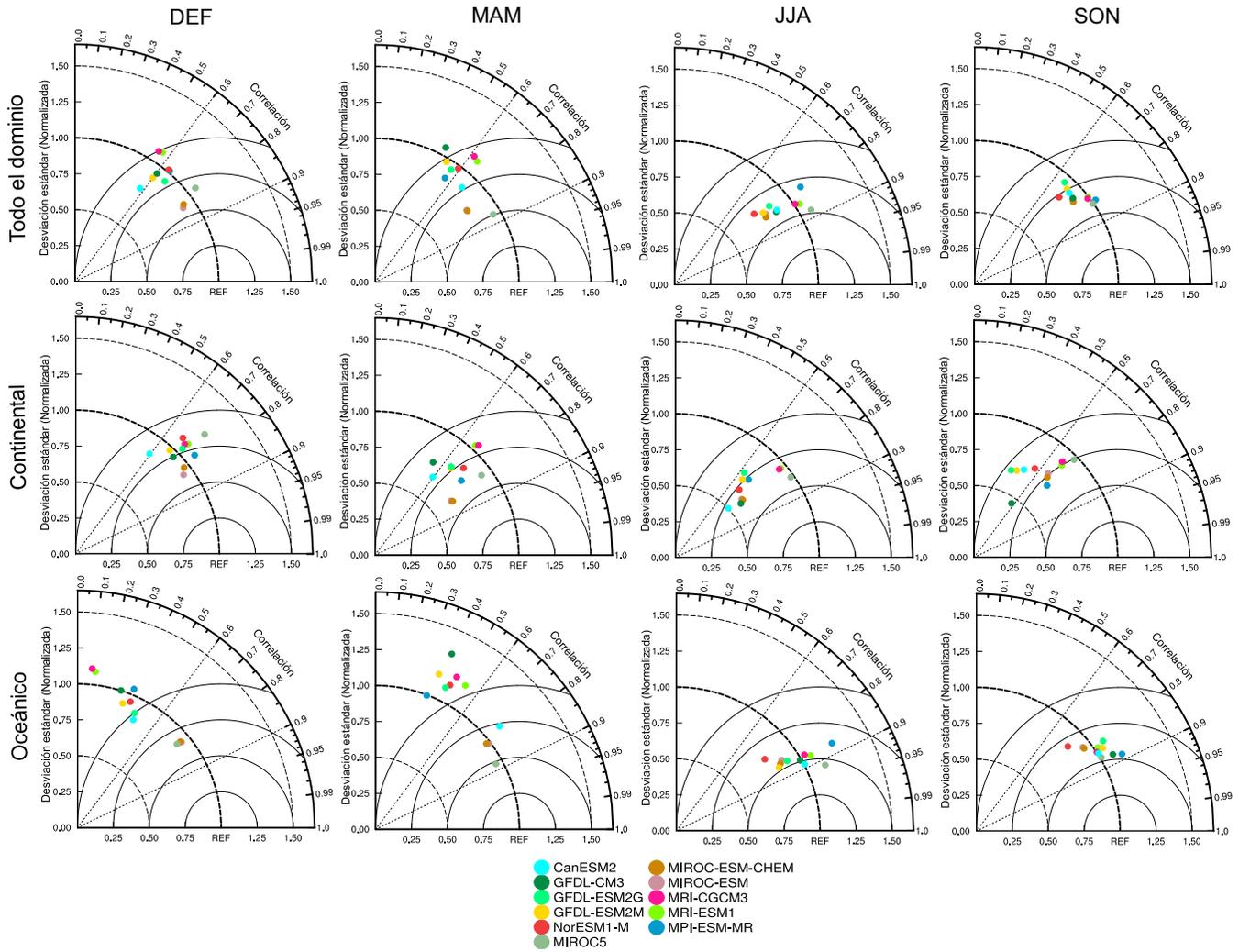


Figura 1.4. Diagramas de Taylor para la precipitación estacional para todo el dominio de estudio (panel superior), solo el dominio continental (panel central) y solo el dominio oceánico (panel inferior). El conjunto de datos de referencia es ERA5. El diagrama considera las simulaciones históricas de los 11 modelos CMIP5 durante el periodo 1980-2005.

Como fue identificado en la Figura 1.1, la mayoría de los modelos CMIP5 estudiados presentan sesgos en la representación de la precipitación durante DEF y MAM, lo cual se encuentra directamente relacionado con el sesgo de la doble ZCIT presentada por los modelos, principalmente durante estas dos temporadas. Esto coincide con lo reportado por múltiples estudios (Ortega & Arias, 2018; Rincón et al., 2018; Sierra et al., 2015). Este sesgo es más marcado para el dominio oceánico, en el que los modelos se alejan mucho más del conjunto de datos de referencia en estas temporadas, además de disminuir considerablemente la correlación espacial de los patrones

simulados por los modelos respecto a ERA5 (Figura 1.4). Los modelos de la familia MIROC (MIROC-ESM, MIROC-ESM-CHEM y MIROC5) se destacan por tener una mejor representación de la precipitación durante las temporadas DEF y MAM para el dominio oceánico. En particular, MIROC5 ha sido identificado por estudios anteriores como uno de los modelos con mejor representación de precipitación en la región (Ortega et al., 2020; Ortega & Arias, 2018). Estudios específicos para Colombia, como el de Rincón et al. (2018), identifican que MIROC5 es capaz de representar la bimodalidad de las precipitaciones sobre el país, y que en general, tiene un buen comportamiento en la representación de esta variable sobre el territorio (Rincón et al., 2018). Otros estudios sobre Colombia, como el de Bonilla-Ovallos & Mesa Sánchez (2017), en el que los autores evaluaron 16 modelos CMIP5, identificaron a MIROC5 como uno de los mejores 5 modelos en la representación de la precipitación sobre nuestra región (Bonilla-Ovallos & Mesa Sánchez, 2017). Además, Sierra et al. (2018) encontraron que MIROC5 representa medianamente bien el Chorro de Chocó sobre el oeste de Colombia (Sierra et al., 2018). Palomino-Lemus et al. (2015), también encontraron, por medio de un método de reducción estadística por componentes principales, que MIROC5 detecta adecuadamente una región más húmeda al oeste de Colombia, tal y como lo muestran las observaciones (Palomino-Lemus et al., 2015). Además, Ortega et al. (2020), encontraron que su versión más reciente dentro del proyecto CMIP6, MIROC6, continúa siendo uno de los modelos que posee mejor representación del clima presente sobre Centro y Sur América (Ortega et al., 2020).

Como se mencionó, la buena representación de la precipitación dada por los modelos de la familia MIROC, en especial por MIROC5, es bien conocida. Uno de los puntos que aporta a esta característica y que se verifica en este estudio, es la buena representación de la ZCIT que poseen dichos modelos (Figura 1.1 – Paneles (e), (f) y (g)), evidenciando que durante las temporadas en las cuales se presentan mayores sesgos, estos lo hacen mejor que el resto.

En general, dentro de las implicaciones detectadas por diferentes estudios en relación con el sesgo de la doble ZCIT en los modelos de circulación general, especialmente entre DEF y MAM, son conocidas aquellas que demuestran que esta mala representación conlleva a variados sesgos en la captura de algunos aspectos que resultan del acople oceánico. Un ejemplo se presenta en el estudio de Sierra et al. (2018), quienes identifican que aquellos modelos que poseen los mayores sesgos en los patrones de recurvamiento de los vientos alisios que dan origen a la circulación superficial del Chorro del Chocó, además comparten características similares en sesgos de precipitación sobre algunas regiones del norte de Suramérica, en la posición de la ZCIT y en el gradiente interhemisférico de temperatura y precipitación (Sierra et al., 2018).

Durante las temporadas JJA y SON, los diagramas de Taylor presentan mayores similitudes entre los dominios continental y oceánico, en comparación con las otras dos temporadas, mostrando además que los modelos se encuentran más cerca del conjunto de datos de referencia sobre el dominio oceánico, con una mayor correlación espacial en los patrones simulados con respecto a ERA5.

Considerando el análisis anterior, es posible identificar que la familia de modelos MIROC tiene la mejor representación de la precipitación en la región de estudio, con un mejor desempeño para las regiones oceánicas respecto a las continentales.

1.2.1.2. Evaporación

La evaporación es el proceso mediante el cual el agua pasa del estado sólido a gaseoso (Gimeno et al., 2012; Yongqiang Zhang et al., 2016). Esta variable representa una importante fuente de humedad local para la atmósfera (Martins et al., 2015). Si la evaporación no ocurriera, las temperaturas globales serían mucho más altas. Por tanto, comprender las proyecciones de esta variable es elemental para proyectar las temperaturas atmosféricas futuras. Esta variable es clave en los ciclos globales de energía y agua, además es el segundo componente de mayor magnitud del ciclo hidrológico (después de la precipitación) y el segundo de mayor magnitud del balance energético superficial (después de la radiación neta) (Zhang et al., 2016).

La evaporación climatológica entre los años 1980 y 2005 representada por los modelos CMIP5 sobre nuestra región de estudio se muestra en la Figura 1.5. Se observan patrones similares para los 11 modelos estudiados, con valores más altos de evaporación sobre los océanos que sobre los continentes, lo cual es consistente con la dinámica de la variable sobre estas masas. La mayor parte del vapor de agua se genera en los océanos, donde la evaporación excede la precipitación (Trenberth et al., 2011), permitiendo que una parte de la humedad sea transportada atmosféricamente hacia los continentes, logrando influir en los procesos hidrológicos terrestres y generando impactos directos sobre las poblaciones humanas (Levang & Schmitt, 2015; Oki, 2006).

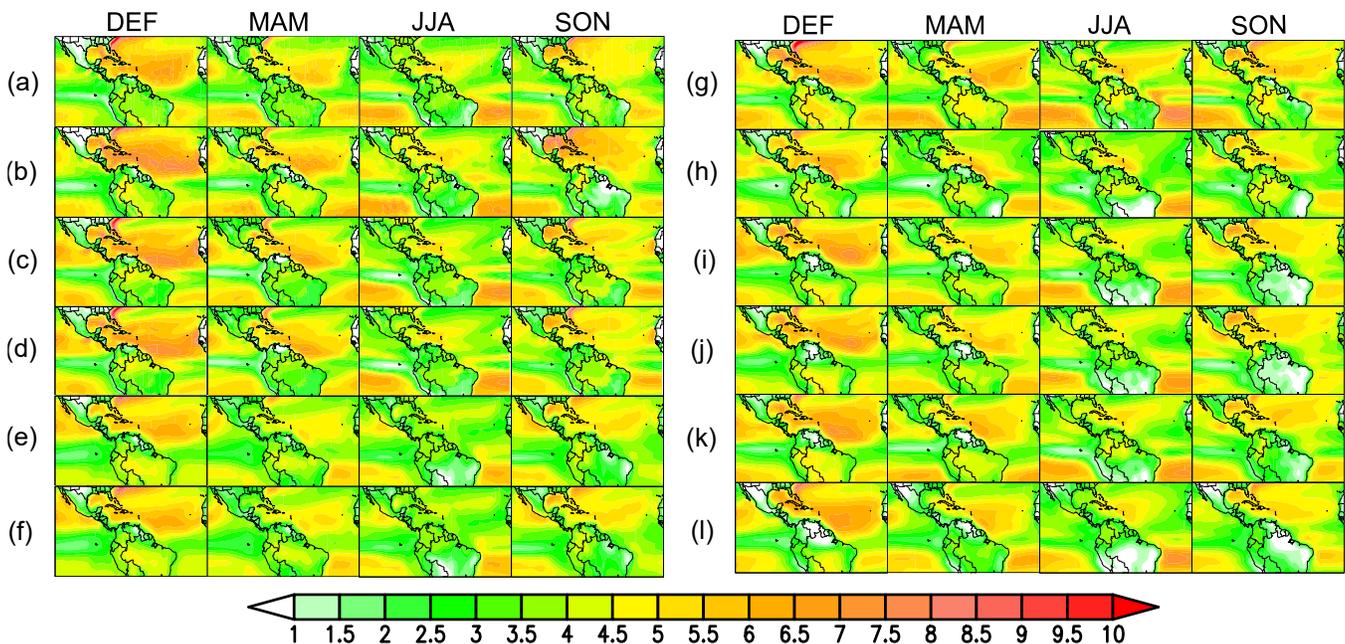


Figura 1.5. Promedios estacionales de evaporación durante el período histórico 1980-2005, para (a) ERA5 y 11 modelos CMIP5: (b) MPI-ESM-MR, (c) MRI-ESM1, (d) MRI-CGCM3, (e) MIROC-ESM, (f) MIROC-ESM-CHEM, (g) MIROC5, (h) NorESM1-M, (i) GFDL-ESM2M, (j) GFDL-ESM2G, (k) GFDL-CM3, y (l) CanESM2. Unidades en mm/d.

Los modelos que representan mayores valores de evaporación para el período histórico son MPI-ESM-MR, MRI-ESM1 y MRI-CGCM3, especialmente para la temporada DEF. En general, el modelo CanESM2 presenta los menores valores de evaporación sobre el dominio continental durante las cuatro temporadas, en especial sobre

el sur del Amazonas en JJA. La mayoría de los modelos presentan valores bajos de evaporación durante JJA, la cual coincide con la temporada seca del Amazonas.

La Figura 1.6 y la Figura 1.7 muestran los ciclos anuales climatológicos de evaporación para las subregiones oceánicas y continentales consideradas, respectivamente, durante el periodo histórico 1980-2005. Para la región TSA se observa que el modelo MIROC5 sobrestima la evaporación en los meses de Mayo y Junio, principalmente. Para la región CABN, por su parte, se observa la sobrestimación marcada de la variable por parte del modelo MPI-ESM-MR, en especial al inicio y al final del año.

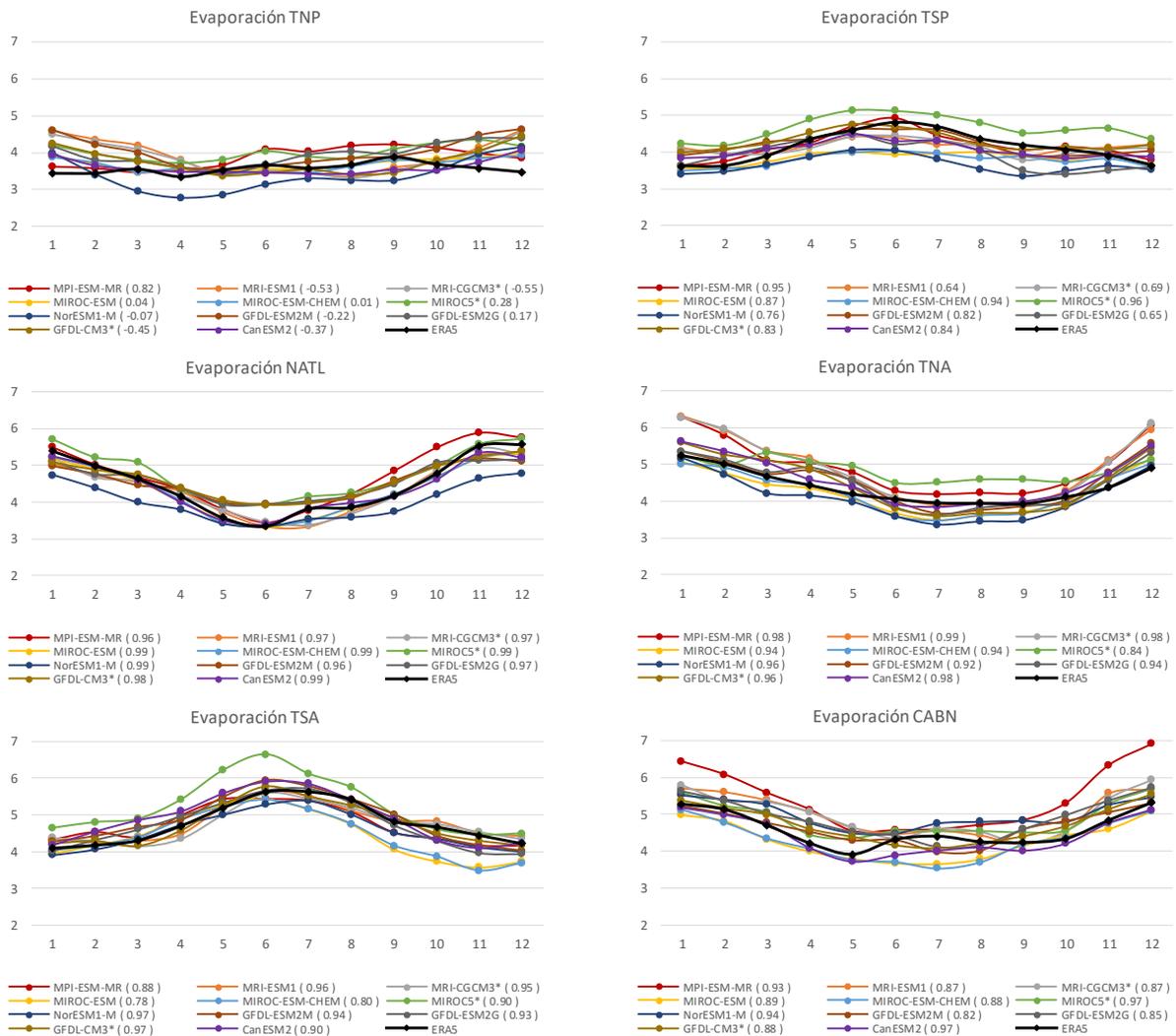


Figura 1.6. Ciclos anuales climatológicos de evaporación de ERA5 y los 11 modelos CMIP5 durante el periodo histórico 1980-2005, para las regiones oceánicas con mayores contribuciones de humedad atmosférica hacia el norte de Suramérica (Figura 5). Unidades en mm/d. Los valores entre paréntesis corresponden a los coeficientes de correlación entre el ciclo anual del respectivo modelo y el ciclo anual de ERA5.

En cuanto a las regiones continentales (Figura 1.7), se observa que la mayoría de los modelos presentan una variación estacional más marcada sobre la región NOSA que lo representado por ERA5, excepto en los modelos de la familia MIROC (MIROC-ESM, MIROC-ESM-CHEM y MIROC5), los cuales tienen un comportamiento similar a lo representado por el reanálisis durante todo el año.

Para las regiones Amazónicas (NAMZ y SAMZ) se presentan diferencias marcadas entre los modelos y el reanálisis. En SAMZ, la mayoría de los modelos muestra una subestimación en la temporada seca (JJA) y en los meses de transición de temporada seca a húmeda (SON). Además, algunos de los modelos poseen un desfase con respecto al reanálisis, con valores mínimos en Agosto, Septiembre y Octubre (GFDL-ESM2M y GFDL-ESM2G). El comportamiento de desfase de la evaporación del modelo GFDL-ESM2G durante los meses de Agosto, Septiembre y Octubre sobre SAMZ ha sido reportado en otros estudios (Martins et al., 2015). A pesar de lo anterior, los modelos generalmente son capaces de representar la estacionalidad de esta variable, con valores máximos durante la temporada de lluvias y valores mínimos en la estación seca del Amazonas, coincidiendo además con lo observado para la variable precipitación. Las observaciones muestran que la evaporación sobre la cuenca del Amazonas varía entre 3.5 mm/d y 4 mm/d (Shuttleworth, 1988), dependiendo de la temporada del año y de la región en específico (Marengo et al., 2018). De lo anterior se concluye que los modelos CMIP5 logran captar mediamente este rango de valores sobre la cuenca (tanto NAMZ como SAMZ), sin embargo, y como ya se ha mencionado, se presenta una marcada subestimación durante la temporada seca en el sur del Amazonas, con valores de hasta 0 mm/d para algunos modelos.

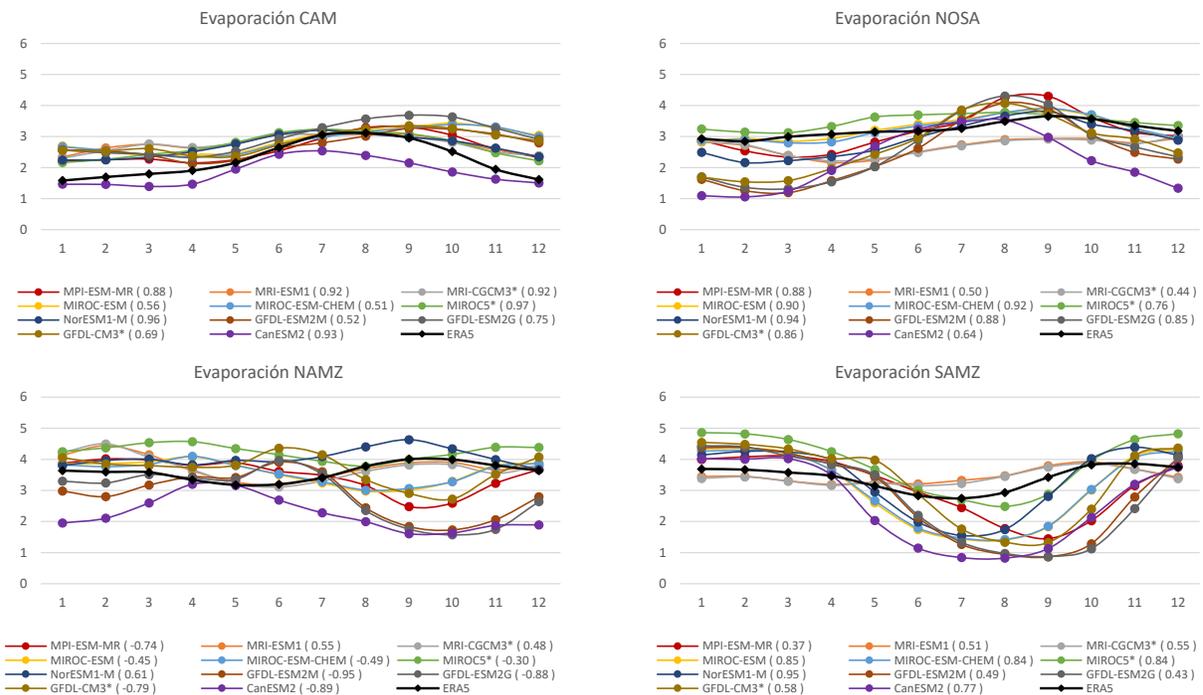


Figura 1.7. Ciclos anuales climatológicos de evaporación de ERA5 y los 11 modelos CMIP5 durante el periodo histórico 1980-2005, para las regiones continentales con mayores contribuciones de humedad atmosférica hacia el norte de Suramérica (Figura 5). Unidades en mm/d. Los valores entre paréntesis corresponden a los coeficientes de correlación entre el ciclo anual del respectivo modelo y el ciclo anual de ERA5.

La región norte de la Amazonía es sin duda la que mayores discrepancias posee en la representación de la evaporación entre los diferentes modelos, llegando a tener incluso un coeficiente de correlación de -0.3 entre el ciclo anual simulado por el modelo MIROC5 y el simulado por ERA5. En comparación con la precipitación, los ciclos anuales de evaporación representados por los modelos poseen menores correlaciones con respecto a ERA5, tanto en las regiones oceánicas como en las continentales, llegando a ser incluso negativas. Esto sugiere que los modelos CMIP5 considerados poseen sesgos importantes en la representación de la estacionalidad de la evaporación sobre el dominio de estudio.

Es ampliamente conocido que el cálculo de la evaporación por diferentes métodos mantiene un desafío para la comunidad científica y de que no es una tarea trivial. En Suramérica existen pocos métodos observacionales que ayuden a un mejor entendimiento de esta variable, por lo que en la actualidad sus estimaciones se basan, principalmente, en productos de modelos de superficie, datos de teledetección y datos de reanálisis (Sörensson & Ruscica, 2018). Sörensson & Ruscica (2018) concluyen que existen grandes incertidumbres en la estimación de la evaporación sobre toda la región. Además, resaltan que dado a que los mecanismos que impulsan la evapotranspiración durante la estación seca sobre el sur del Amazonas aún no son bien conocidos, los productos que se basan en diferentes teorías de estos mecanismos producen resultados diferentes (Sörensson & Ruscica, 2018), como en el caso de los modelos de circulación general. Incluso, los demás productos como reanálisis y teledetección también presentan marcadas incertidumbres de evaporación sobre la selva Amazónica (Sörensson & Ruscica, 2018).

Christoffersen et al. (2014) también discuten la dificultad que presentan los modelos en la simulación de la evaporación sobre el Amazonas y el Cerrado debido al poco conocimiento de los mecanismos que regulan el suministro de agua a la vegetación y su demanda hídrica (Christoffersen et al., 2014). Específicamente, estudian mecanismos como la profundidad de las raíces y el agua subterránea como fenómenos indicadores claves en el suministro de agua de la vegetación, y otros como la conductancia estomática y la eficiencia del uso del agua como fenómenos indicadores de la demanda de agua de la vegetación, evidenciando que existen factores complejos que aún no están bien integrados en los modelos globales (Christoffersen et al., 2014). Estos autores concluyen que se hace necesario seguir avanzando en el entendimiento e integración de las respuestas y retroalimentaciones biológicas a los procesos del ciclo hidrológico, para mejorar nuestra comprensión de la relación entre la vegetación y el clima en los trópicos (Christoffersen et al., 2014).

Dentro de nuestro estudio, una de las implicaciones más evidentes del sesgo en la representación de la evaporación sobre las regiones Amazónicas tiene que ver con las simulaciones históricas de reciclaje de humedad sobre ambas regiones, tanto para el reciclaje de agua precipitable como para el reciclaje de precipitación. En ambos casos, esta variable es subestimada por los modelos, principalmente a partir de la segunda mitad del año, siendo más evidente para el reciclaje de agua precipitable (ver Capítulo II: Figura 2.6 y Figura 2.8: NAMZ a NAMZ; Figura 2.10 y Figura 2.12: SAMZ a SAMZ).

La Figura 1.8 presenta los diagramas de Taylor estacionales para la evaporación durante el periodo histórico 1890-2005, para los 11 modelos CMIP5 considerados, con respecto a línea base dada por ERA5. De nuevo se observa que los modelos tienen una mejor representación de la variable sobre los océanos durante todo el año climatológico, en comparación con el dominio continental. Esto podría estar asociado a las parametrizaciones particulares de cada modelo en cuanto a las interacciones superficie-atmósfera y la dificultad que se presenta en la representación precisa de dichas dinámicas, especialmente sobre regiones continentales (Dirmeyer et al.,

2013b, 2013a; Koster et al., 2002; Lorenz et al., 2016). Lo anterior se sustenta en que la influencia del tipo de cobertura y las demás características de superficie de una región determinan los flujos e interacciones suelo-atmósfera; de este modo, el estado de la superficie terrestre tiene un efecto directo sobre los flujos superficiales y, por ende, sobre el clima local y regional (Alves et al., 2017; Dirmeyer et al., 2013b; Haghtalab et al., 2020; Llopart et al., 2018; Medvigy et al., 2011; Spracklen et al., 2012; Spracklen & Garcia-Carreras, 2015). Además, a escalas de tiempo interestacional a interanual, la humedad que se encuentra en el suelo juega un papel fundamental en la humedad disponible en la atmósfera (Dirmeyer et al., 2013b). Se observan mayores sesgos en la simulación de la evaporación durante la temporada SON, tanto para el dominio oceánico como continental. En general, se observa que el modelo MIROC5 tienen la mejor representación de la evaporación para todo el dominio de estudio, durante casi todas las temporadas del año.

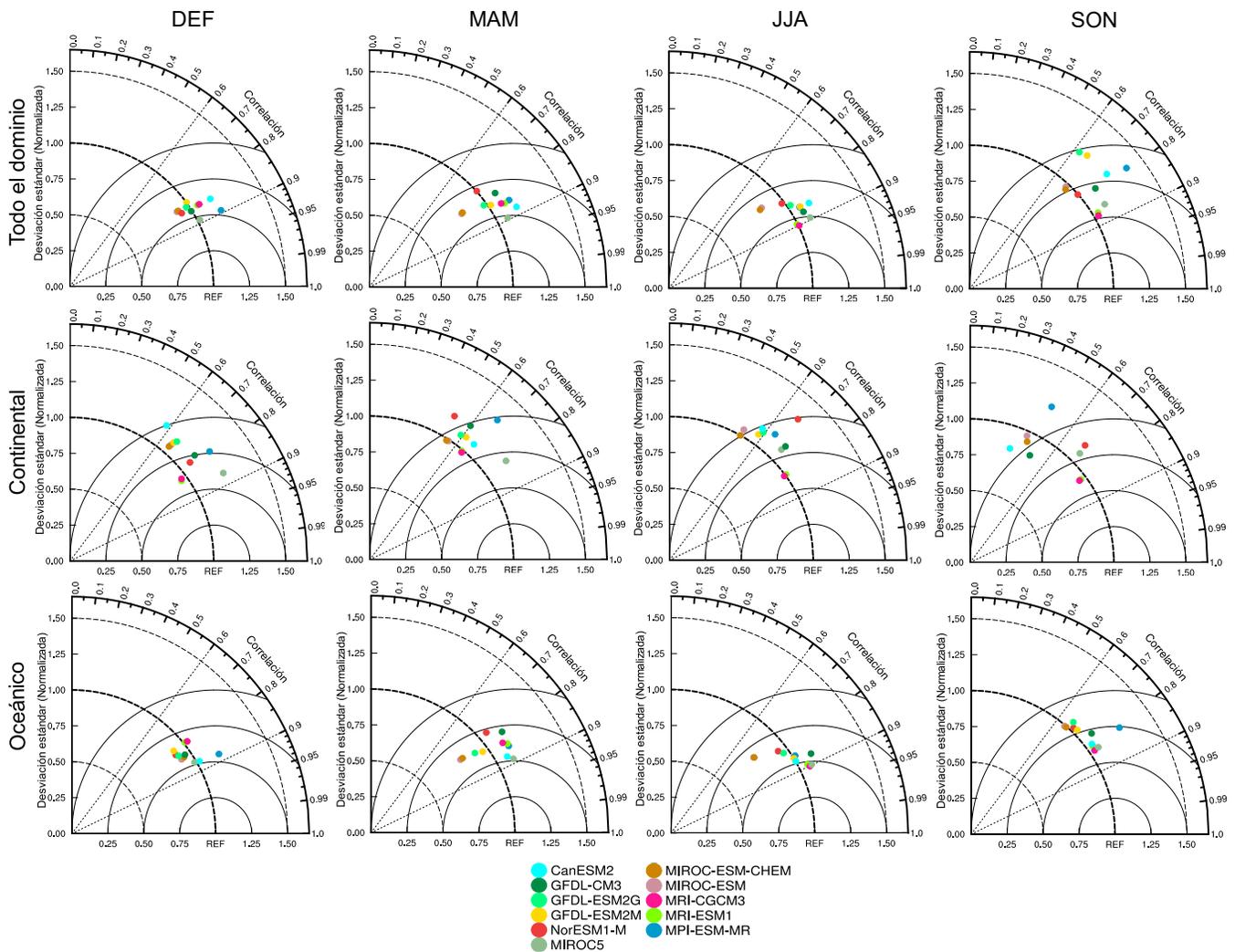


Figura 1.8. Diagramas de Taylor para la evaporación estacional para todo el dominio de estudio (panel superior), solo el dominio continental (panel central) y solo el dominio oceánico (panel inferior). El conjunto de datos de referencia es ERA5. El diagrama considera las simulaciones históricas de los 11 modelos CMIP5 durante el periodo 1980-2005.

De manera general, los modelos presentan sesgos para representar precipitación (Figura 1.4) y evaporación (Figura 1.8). Los sesgos presentados sobre todo el dominio para la precipitación están asociados principalmente por la dificultad en la representación de la variable sobre el océano, relacionada a la ocurrencia de una doble ZCIT durante las temporadas DEF y MAM. Estos sesgos sobre el océano se han vinculado a problemas de los modelos para representar retroalimentaciones y procesos asociados a la nubosidad en el Pacífico y Atlántico tropical (Li & Xie, 2014). Por su parte, Los sesgos presentados sobre todo el dominio para la evaporación están dados principalmente por los sesgos de la variable sobre los continentes, los cuales pueden estar asociados a dificultades en los modelos para representar procesos de interacción suelo-atmósfera. Sin embargo, se resalta que sobre todo el dominio son mayores los sesgos presentados para la precipitación que para la evaporación de manera general (comparar Figura 1.4 y Figura 1.8 – Todo el dominio). Lo anterior tiene relación con la dispersión de los modelos en la representación de la precipitación sobre el océano, los cuales se alejan mucho más del conjunto de datos de referencia durante DEF y MAM, que en el caso de los sesgos de evaporación sobre los continentes. Así, estos resultados se ven reflejados sobre todo el dominio de estudio, generando mayores sesgos, en general, que para el caso de la evaporación.

1.2.1.3. Agua precipitable

El vapor de agua posee una gran importancia en la generación de efecto invernadero en la atmósfera terrestre (Wang et al., 2016). Este ejerce una influencia directa en el calentamiento global, al retroalimentar de forma positiva el aumento de la temperatura, en especial las temperaturas superficiales del mar (Trenberth, 2011). Un mayor calentamiento de la atmósfera superficial y las masas oceánicas y continentales implica mayores tasas de evaporación, además de una más alta capacidad de la atmósfera para almacenar humedad, dada por la relación de Clausius-Clapeyron. Esta relación indica que por cada grado centígrado de calentamiento, la atmósfera adquirirá un 7% más en su capacidad de almacenamiento de humedad (Trenberth, 2011).

La Figura 1.9 muestra los campos estacionales promedio de agua precipitable para el periodo histórico 1980-2005 representados por ERA5 y los 11 modelos CMIP5 aquí evaluados. Se observa que los modelos MRI-ESM1 y MRI-CGCM3 simulan los valores más elevados de agua precipitable sobre el dominio estudio. El comportamiento del agua precipitable dado por los modelos reproduce la estacionalidad de la ZCIT simulada para la precipitación (Figura 1.1). Los mayores valores se observan sobre las regiones ubicadas en la franja tropical mientras que los valores más bajos se observan principalmente en los extra-trópicos. Los modelos CMIP5 muestran estimados de agua precipitable entre 0 y 60 mm sobre toda el área de estudio, al igual que el reanálisis ERA5.

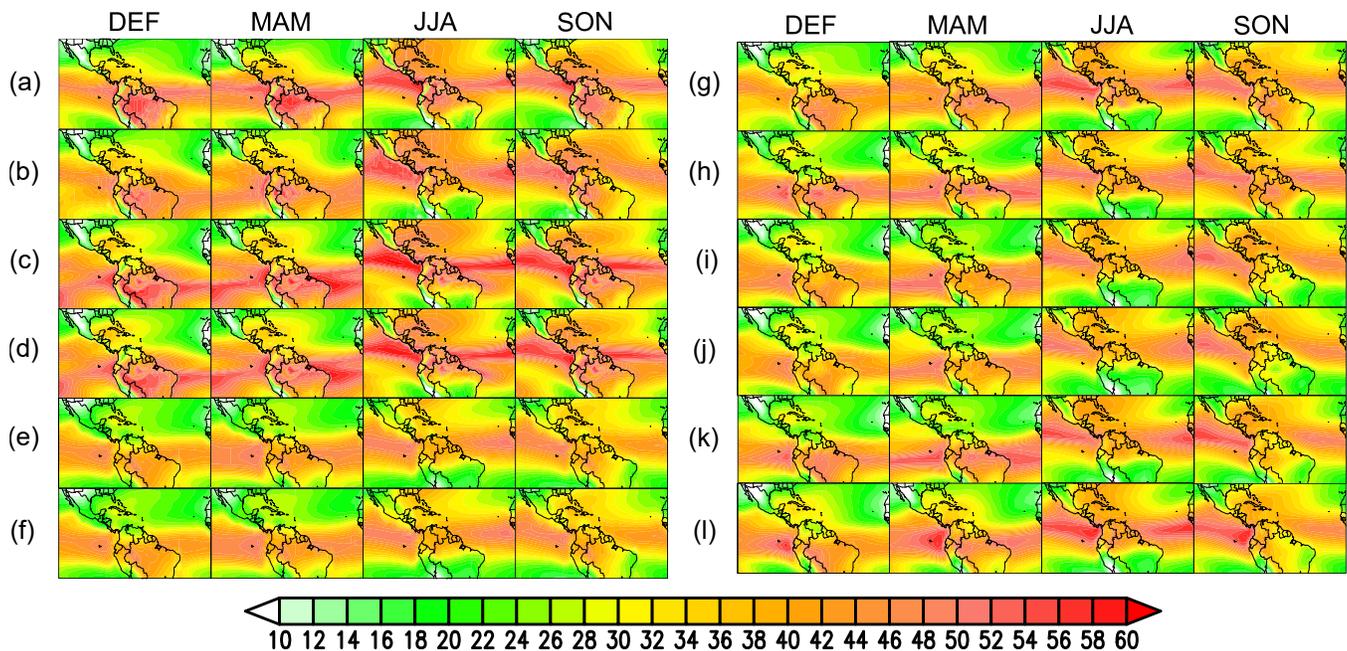


Figura 1.9. Promedios estacionales de agua precipitable durante el periodo histórico 1980-2005, para (a) ERA5 y 11 modelos CMIP5: (b) MPI-ESM-MR, (c) MRI-ESM1, (d) MRI-CGCM3, (e) MIROC-ESM, (f) MIROC-ESM-CHEM, (g) MIROC5, (h) NorESM1-M, (i) GFDL-ESM2M, (j) GFDL-ESM2G, (k) GFDL-CM3, y (l) CanESM2. Unidades en mm.

La Figura 1.10 y la Figura 1.11 presentan los ciclos anuales climatológicos de agua precipitable para las subregiones oceánicas y continentales consideradas, respectivamente, durante el periodo histórico 1980-2005. En comparación con la precipitación y la evaporación, los patrones estacionales de agua precipitable simulados por los modelos tienen una mayor concordancia que los simulados por ERA5. Para algunas regiones, como por ejemplo TNP y CABN, se tienen subestimaciones de agua precipitable durante casi todo el año. Es de resaltar que los modelos de la familia MRI (MRI-ESM y MRI-CGCM3) muestran mayores estimaciones de agua precipitable sobre las regiones oceánicas durante casi todo el año.

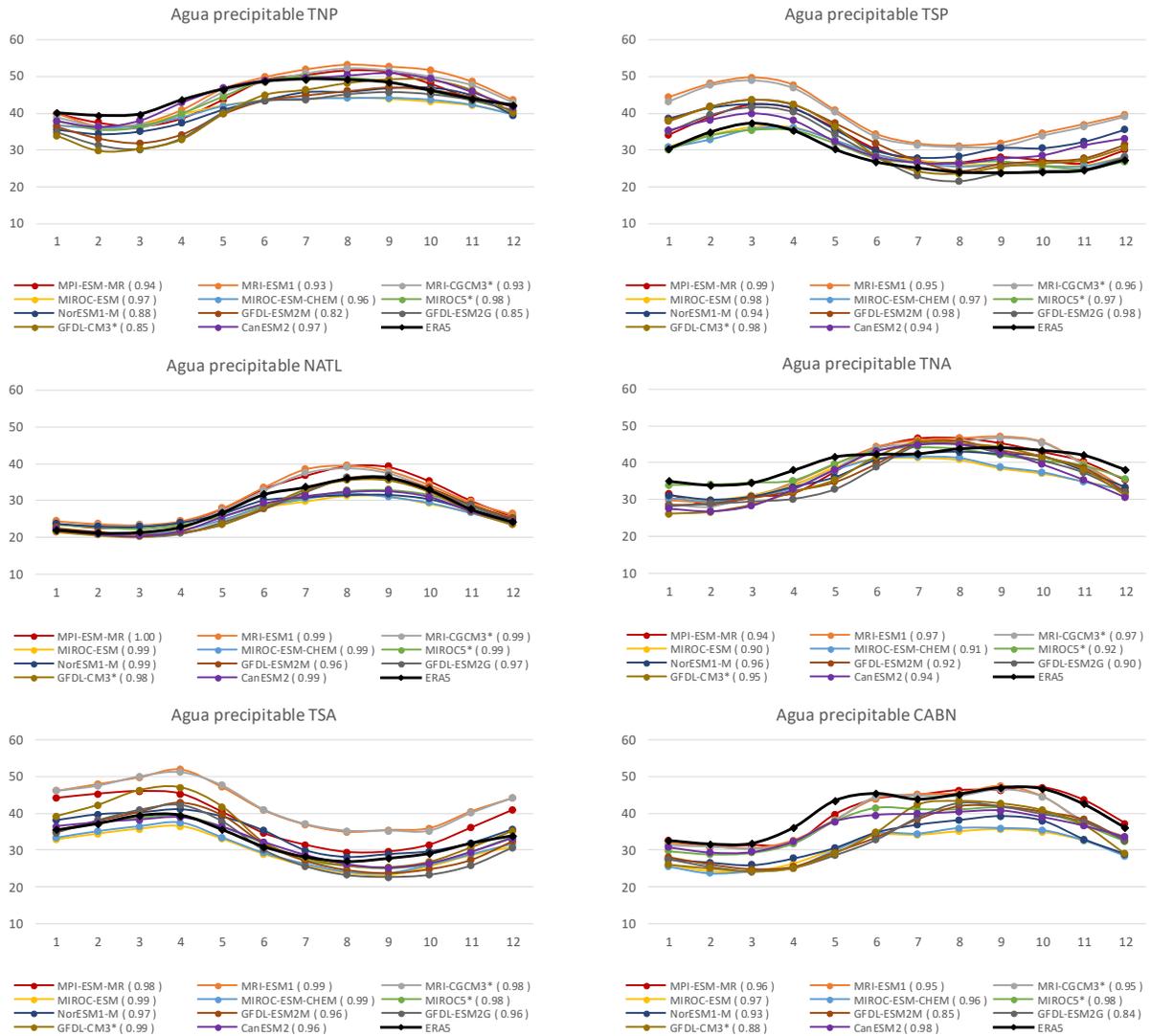


Figura 1.10. Ciclos anuales climatológicos de agua precipitable de ERA5 y los 11 modelos CMIP5 durante el periodo histórico 1980-2005, para las regiones oceánicas con mayores contribuciones de humedad atmosférica hacia el norte de Suramérica (Figura 5). Unidades en mm. Los valores entre paréntesis corresponden a los coeficientes de correlación entre el ciclo anual del respectivo modelo y el ciclo anual de ERA5.

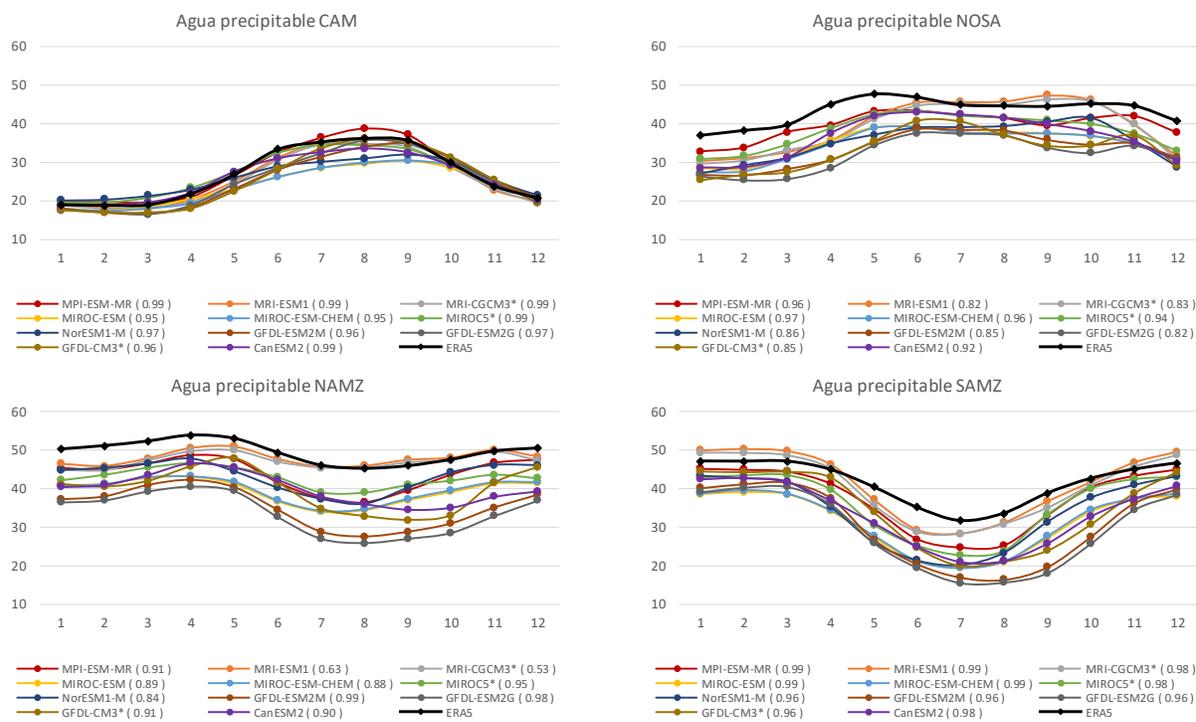


Figura 1.11. Ciclos anuales climatológicos de agua precipitable de ERA5 y los 11 modelos CMIP5 durante el periodo histórico 1980-2005, para las regiones continentales con mayores contribuciones de humedad atmosférica hacia el norte de Suramérica (Figura 5). Unidades en mm. Los valores entre paréntesis corresponden a los coeficientes de correlación entre el ciclo anual del respectivo modelo y el ciclo anual de ERA5.

Para las cuatro regiones continentales se observa que los modelos presentan subestimaciones de agua precipitable. A pesar de esto, los modelos poseen una buena representación de la estacionalidad de la variable, además aciertan en el comportamiento la temporada seca en el sur del Amazonas (JJA), aunque con subestimaciones marcadas respecto a ERA5, lo que coincide con las presentadas por los modelos para la precipitación (Figura 1.3) y la evaporación (Figura 1.7) durante esta temporada.

La Figura 1.12 muestra los diagramas de Taylor estacionales para agua precipitable, durante el periodo 1980-2005. En general, los modelos considerados tienen una mejor representación del agua precipitable que para las variables precipitación y evaporación. Los diagramas de Taylor muestran mejores correlaciones espaciales en los patrones simulados de esta con respecto a ERA5 durante todas las estaciones del año y para todos los dominios considerados. Además, los modelos CMIP5 poseen una relación entre desviaciones estándar más cercana a uno para el agua precipitable que para las demás variables analizadas (precipitación (Figura 1.4), evaporación (Figura 1.8) y P-E (Figura 1.14)). En general, MIROC5 resulta ser uno de los mejores modelos en la representación de esta variable sobre todo el dominio, aunque MPI-ESM-MR también exhibe un buen comportamiento.

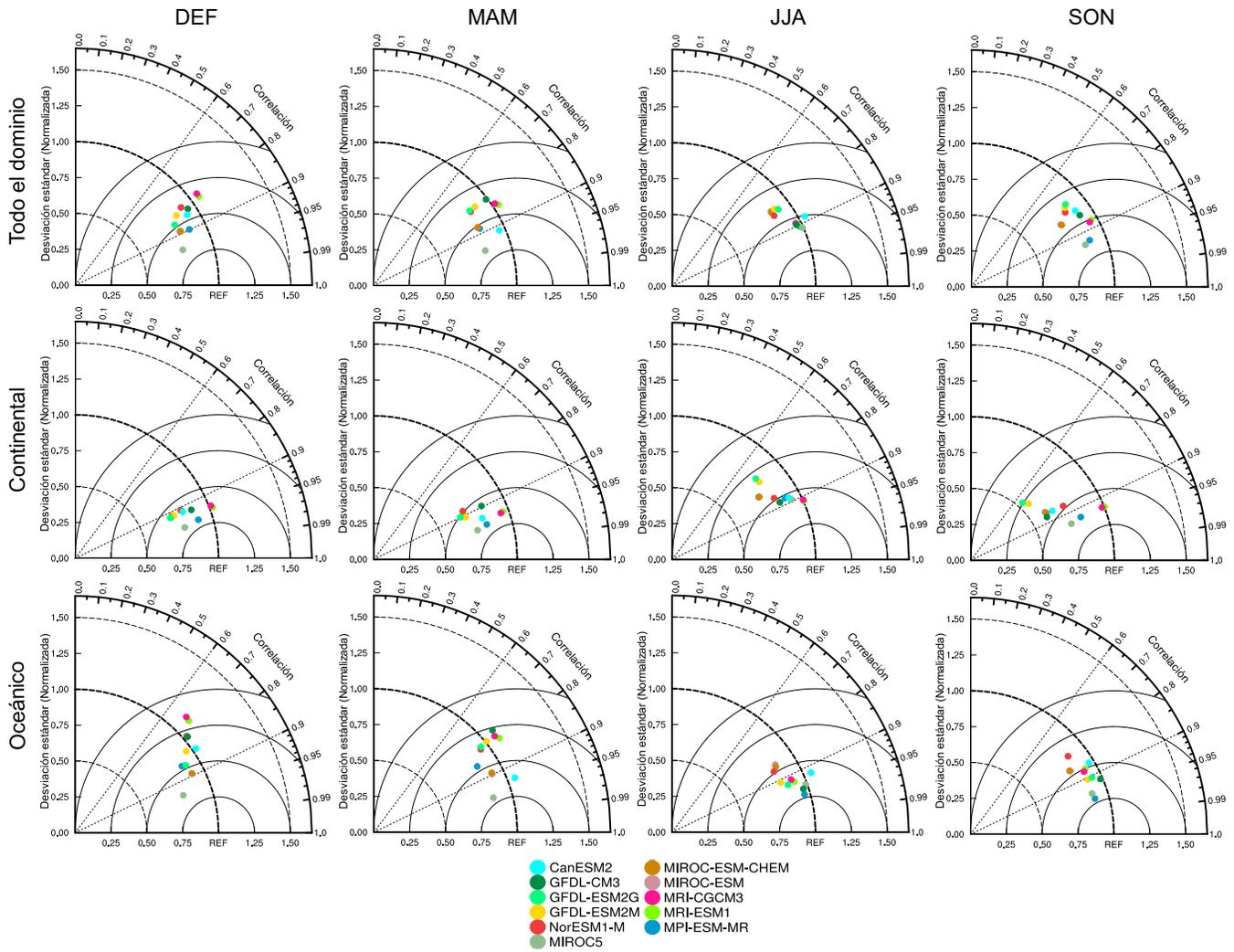


Figura 1.12. Diagramas de Taylor para agua precipitable estacional para todo el dominio de estudio (panel superior), solo el dominio continental (panel central) y solo el dominio oceánico (panel inferior). El conjunto de datos de referencia es ERA5. El diagrama considera las simulaciones históricas de los 11 modelos CMIP5 durante el periodo 1980-2005.

1.2.1.4. P-E (precipitación menos evaporación)

El ciclo energético planetario cambia principalmente con el incremento de los GEI (Trenberth et al., 2011). A su vez, el ciclo del agua hace parte del ciclo de la energía por medio del enfriamiento por evaporación y calentamiento latente de la atmósfera (Trenberth et al., 2011). La ecuación de la humedad atmosférica cuando la expresamos como el flujo integrado en la vertical es (Trenberth et al., 2011):

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \nabla \cdot \frac{1}{g} \int_0^{P_s} \mathbf{v} q dp = E - P \quad (12)$$

donde q es la humedad específica, w es el agua precipitable (columna de vapor de agua total), E es la evaporación de la superficie y P es la tasa neta de precipitación en la superficie (Trenberth et al., 2011). La estimación y análisis de muchos de los componentes que hacen parte del ciclo hidrológico han sido bastante explorados (Trenberth et al., 2011). Sin embargo, las estimaciones y análisis de E y P de manera independiente tienen incertidumbres considerables (Trenberth et al., 2011).

Cuando hablamos de la variable P-E nos referimos al término que acopla los balances de humedad entre el suelo y la atmósfera. Las ecuaciones para el balance de humedad en la atmósfera y para el balance de humedad en el suelo dan cuenta de que P-E acopla ambos balances al ser un término común para ambas ecuaciones. La naturaleza del ciclo hidrológico está dada por las interacciones suelo-atmosfera, así como sus retroalimentaciones y acoplamientos. P-E da cuenta de las regiones que actúan como fuentes y sumideros de humedad atmosférica.

Considerando la importancia de la estimación de P-E, la Figura 1.13 muestra los patrones estacionales climatológicos de esta variable simulados por ERA5 y los 11 modelos CMIP5, para la región de estudio y durante el periodo histórico 1980-2005. Valores positivos de P-E (es decir, $P > E$) hacen referencia a una región que actúa como sumidero de vapor de agua. Por su parte, valores negativos (es decir, $P < E$) hacen referencia a una región fuente de vapor de agua. Además, el término P-E representa la convergencia de humedad atmosférica en una región.

Como se ha expuesto en este trabajo, las fuentes de humedad atmosférica se pueden dividir en oceánicas y continentales. La dinámica y temporalidad de estas fuentes depende de las características asociadas con la región de estudio, tales como la temporada del año, la ubicación geográfica, las propiedades biofísicas de la zona, la radiación incidente, entre otras. Las fuentes de humedad oceánicas tienen una gran relevancia en el aporte de humedad local y hacia los continentes (Gimeno, et al., 2012). Las fuentes de humedad continentales, como por ejemplo los bosques, juegan un papel relevante en la humedad atmosférica a nivel local y regional (Costa & Pires, 2010; Gimeno et al., 2012; Makarieva et al., 2013; Makarieva & Gorshkov, 2007; Spracklen & Garcia-Carreras, 2015; Zemp et al., 2014, 2017). En particular, el Amazonas es una región caracterizada por actuar como fuente de humedad en algunas épocas del año. En la Figura 1.13 se observa que la selva Amazónica actúa como una fuente importante de humedad atmosférica durante la temporada JJA, lo cual es representado por la mayoría de los modelos, excepto CanESM2. Como definimos anteriormente, cuando una región es una fuente de humedad atmosférica significa que sobre esta se evapora más de lo que se precipita. La Figura 1.1 y la Figura 1.5 muestran que tanto la precipitación como la evaporación sobre el sur del Amazonas presentan menores valores durante la temporada JJA; sin embargo, los valores de evaporación son mayores que los valores de precipitación, sugiriendo que esta región es una fuente de humedad durante dicha temporada, como lo muestra P-E (Figura 1.13). Por otro lado, los patrones estacionales de P-E evidencian la migración latitudinal de la ZCIT, identificada por los valores positivos en la región tropical, lo que demuestra que la convergencia de humedad atmosférica en superficie corresponde a valores positivos de esta variable.

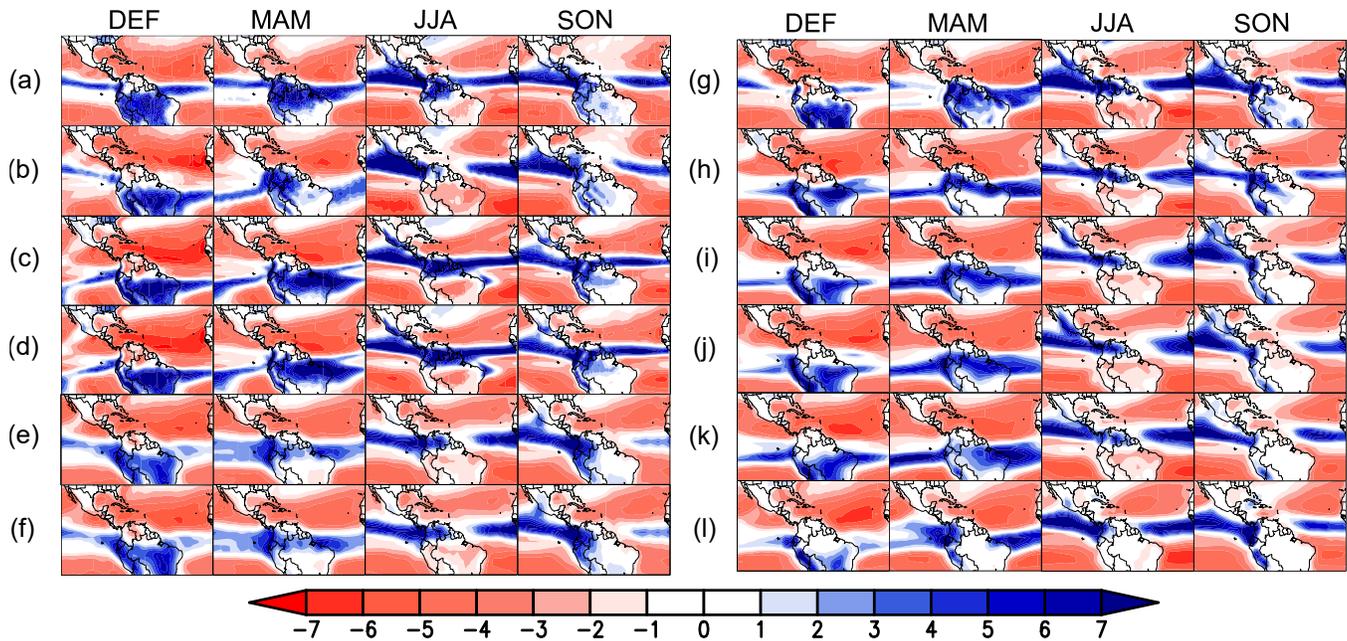


Figura 1.13. Promedios estacionales de P-E durante el período histórico 1980-2005, para (a) ERA5 y 11 modelos CMIP5: (b) MPI-ESM-MR, (c) MRI-ESM1, (d) MRI-CGCM3, (e) MIROC-ESM, (f) MIROC-ESM-CHEM, (g) MIROC5, (h) NorESM1-M, (i) GFDL-ESM2M, (j) GFDL-ESM2G, (k) GFDL-CM3, y (l) CanESM2. Unidades en mm/d. Los colores rojos representan fuentes de humedad atmosférica ($P < E$). Los colores azules representan sumideros de humedad atmosférica ($P > E$).

La Tabla 1.1 presenta el consenso entre modelos CMIP5 sobre el comportamiento de las regiones analizadas, en cuanto a si actúan como fuentes o sumideros de vapor de agua durante las diferentes temporadas del año, según las simulaciones históricas durante el periodo 1980-2015. En general, los modelos CMIP5 representan las regiones fuente y sumidero de humedad de forma consistente con ERA5. Por ejemplo, para la región TSP se observa que todos los modelos identifican esta región como una fuente de humedad durante todas las temporadas del año (100% de acuerdo entre modelos para DEF, JJA y SON; 72,7% de acuerdo para MAM), consistentemente con lo identificado por ERA5. En contraste, para la región TNP se observa que el 72,7% de los modelos simulan que esta región es una fuente de humedad durante la temporada MAM, en oposición a ERA5, que identifica esta región como sumidero. Situaciones similares se presentan para las regiones TNA (SON), CABN (SON), NOSA (DEF) y NAMZ (JJA).

Tabla 1.1. Consenso entre modelos CMIP5 para regiones fuente y sumidero de humedad atmosférica durante el periodo histórico 1980-2005. Los números indican el porcentaje de acuerdo entre modelos. El color rojo indica que la región es fuente de humedad atmosférica ($P < E$). El color azul indica que la región es sumidero de humedad atmosférica ($P > E$). Los números blancos indican que existe desacuerdo entre los modelos y ERA5 respecto a si la región es fuente o sumidero de humedad.

Región	Porcentaje P-E Histórico			
	DEF	MAM	JJA	SON
TNP	100.0	72.7	100.0	100.0
TSP	100.0	72.7	100.0	100.0
NATL	100.0	100.0	100.0	100.0
TNA	100.0	100.0	100.0	72.7
TSA	90.9	54.5	100.0	100.0
CABN	100.0	100.0	100.0	90.9
CAM	100.0	100.0	100.0	100.0
NOSA	100.0	100.0	100.0	100.0
NAMZ	100.0	100.0	81.8	72.7
SAMZ	100.0	81.8	100.0	100.0

De la Tabla 1.1 podemos concluir que, según lo esperado, la mayoría de las regiones oceánicas se comportan como fuente de humedad durante la mayor parte del año. Sin embargo, se presentan algunas excepciones, por ejemplo para TNP durante JJA y SON o TNA durante JJA, temporadas en las cuales se identifica que estas regiones actúan como sumideros de humedad. Las regiones continentales, por el contrario, son en general sumideros de humedad, con consensos altos entre modelos. En el caso de NAMZ y SAMZ se observa un comportamiento como fuentes de humedad durante JJA (temporada seca); sin embargo, ERA5 identifica a NAMZ como sumidero de humedad en esta temporada, contrario a lo identificado por los modelos. En el caso de NOSA es interesante ver que todos los modelos tienen consenso en su comportamiento como fuente de humedad para la temporada DEF mientras que ERA5 identifica esta región como sumidero de humedad.

La Figura 1.14 muestra los diagramas de Taylor estacionales para la variable P-E, durante el periodo histórico 1980-2005. Si comparamos el dominio continental con el dominio oceánico, se observa que durante las temporadas DEF y MAM se tiene una mejor representación de P-E sobre el continente, según lo indica una menor dispersión entre los puntos que representan los modelos, mientras que para las temporadas JJA y SON se tiene una mejor representación de la variable P-E sobre el dominio oceánico. En general, los modelos de la familia MIROC (MIROC-ESM, MIROC-ESM-CHEM y MIROC5) poseen la mejor representación de P-E sobre el dominio de estudio, mientras que los modelos de la familia MRI (MRI-ESM1 y MRI-CGCM3) presentan los mayores sesgos en esta variable con respecto al reanálisis ERA5.

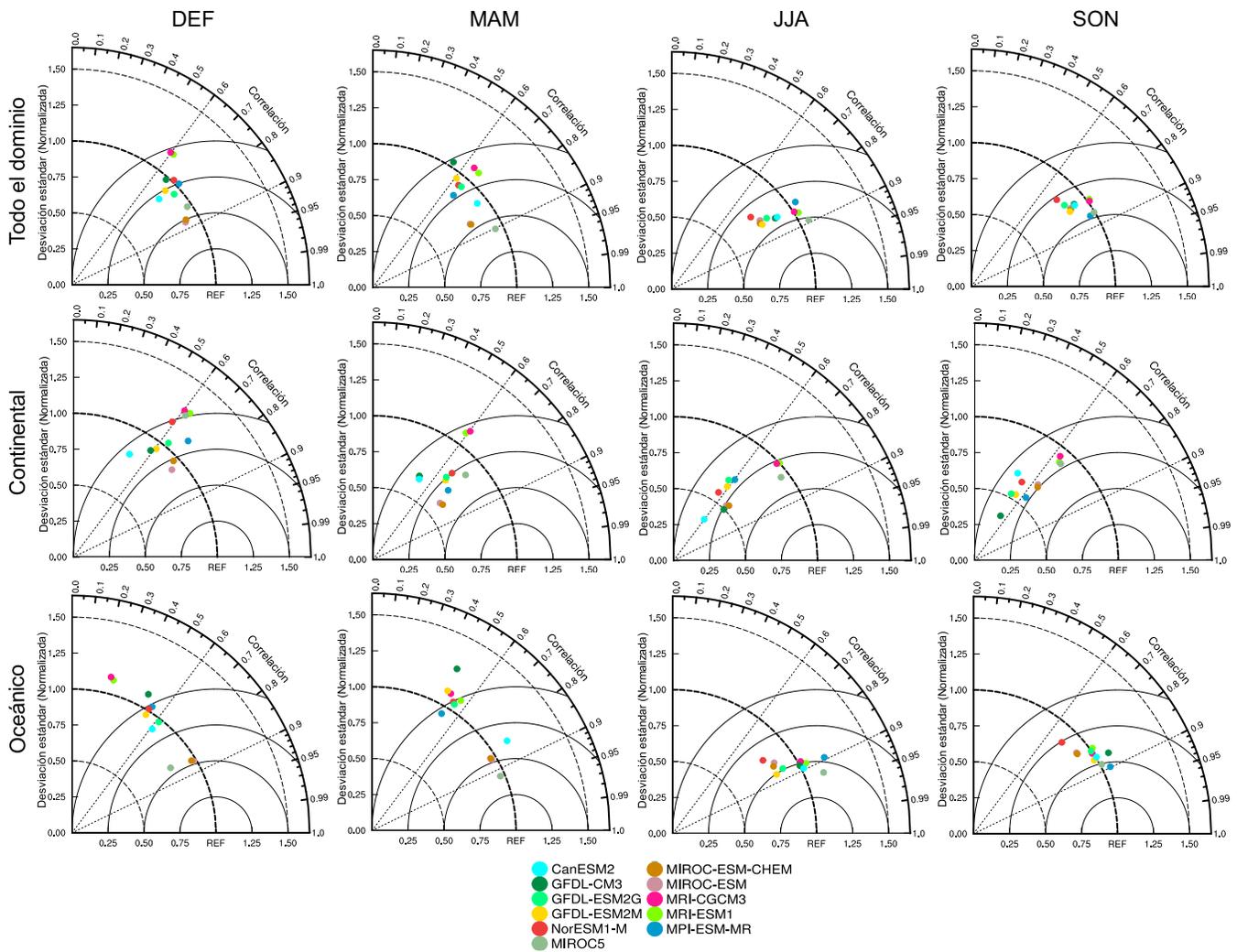


Figura 1.14. Diagramas de Taylor para P-E estacional para todo el dominio de estudio (panel superior), solo el dominio continental (panel central) y solo el dominio oceánico (panel inferior). El conjunto de datos de referencia es ERA5. El diagrama considera las simulaciones históricas de los 11 modelos CMIP5 durante el periodo 1980-2005.

Los diagramas de Taylor presentados en la Figura 1.14 se relacionan directamente con los diagramas de Taylor para la precipitación (Figura 1.4) y la evaporación (Figura 1.8). La precipitación es mejor representada por los modelos CMIP5 para el dominio continental durante DEF y MAM. Para las temporadas JJA y SON, la precipitación es ligeramente mejor representada por los modelos sobre el dominio oceánico. Por su parte, la evaporación es bien representada sobre el dominio oceánico durante todas las temporadas del año. Esto significa que el sesgo observado en P-E sobre los océanos se presenta, principalmente, debido a los sesgos en precipitación para estas regiones, mientras que el sesgo en P-E observado sobre el dominio continental se da a causa de las falencias de los modelos en la representación de la evaporación en zonas continentales, probablemente relacionado con la representación de procesos de interacción suelo-atmósfera. En general, la evaporación sobre el dominio oceánico es mejor representada que la precipitación por los modelos CMIP5.

Contrastando la Figura 1.4 con la Tabla 1.1 podemos concluir que a pesar de que muchos consensos son altos en cuanto al comportamiento de una región como fuente o sumidero de humedad durante DEF y MAM, tanto para las regiones oceánicas como continentales, se tiene una mayor consistencia en los resultados de estos consensos durante las temporadas JJA y SON, en las cuales la nube de puntos de modelos CMIP5 en los diagramas de Taylor están más cercanos a la referencia para los dos dominios. Es decir, como la variable P-E es mejor representada por los modelos durante estas dos últimas temporadas del año, se podría asumir una mayor consistencia en la interpretación sobre el comportamiento de la región como fuente o sumidero de humedad atmosférica durante el periodo histórico. En el caso de los océanos, la incertidumbre durante DEF y MAM se da a causa de los sesgos en precipitación, mientras que sobre los continentes está dada debido a los sesgos en evaporación.

1.2.2. Proyecciones para finales del siglo XXI (2070-2100)

Teniendo en cuenta los diagramas de Taylor analizados previamente, se seleccionaron cinco modelos para el análisis de las proyecciones para finales del siglo XXI de las variables de entrada a DRM. Tres de estos modelos son los que poseen una mejor representación de la variable P-E (Figura 1.14), correspondientes a la familia MIROC (MIROC-ESM, MIROC-ESM-CHEM y MIROC5). Los dos modelos restantes poseen la peor representación de esta variable, respecto al reanálisis ERA5, correspondientes a la familia MRI (MRI-ESM1 y MRI-CGCM3), los cuales exhiben sus mayores sesgos, especialmente en las temporadas DEF y MAM y sobre los tres dominios de estudio. Consideramos la variable P-E como punto de referencia para esta selección de modelos debido a que interrelaciona dos de las variables más importante en el balance de humedad atmosférica, además de ser indicativo de la presencia de fuentes y sumideros de humedad atmosférica.

1.2.2.1. Precipitación

El cambio climático afecta y afectará a futuro de diferentes maneras las regiones alrededor del mundo (Palomino-Lemus et al., 2017; Reyer et al., 2017). La precipitación es una de las variables más estudiadas dentro del fenómeno del cambio climático. Entender cómo podría comportarse es fundamental para enfrentar los desafíos a futuro en cuanto a la gestión y toma de decisiones. Además, nos encaramos a un gran reto, ya que por su naturaleza, esta variable es sumamente cambiante, tanto en el tiempo como en el espacio (Trenberth, 2011). Su intensidad, su frecuencia y su tipo afectan el medio ambiente y la sociedad (Trenberth, 2011). El cambio climático tiene una influencia comprobada sobre esta variable y las proyecciones del IPCC en su quinto informe (IPCC, 2014) sugieren que se presentarán tanto aumentos como disminuciones sobre América del Sur, dependiendo de la región, aunque con elevadas incertidumbres (IPCC, 2014; Palomino-Lemus et al., 2017). Eventos extremos influenciados directamente por el comportamiento de la precipitación son cada vez más frecuentes (Donat et al., 2016; Westra et al., 2014). De hecho, la manera más probable en la que el cambio climático puede afectar a las sociedades actuales y futuras es por medio de eventos extremos (O’Gorman & Schneider, 2009; Trenberth et al., 2015; Westra et al., 2014). Específicamente, cambios importantes debidos al calentamiento global deben ser estudiados en detalle, ya que estos podrían ser más devastadores en algunos lugares del globo que en otros (Palomino-Lemus et al., 2017).

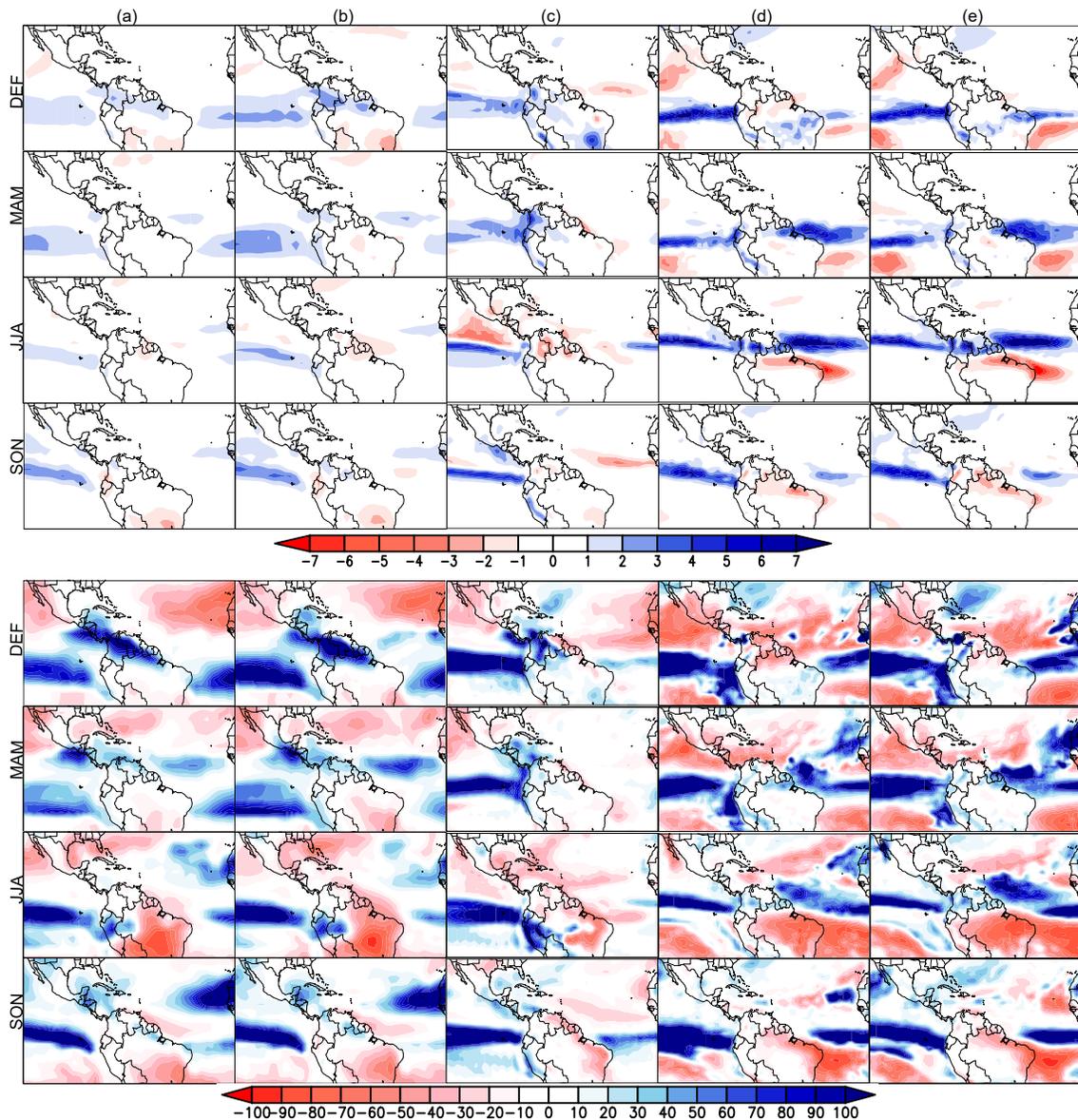


Figura 1.15. Cambios proyectados de precipitación estacional entre finales del siglo XXI (2070-2100) y el periodo histórico (1980-2005) según los 5 modelos CMIP5 seleccionados: (a) MIROC-ESM; (b) MIROC-ESM-CHEM; (c) MIROC5; (d) MRI-ESM1; (e) MRI-CGCM3. Panel superior: Diferencias dadas en cambio absoluto [mm/d]. Panel inferior: Diferencias dadas en porcentaje de cambio respecto al periodo histórico [%].

Datos históricos revelan que, aunque los valores medios de precipitación global no han cambiado considerablemente en las últimas décadas, sí lo ha hecho la ocurrencia de eventos extremos (Donat et al., 2016; Trenberth, 2011; Westra et al., 2014). Es decir, aunque la precipitación promedio global cambia a una tasa relativamente baja, eventos extremos como sequías, olas de calor, inundaciones, entre otros, son cada vez más frecuentes e intensos alrededor del globo (Trenberth, 2011). Las proyecciones de precipitación para finales del siglo XXI sobre Latinoamérica y el Caribe muestran cambios relativamente pequeños, y los modelos sugieren un desacuerdo sobre la proyección de este cambio en la mayoría de las regiones terrestres (Reyer et al., 2017). Lo

anterior puede evidenciarse en los resultados aquí presentados (Figura 1.15), con marcadas diferencias entre modelos en cuanto a los cambios proyectados para la variable. Aumentos en la precipitación media en países de la costa del Pacífico, como Perú, Ecuador y Colombia, son algunas de las proyecciones de los modelos CMIP5 considerados, además de cambios marcados en la precipitación estacional (Reyer et al., 2017).

En la Figura 1.15 se puede observar la diferencia climatológica entre finales del siglo XXI (2070-2100) y el periodo histórico (1980-2005) de precipitación para los tres modelos que, según los diagramas de Taylor, representan de manera más acertada la variable P-E (MIROC-ESM, MIROC-ESM-CHEM, MIROC5), y para los dos modelos con mayores sesgos en su representación (MRI-ESM1, MRI-CGCM3). Los mayores cambios de precipitación se proyectan en la zona tropical, donde, en general, el agua precipitable presenta valores más elevados (Figura 1.9). Los mayores aumentos en precipitación se proyectan sobre la región tropical, especialmente para los modelos de la familia MRI. Por su parte, los tres modelos MIROC proyectan diferencias menores entre finales del siglo XXI y el periodo histórico, que se dan principalmente sobre las regiones tropicales del océano Pacífico. Las diferencias más marcadas, tanto de aumento como de disminución de la precipitación para finales de siglo, son las proyectadas por los modelos MRI-ESM1 y MRI-CGCM3.

Palomino-Lemus et al. (2017), quienes realizaron una reducción de escala de las simulaciones y proyecciones de modelos CMIP5 para la región de estudio, identificaron que los mayores cambios de precipitación se proyectan bajo el escenario RCP8.5, especialmente sobre el centro y sureste de Brasil (Palomino-Lemus et al., 2017). En general, las proyecciones dadas por los modelos climáticos para el sur del Amazonas sugieren estaciones secas más largas y reducciones de precipitación al este de la región durante todo el año (Boisier et al., 2015; Fu et al., 2013; IPCC, 2014; Longo et al., 2018; Malhi et al., 2008; Sena & Magnusdottir, 2020). La Figura 1.15 muestra que los 5 modelos proyectan reducciones porcentuales de precipitación sobre la región Amazónica durante la temporada JJA, para finales del siglo XXI.

1.2.2.2. Evaporación

La influencia directa del calentamiento global sobre la evaporación es clave dentro del ciclo hidrológico. En un mundo más cálido se tendrá una mayor evaporación, además de una mayor capacidad de la atmósfera para retener humedad (Trenberth, 2011). A pesar de esto, aún existe una gran incertidumbre en cómo será o cambiará esta variable en las diferentes regiones del planeta. Esto a su vez, se debe a que las tasas de evaporación de la superficie terrestre son altamente heterogéneas y difíciles de determinar, en especial sobre los continentes. La cobertura de la superficie juega un papel fundamental en el comportamiento de esta variable. Es decir, el calentamiento de la superficie terrestre, aunado con el cambio de cobertura de las diferentes regiones del planeta, influyen directamente en cómo se comporta y se comportará dicha variable atmosférica.

La Figura 1.16 presenta los cambios proyectados entre finales del siglo XXI (2070-2100) y el periodo histórico (1980-2005) para la evaporación, según los 5 modelos CMIP5 evaluados en esta sección. Los modelos de la familia MIROC proyectan una reducción de evaporación sobre la región Amazónica, principalmente durante las temporadas JJA y SON. Las mayores reducciones las proyectan los modelos MIROC-ESM y MIROC-ESM-CHEM. Por el contrario, los modelos MRI proyectan aumentos de evaporación en el Amazonas para estas temporadas, excepto en el este de Brasil durante SON. Sobre los océanos se observa un mayor acuerdo entre modelos en

cuanto al aumento de evaporación proyectada para finales del siglo XXI, lo que es consistente con un mundo más cálido en el que se tendrán mayores tasas de evaporación sobre las masas de agua.

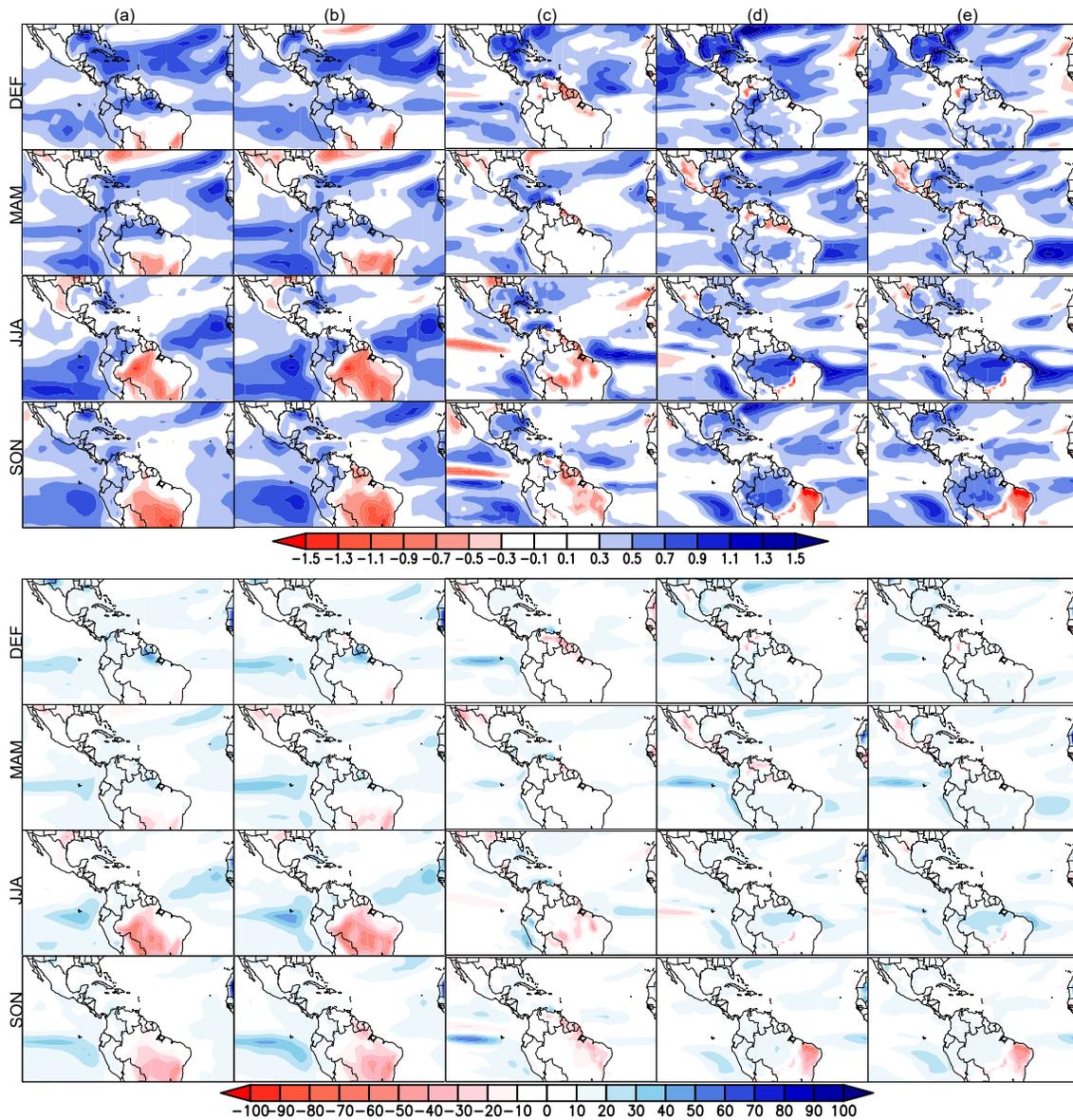


Figura 1.16. Cambios proyectados de evaporación estacional entre finales del siglo XXI (2070-2100) y el periodo histórico (1980-2005) según los 5 modelos CMIP5 seleccionados: (a) MIROC- ESM; (b) MIROC-ESM-CHEM; (c) MIROC5; (d) MRI-ESM1; (e) MRI-CGCM3. Panel superior: Diferencias dadas en cambio absoluto [mm/d]. Panel inferior: Diferencias dadas en porcentaje de cambio respecto al periodo histórico [%].

1.2.2.3. Agua precipitable

El vapor de agua es el GEI más abundante en la atmósfera (Zhang & Zhao, 2019). Los aumentos de agua precipitable no sólo se han evidenciado durante las últimas décadas, sino que se además se proyecta que sus

valores aumentarán para el futuro, según los modelos climáticos de circulación general (Zhang & Zhao, 2019). La simulación correcta del vapor de agua es de vital importancia para estos modelos (Zhang & Zhao, 2019). Además, ha sido claramente establecido que existe una relación directa entre el agua precipitable y la temperatura, dada por la relación de Clausius-Clapeyron (Trenberth, 2011). Valores más altos de las temperaturas globales generarán mayores cantidades de agua precipitable en la atmósfera. Sobre los trópicos y subtrópicos, la relación entre la precipitación y el agua precipitable es bastante alta, ya que los patrones de lluvias tienden a imitar los patrones de agua precipitable (Trenberth, 2011). Lo anterior hace que el estudio del comportamiento de esta variable a futuro sobre los trópicos, y bajo escenarios de cambio climático, tome relevancia. Estudios científicos han puesto en evidencia que el aumento de vapor de agua en la atmósfera se ha dado a raíz del calentamiento global (Trenberth, 2011). Por ejemplo, se han identificado tendencias de aumento de 0.45 mm/década de agua precipitable sobre el hemisferio norte, para el periodo 1973-2006 (Durre et al., 2009). Además, se ha reconocido que la influencia humana es una de las principales causas de este incremento en la concentración de vapor de agua en la atmósfera (Trenberth, 2011). Estudios concretos, como el de Zhang & Zhao (2019), evalúan cambios proyectados de agua precipitable sobre China según los modelos de CMIP5, y su relación con la temperatura del aire cerca de la superficie (Zhang & Zhao, 2019). Estos autores concluyen que la mayoría de los modelos CMIP5 evaluados son capaces de simular las tendencias de aumento de agua precipitable observadas desde 1970 en China, y además resaltan que algunos de ellos pueden simular las variaciones y tendencias a largo plazo sobre el país, como es el caso de CanESM2, GFDL-CM3 y MIROC5, los cuales son utilizados en el presente estudio (Zhang & Zhao, 2019).

La Figura 1.17 muestra los cambios proyectados entre finales del siglo XXI (2070-2100) y el periodo histórico (1980-2005) para el agua precipitable, según los 5 modelos seleccionados y analizados en esta sección. Las proyecciones sugieren aumentos de agua precipitable en todo el dominio de estudio, consistente con lo esperado de la relación Clausius-Clapeyron. Los modelos MIROC-ESM y MIROC-ESM-CHEM proyectan los mayores aumentos de agua precipitable para finales del siglo XXI (2070-2100). Los modelos MIROC5, MRI-ESM1 y MRI-CGCM3, aunque también sugieren aumentos de esta variable, presentan menores cambios. Además, los incrementos proyectados de agua precipitable sobre los trópicos son consistentes con las proyecciones de aumentos en la precipitación sobre esta banda latitudinal (Figura 1.15), especialmente sobre los océanos. Esto demuestra, nuevamente, que el comportamiento de la precipitación se relaciona directamente con el agua precipitable sobre las regiones tropicales (Trenberth, 2011).

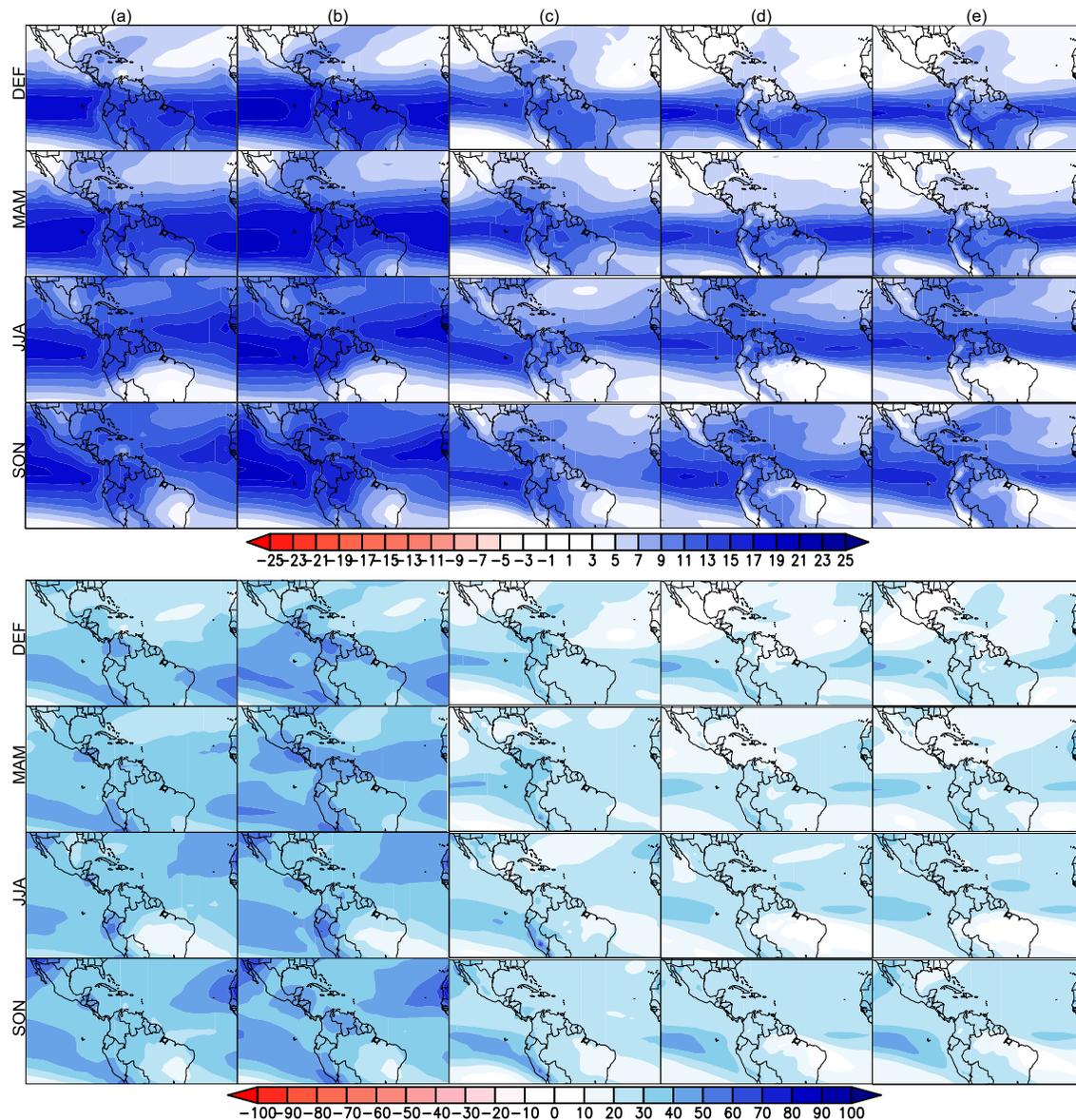


Figura 1.17. Cambios proyectados de agua precipitable estacional entre finales del siglo XXI (2070-2100) y el periodo histórico (1980-2005) según los 5 modelos CMIP5 seleccionados: (a) MIROC-ESM; (b) MIROC-ESM-CHEM; (c) MIROC5; (d) MRI-ESM1; (e) MRI-CGCM3. Panel superior: Diferencias dadas en cambio absoluto [mm]. Panel inferior: Diferencias dadas en porcentaje de cambio respecto al periodo histórico [%].

1.2.2.4. Acuerdo entre modelos sobre proyecciones para finales del siglo XXI

La Figura 1.18 resume los cambios proyectados para finales del siglo XXI para cada una de las variables analizadas, expresados como porcentaje de consenso entre modelos. De manera general, se observa que para las cuatro temporadas del año existe un alto consenso entre modelos en cuanto al aumento de evaporación sobre las regiones oceánicas y de agua precipitable sobre todo el dominio de estudio. A continuación se discuten estos resultados para cada una de las temporadas del año.

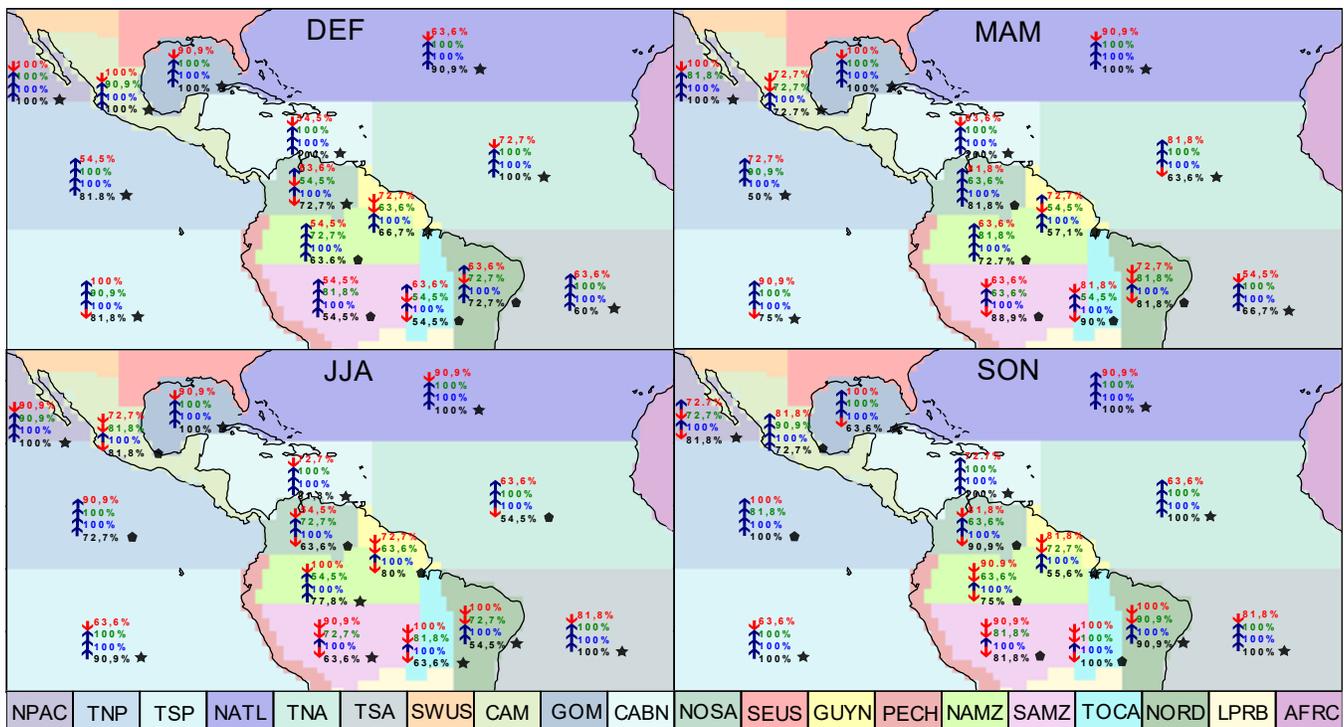


Figura 1.18. Consenso entre modelos en cuanto a las proyecciones para finales del siglo XXI de las variables estudiadas. Los números representan el porcentaje de consenso entre los modelos (rojo: precipitación; verde: evaporación; azul: agua precipitable; negro: P-E). Las flechas hacia arriba indican consenso en aumento de la variable. Las flechas hacia abajo indican consenso en disminución de la variable. El símbolo de estrella indica si para la región se proyecta un aumento o disminución como fuente de humedad. El símbolo de pentágono indica si para la región se proyecta un aumento o disminución como sumidero de humedad.

- Consenso entre modelos para la temporada DEF

El consenso entre modelos para DEF sobre el cambio proyectado en la precipitación sobre las regiones oceánicas para finales del siglo XXI es bastante heterogéneo. Los modelos sugieren que cinco de las ocho regiones oceánicas tendrán disminuciones de precipitación durante esta temporada (NPAC con un 100% de consenso, GOM con un 90,9%, NATL con un 63,63%, TNA con un 72,72%, y CABN con un 54,54%). Por su parte, se proyectan aumentos en la precipitación para cinco de las siete regiones continentales mostradas en la Figura 1.18; no obstante, estos acuerdos entre modelos para las proyecciones de precipitación sobre regiones continentales son débiles, oscilando, en general, entre 54.54% y 63.63%.

El cambio a futuro de la evaporación sobre los océanos es bastante contundente, con un alto consenso de aumento de la variable sobre todas las masas de agua oceánicas para finales del siglo XXI. Por su parte, las regiones continentales se caracterizan por porcentajes de acuerdo más bajos, además de una mayor diferencia en el signo del cambio proyectado entre regiones (cuatro de las siete regiones continentales consideradas sugieren disminuciones proyectadas de evaporación durante DEF, mientras que las tres restantes sugieren aumento a futuro para la misma temporada). Se resalta además, que las dos regiones Amazónicas (NAMZ y SAMZ) presentan acuerdos altos entre modelos (72,72% y 81,81%, respectivamente), que indican aumento de la evaporación durante la temporada DEF, para el periodo 2070-2100.

Las proyecciones de agua precipitable tienen un consenso generalizado, tanto sobre los océanos como sobre los continentes. Todas las regiones poseen un 100% de acuerdo entre modelos en que esta variable aumentaría para finales de siglo (2070-2100). De otro lado, todos los modelos sugieren que la totalidad de las regiones oceánicas se proyectan como fuentes de humedad durante la temporada DEF, además que para siete de las ocho regiones se tendrían aumentos en su función de fuente de humedad para finales del siglo XXI. Esto está relacionado con un mundo mucho más cálido, por ende con una atmósfera con mayor capacidad para almacenar agua en forma de vapor y, por lo tanto, mayores tasas de evaporación sobre los océanos. TSP es la única región oceánica en la que la mayoría de los modelos proyectan disminuciones en su función como fuente de humedad, con un acuerdo entre modelos del 81,81%.

- Consenso entre modelos para la temporada MAM

Respecto a la temporada MAM, los modelos tienen consensos altos en sus proyecciones de disminución de precipitación en cinco de las ocho regiones oceánicas, específicamente sobre TNP, GOM, CABN, NATL y TSA. Sobre el continente se proyectan aumentos de precipitación en NOSA, GUYN y NAMZ, que son las regiones que se localizan más al norte de Suramérica, mientras que se proyectan disminuciones de precipitación en las regiones más al sur del dominio (SAMZ, TOCA y NORD).

Sobre los océanos se tienen consensos altos en las proyecciones, las cuales sugieren aumentos de evaporación para finales del siglo XXI. Sobre el continente, la mayoría de los modelos proyectan aumentos de evaporación a futuro para NOSA, NAMZ, SAMZ, y TOCA. Además, existe consenso entre los modelos en cuanto a la proyección de reducción de evaporación sobre CAM, GUYN y NORD durante esta temporada.

Para MAM también se observan consensos del 100% entre los modelos en sus proyecciones de agua precipitable sobre todas regiones de estudio, tanto oceánicas como continentales, indicando un aumento de esta variable para finales del siglo XXI.

Los modelos proyectan que las regiones oceánicas NPAC, GOM, CABN, NATL, TSA aumentarán su función como fuentes de humedad para finales del siglo XXI. Contrariamente, los modelos proyectan que TSP y TNA disminuirán en su función como fuente de humedad para el periodo 2070-2100. Además, y acorde con el cambio proyectado de aumento de precipitación sobre las regiones continentales para esta temporada, se observa que para las tres regiones más al norte de Suramérica (NOSA, GUYN y NAMZ), se proyectan aumentos en su función como sumideros de humedad para finales de siglo. Finalmente, se proyecta que las tres regiones continentales más al sur del dominio (SAMZ, TOCA y NORD) disminuirían su función como sumideros de humedad (coincidiendo con las proyecciones de reducción de precipitación).

- Consenso entre modelos para la temporada JJA

Durante esta temporada, la mayoría de los consensos entre modelos indican proyecciones de reducción de precipitación sobre las regiones oceánicas para finales de siglo, exceptuando TNP y TNA. Los modelos proyectan la disminución de precipitación sobre todas las regiones continentales, con acuerdos entre modelos mayores para

las regiones ubicadas más al sur del dominio (incluyendo NAMZ). Además, el 100% de los modelos concuerdan en sus proyecciones de reducción de precipitación para finales del siglo XXI sobre NAMZ, y el 90,9% sobre SAMZ.

Como para las anteriores temporadas, los modelos proyectan aumentos de evaporación para finales de siglo sobre todas las regiones oceánicas, con acuerdos altos entre modelos. Sobre los continentes, las únicas regiones en las que existe acuerdo de aumento de evaporación son el norte de Suramérica y el norte de la Amazonía. El resto de las regiones continentales poseen acuerdos de reducción de la evaporación para finales de siglo. Es decir, los modelos proyectan disminuciones de precipitación y de evaporación para el periodo 2070-2100 sobre la mayoría de las regiones continentales durante la temporada JJA.

Al igual que las temporadas anteriores, los modelos proyectan incrementos en el agua precipitable para finales de siglo, tanto en las regiones oceánicas como continentales, con acuerdos del 100% para cada una de ellas.

Las regiones oceánicas NPAC, TSP, NATL, TSA, GOM y CABN, presentan acuerdos altos entre modelos respecto a que su función como fuentes de humedad aumentará para el periodo 2070-2100. Además, se resalta que durante esta temporada, el consenso indica que para finales del siglo XXI, la función como sumidero de TNP aumentará, mientras que para TNA disminuirá. Lo anterior recordando que para estas dos regiones oceánicas y en esta temporada los modelos sugieren que durante el periodo histórico (1980-2005) ambas se comportan como sumideros (ver Tabla 1.1).

- Consenso entre modelos para la temporada SON

Para esta temporada los modelos presentan consensos de aumento de precipitación sobre la mayoría de las regiones oceánicas para finales de siglo, excepto por las dos regiones más al sur del dominio: TSP y TSA. Además, los modelos proyectan disminuciones de la precipitación sobre todas las regiones continentales de Suramérica, con acuerdos más contundentes sobre las regiones más al sur. El 90.9% de los modelos concuerdan sus proyecciones de disminución de precipitación sobre NAMZ, la cual corresponde a la temporada de transición entre la temporada lluviosa y la temporada seca en el Amazonas. Esto coincide con lo identificado por otros estudios (Fu et al., 2013; Boisier et al., 2015).

Por otro lado, para finales de siglo los modelos proyectan aumentos de evaporación sobre la mayoría de las regiones oceánicas, excepto para TNP. Para las regiones continentales se proyectan disminuciones de evaporación en cinco de las siete regiones ubicadas en Suramérica. En particular, se observa un consenso de reducción de la evaporación sobre el Amazonas (NAMZ con un 63.63% de consenso, SAMZ con un 81.81% de consenso).

En cuanto a las proyecciones de la variable P-E, la mayoría de los modelos sugieren que la región TNP aumentará su función como sumidero de humedad atmosférica para finales de siglo. Para las demás regiones se proyecta un aumento en su función como fuentes de humedad.

En general, los modelos proyectan disminuciones de precipitación, aumentos de evaporación y aumentos de agua precipitable sobre la mayor parte del dominio oceánico, durante las cuatro temporadas del año. Los mayores consensos entre modelos se observan para el aumento de evaporación oceánica y de agua precipitable, cercanos al 100%, mientras que los consensos del cambio proyectado para la precipitación sobre estas masas de agua no son tan consistentes, oscilando entre un 50% y 70% de acuerdo.

Respecto a las regiones continentales, los modelos proyectan, en general, disminuciones de precipitación, principalmente durante JJA y SON, con consensos superiores al 70% para la mayoría de las regiones. En contraste con las regiones oceánicas, los modelos proyectan disminuciones de evaporación sobre la mayoría de regiones continentales, con acuerdos entre el 70% y el 90%, principalmente sobre el norte (SON) y el sur del Amazonas (JJA y SON), con mayores consensos para esta última. Es de resaltar que estas temporadas corresponden a la temporada seca (JJA) y a la transición de temporada seca a temporada húmeda (SON) sobre el sur del Amazonas. De manera similar a las regiones oceánicas, las proyecciones para agua precipitable indican aumentos de la variable sobre las regiones continentales para finales de siglo, con porcentajes de acuerdo entre modelos del 100%. Se resalta que el acuerdo del 100% de los modelos CMIP5 en cuanto a las proyecciones de aumento de agua precipitable sobre todo el dominio de estudio es consistente con lo esperado desde la teoría (relación de Clausius-Clapeyron).

Las proyecciones para la variable P-E no muestran un comportamiento claro entre regiones y temporadas del año. Las proyecciones sobre los océanos indican que la mayoría de las regiones fortalecerían su papel como fuentes de humedad. Esto está influenciado principalmente por los cambios proyectados en la evaporación. Finalmente, las proyecciones sugieren que algunas regiones continentales debilitarán su función como sumideros de humedad, mientras que otras podrían fortalecerla.

1.3. Discusión y conclusiones

Los modelos climáticos son hasta el momento la mejor herramienta con la que se cuenta para el análisis y la investigación de los posibles efectos del cambio climático sobre las variables del clima (Palomino-Lemus et al., 2017; Samanta et al., 2019). A pesar de esto, aún existe una gran incertidumbre en la representación de la variabilidad simulada por modelos respecto a la observada, especialmente en los trópicos (Hegerl et al., 2015). Es así como para el análisis de proyecciones bajo forzamientos de cambio climático se hace necesario conocer de antemano cómo las variables de interés son representadas durante el periodo histórico, el cual representa condiciones del clima presente. En este primer capítulo se evaluó cómo 11 modelos de circulación general del proyecto CMIP5 representan las variables de entrada al modelo DRM durante el periodo histórico 1980-2005, en comparación con el reanálisis climático ERA5. Las variables analizadas fueron precipitación, evaporación, agua precipitable, y P-E. Para esta evaluación se consideró el análisis de (i) patrones espaciales de promedios climatológicos de las variables de interés para las cuatro temporadas del año, (ii) ciclos anuales climatológicos para algunas de las regiones de interés presentadas en la Figura 5, y (iii) diagramas de Taylor para cada temporada del año, considerando todo el dominio, el dominio continental y el dominio oceánico.

Nuestro análisis confirma que los modelos CMIP5 presentan sesgos en la representación de la precipitación para la región de estudio. En particular, los modelos presentan dificultades para representar la migración de la ZCIT, y aunque son capaces de representar la estacionalidad de la precipitación, no lo hacen adecuadamente con su magnitud (Ortega et al., 2020; Ortega & Arias, 2018). Este comportamiento se puede observar tanto en los ciclos anuales presentados, como en los patrones espaciales de precipitación para modelos CMIP5, en comparación con ERA5. En particular, la mayoría de los modelos estudiados tienen problemas en la representación de la precipitación sobre todo el dominio durante las temporadas DEF y MAM, lo cual también coincide con análisis presentados por otros estudios (Ortega & Arias, 2018; Rincón et al., 2018; Sierra et al., 2015). Nuestros resultados muestran que los modelos con una mejor representación de la precipitación en el clima presente corresponden a la familia MIROC (MIROC-ESM, MIROC-ESM-CHEM y MIROC5), especialmente para el dominio oceánico, durante las temporadas DEF y MAM. En particular, el modelo MIROC5 ha sido identificado en estudios previos por el buen desempeño de la variable sobre la región (Bonilla-Ovallos & Mesa Sánchez, 2017; Ortega et al., 2020; Ortega & Arias, 2018; Palomino-Lemus et al., 2015; Rincón et al., 2018; Sierra et al., 2018). Por otra parte, los modelos CMIP5 presentan mayores sesgos para representar la evaporación que la precipitación, en particular su estacionalidad, tanto sobre las regiones oceánicas como continentales, aunque se presentan mayores sesgos de la variable sobre los continentes. Lo anterior podría estar relacionado con las parametrizaciones de las interacciones suelo-atmósfera específicas de los modelos (Dirmeier et al., 2013b, 2013a; Koster et al., 2002; Lorenz et al., 2016). Se concluye que el modelo que mejor representa la evaporación sobre todo el dominio durante la mayor parte del año es MIROC5, teniendo variaciones en dicha representación, dependiendo de la subregión analizada. Finalmente, el agua precipitable es la variable mejor representada por los modelos considerados, con respecto a ERA5, aunque sobre las regiones continentales presenta subestimaciones generalizadas. De nuevo, MIROC5 resulta ser uno de los mejores modelos en la representación de esta última variable para todo el dominio, aunque MPI-ESM-MR también tiene un buen comportamiento.

Con respecto a las proyecciones de las variables consideradas para finales del siglo XXI, los cambios de precipitación sugeridos por los modelos muestran aumentos o disminuciones, dependiendo de las regiones y temporadas. En general, se proyectan aumentos de precipitación para la mayoría de las regiones continentales durante la temporada DEF. Estudios anteriores soportan que, en general, los modelos presentan desacuerdo sobre los cambios proyectados para la precipitación en la región (Reyer et al., 2017). Sin embargo, se observan mayores consensos en las proyecciones de precipitación para el sur del Amazonas, las cuales indican disminución de las lluvias para finales del siglo XXI durante las temporadas JJA y SON (reducciones del 32% y 19% con respecto al periodo histórico, respectivamente). Esto coincide con lo reportado en estudios anteriores en los cuales se han identificado reducciones de precipitación a lo largo del siglo XXI, con cambios más marcados durante la estación seca y de transición a la temporada de lluvias (JJA y SON), además de aumentos en la duración de la temporada seca sobre el sur del Amazonas (Fu et al., 2013; Boisier et al., 2015). Estudios basados en reducción de escala mediante métodos estadísticos también encuentran proyecciones de disminución de precipitación en el sur del Amazonas durante la temporada SON (Palomino-Lemus et al., 2017). Además, los datos observados durante el periodo histórico para esta región evidencian reducción de su precipitación durante esta misma temporada (Espinoza et al., 2019), así como una mayor duración de la temporada seca durante las últimas 4 décadas (Arias, Fu, et al., 2015; Debortoli et al., 2015; Fu et al., 2013).

Las proyecciones de evaporación analizadas en esta investigación muestran, en general, un alto consenso entre los modelos con respecto al aumento de la variable sobre todas las regiones oceánicas para finales del siglo XXI.

Otros estudios también han identificado proyecciones de aumento de evaporación en casi los océanos globales, con un alto nivel de acuerdo entre modelos (Levang & Schmitt, 2015). Lo anterior se explica debido a la influencia que posee el cambio climático sobre la evaporación en un mundo más cálido, permitiendo mayores tasas de evaporación, además de un aumento en la capacidad de retener humedad por parte de la atmósfera (Trenberth, 2011). El aumento de vapor de agua a nivel global ha sido bien documentado y responde directamente a la relación de Clausius-Clapeyron (Trenberth, 2011). Contrario a lo proyectado sobre las masas de agua oceánicas, los modelos no muestran un consenso claro sobre el cambio de evaporación sobre los continentes. Lo anterior tiene explicación debido a que la cobertura de la superficie en las áreas continentales modula el comportamiento de esta variable, generando mayores retos en su observación y modelación (Laíne et al., 2014). Estudios globales de evaporación han demostrado que sus cambios a futuro bajo escenarios de cambio climático sólo explican entre un 11% y 16% de los cambios de la precipitación a nivel global, aunque esta relación es mucho más importante sobre las masas continentales (Laíne et al., 2014), resaltando el factor crucial que juega la superficie y la cobertura. Este es el caso de la región Amazónica, para la cual se sugieren proyecciones de disminución en la evaporación para finales del siglo XXI, con consensos altos para las temporadas JJA y SON (reducciones del 17% y 18% con respecto al periodo histórico), mostrando un comportamiento similar a las proyecciones de precipitación identificadas sobre la región.

Con respecto al agua precipitable, las proyecciones de los modelos considerados muestran altos porcentajes de acuerdo respecto a un aumento de la variable para finales de siglo, sobre todo el dominio de estudio. Esto se soporta en los aumentos de evaporación fundamentalmente desde los océanos (Levang & Schmitt, 2015), generando una intensificación del ciclo hidrológico (Huntington, 2006; Oki & Kanae, 2006). Dado este aumento en la cantidad de vapor de agua en la atmósfera, el transporte de humedad podría verse también intensificado, lo que se relaciona con el comportamiento de la variable P-E (Laíne et al., 2014), siendo esta una buena aproximación de cómo podría cambiar a futuro la convergencia de humedad atmosférica.

El transporte de humedad desde los océanos es un proceso fundamental dentro del ciclo del agua. El cambio proyectado para la variable P-E por los modelos CMIP5 considerados presenta consensos relativamente bajos sobre los continentes. Sin embargo, es interesante ver resultados como los que se proyectan sobre NOSA (JJA, SON), NAMZ (SON) y SAMZ (SON), con reducciones de sus roles como sumideros de humedad para finales del siglo XXI, con acuerdos entre modelos altos (90,9% (SON), 75% y 81.8%, respectivamente). Por el contrario, las proyecciones sobre el océano indican un alto consenso respecto a que la mayoría de las regiones oceánicas fortalecerán su papel como fuentes de humedad para finales del siglo XXI, aunque no sobre todas se espera la misma intensificación de dicho rol. En contraste, y siendo un caso particular, es interesante ver como en una de las regiones oceánicas, TNP, se proyecta una intensificación de su rol como sumidero para finales de siglo durante JJA y SON. Todo lo anterior se encuentra influenciado, principalmente, por los cambios proyectados en la evaporación sobre dichas regiones. Esto significa que los aumentos en concentraciones de GEI para finales de siglo dados por el escenario RCP8.5 estarían relacionados con intensificación en los flujos de agua atmosférica, aunque sigue siendo incierto cómo esta humedad circulará y cómo será distribuida en la atmósfera. El fortalecimiento o amplificación de P-E sobre los océanos en un mundo más cálido a lo largo del siglo XXI ha sido también reportado por otros estudios, en los que se concluye que las regiones oceánicas tropicales húmedas serán cada vez más húmedas, mientras que las regiones secas serán cada vez más secas (Liu & Allan, 2013). Estudiar estos cambios sobre regiones específicas del globo es una tarea necesaria y es aquí donde el análisis del transporte de humedad atmosférica toma relevancia.

Capítulo II

Análisis de transporte de humedad atmosférica durante el periodo histórico (1980-2005)

2.1. Introducción

La circulación atmosférica entre las masas oceánicas y continentales es una componente compleja del sistema climático terrestre y que hace parte de lo que conocemos como el ciclo del agua (Levang & Schmitt, 2015). La mayor parte del agua que se evapora y precipita lo hace sobre los océanos (Durack, 2015; Schanze et al., 2010; Trenberth et al., 2007, 2011), y es desde allí de donde proviene la mayor parte del agua que reciben las masas continentales por medio de los vientos, los cuales transportan dicha humedad (Gimeno et al., 2012; Trenberth et al., 2007). Esto no significa que las regiones continentales no puedan ser una fuente de humedad, pero sí que la mayor proporción de esta proviene de los océanos. Por ejemplo, regionalmente, la selva Amazónica es aportante de humedad (Arraut et al., 2012; A. Drumond et al., 2014; IPCC, 2013; Marengo et al., 2004; Nobre et al., 2016; Sampaio et al., 2018; Spracklen & Garcia-Carreras, 2015; Zemp et al., 2014), y de allí, en parte, su capacidad para la regulación del clima (Aragão et al., 2014; IPCC, 2013; Nobre, 2014; Weng et al., 2018). Para nuestro caso en particular, regiones como el norte de Suramérica, el norte del Amazonas y el sur del Amazonas cuentan con diferentes fuentes de humedad, oceánicas y continentales, que varían a lo largo del ciclo anual (Arias, Martínez, et al., 2015; Bosilovich & Chern, 2006; Drumond et al., 2008, 2014; Hoyos et al., 2018; Martins et al., 2015; Poveda et al., 2014; Rocha et al., 2017; Sakamoto et al., 2011; Sorí et al., 2018; Van Der Ent et al., 2010).

El análisis del transporte de humedad atmosférica no es trivial. Muchos estudios se han desarrollado alrededor del mundo en la búsqueda del entendimiento de cómo se mueve la humedad a través de la atmósfera, cómo y hacia dónde va y, finalmente, dónde precipita (Arias, Martínez, et al., 2015; Drumond et al., 2014; Hoyos et al., 2018; Hu et al., 2018; Link et al., 2020; Martínez & Domínguez, 2014; Roy et al., 2019; Salah et al., 2018; Stojanovic et al., 2017; Vázquez et al., 2018, entre muchos otros). Actualmente, son diversos los métodos utilizados para el rastreo de humedad atmosférica: analíticos, trazadores numéricos, y trazadores físicos (isotópicos) (Gimeno et al., 2012). Como ya se describió en secciones anteriores, para el propósito de este estudio, se utilizó un modelo analítico semi-lagrangiano derivado formalmente de la ecuación de conservación de masa, conocido como DRM (Domínguez et al., 2006; Martínez & Domínguez, 2014), que además ha sido utilizado en otros análisis en la evaluación de las fuentes de humedad de algunas regiones específicas (Arias, Martínez, et al., 2015; Domínguez et al., 2006; Herrera-Estrada et al., 2019; Hoyos et al., 2018; Martínez & Domínguez, 2014; Morales et al., 2020; Roy et al., 2019; Ruiz-Vásquez et al., 2020).

El presente capítulo analiza el transporte de humedad atmosférica, para el periodo histórico (1980-2005), desde las diferentes fuentes del dominio de estudio, estimado mediante el modelo DRM y a partir de la información de vientos, humedad, evaporación y precipitación de los 11 modelos CMIP5 y del reanálisis ERA5. Así, se analizan los resultados obtenidos de las corridas del modelo DRM con los datos de los modelos CMIP5 escogidos para este Trabajo de Investigación, correspondientes a estimados de transporte y reciclaje de humedad atmosférica de las regiones de interés, durante el periodo histórico (1980-2005), además de las diferencias que se presentan

respecto a lo estimado con datos del reanálisis climático. Dada su importancia a nivel regional, se analizan tres regiones específicas: el norte de Suramérica (NOSA), el norte del Amazonas (NAMZ) y sur del Amazonas (SAMZ).

2.2. Resultados y análisis

2.2.1. Promedios regionales de transporte de humedad atmosférica

A continuación, se presenta el análisis del transporte de agua precipitable y del transporte de precipitación resultantes de la implementación del DRM con las variables de los modelos CMIP5, durante el periodo histórico (1980-2005) y para las tres regiones de interés: el norte de Suramérica (NOSA), el norte del Amazonas (NAMZ) y el sur del Amazonas (SAMZ). Este transporte se compara con las estimaciones del DRM obtenidas a partir de los datos de ERA5. El análisis se desarrolla por medio de gráficas de contribución porcentual desde las diferentes regiones del dominio y hacia las tres mencionadas, y de sus ciclos anuales climatológicos de transporte y reciclaje de humedad atmosférica durante el periodo histórico.

Para cada una de las tres regiones de interés se analiza el transporte de agua precipitable y el transporte de precipitación. Entiéndase transporte de precipitación como aquella humedad proveniente de una fuente determinada y que es precipitada sobre una región “sumidero”. Esto significa que no toda la humedad que llega en forma de agua precipitable a una región dada se precipita en forma de lluvia, pues las condiciones atmosféricas deben ser las adecuadas para que esto ocurra.

2.2.1.1. Transporte de humedad atmosférica hacia el norte de Suramérica

- Transporte de agua precipitable hacia el norte de Suramérica

La Figura 2.1 muestra las contribuciones históricas (1980-2005) de agua precipitable estimadas hacia el norte de Suramérica desde cada una de las 20 subregiones consideradas. Se pueden observar valores elevados de transporte de agua precipitable desde las fuentes oceánicas Atlánticas hacia NOSA, lo cual también es reportado por Hoyos et al. (2018) y Arias, Martínez, et al. (2015). Específicamente, TNA es la región con el mayor aporte a NOSA, con aproximadamente un 45% de contribución en agua precipitable. Siguiendo en orden de importancia se encuentran el reciclaje de agua precipitable en NOSA (12%, aproximadamente), el transporte desde TSA (8%, aproximadamente) y desde NATL (5%, aproximadamente). En cuanto a los resultados estimados para ERA5, se evidencia un orden de importancia similar a lo estimado para los modelos CMIP5. De lo anterior y comparando nuestros resultados con otros estudios, podemos concluir que el transporte de agua precipitable estimado para los modelos CMIP5 representa de manera adecuada la proporcionalidad e importancia de las fuentes consideradas hacia la región norte de Suramérica (Arias, Martínez, et al., 2015; Hoyos et al., 2018).

Agua precipitable a NOSA (1980-2005)

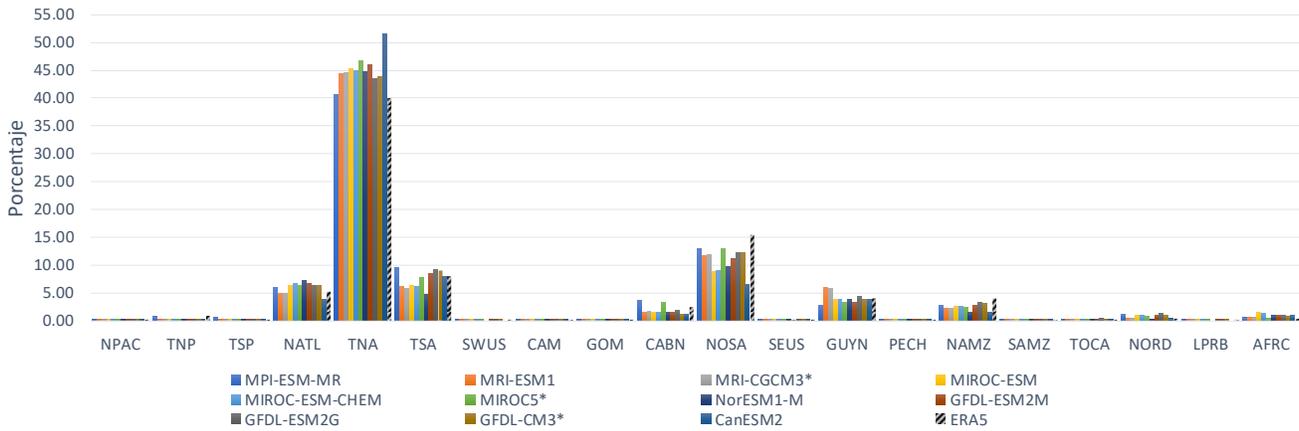


Figura 2.1. Contribuciones porcentuales totales (%) de agua precipitable desde cada una de las 20 regiones de estudio hacia NOSA durante el periodo histórico (1980-2005). Las barras de colores representan cada uno de los modelos CMIP5 aquí estudiados. Las barras achuradas representan el reanálisis climático ERA5.

Tomando este orden de importancia de contribución de agua precipitable hacia NOSA durante el periodo histórico, se obtuvieron los ciclos anuales climatológicos del transporte de esta variable para sus cuatro fuentes con mayor importancia (TNA, NOSA, TSA, NATL), además de NAMZ, ya que a pesar de ser su sexta fuente de contribución, se considera de interés en este estudio. En la Figura 2.2 se presentan los ciclos anuales climatológicos del transporte de agua precipitable desde cada una de las principales fuentes hacia NOSA durante el periodo histórico (1980-2005), tanto para los 11 modelos CMIP5 como para el reanálisis atmosférico ERA5.

Para el periodo 1980-2005, los ciclos anuales climatológicos de transporte de agua precipitable desde TNA a NOSA dados para los 11 modelos CMIP5 presentan un comportamiento estacional similar al estimado para ERA5, mostrando un pico de transporte durante MAM. Cabe resaltar que para la mayoría de los modelos se presenta una subestimación del total de agua precipitable transportada desde esta región durante todo el año, siendo más evidente entre Julio y Agosto. Por otro lado, los coeficientes de correlación de los modelos CMIP5 con ERA5 presentan valores superiores a 0.8, lo cual significa que, sin tener en cuenta la magnitud, el transporte de agua precipitable estimado para los modelos CMIP5 desde TNA presenta una buena estacionalidad.

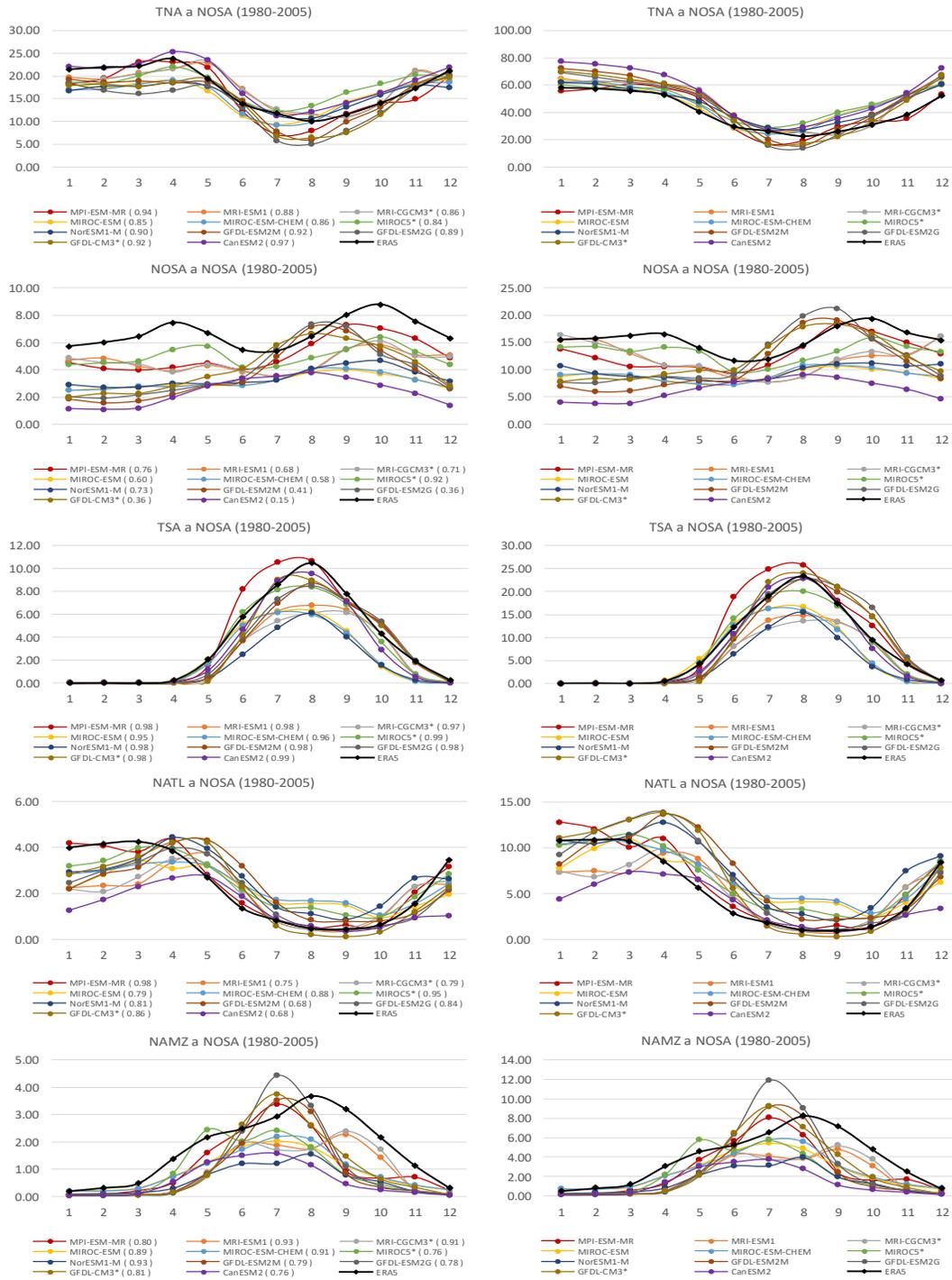


Figura 2.2. Ciclos anuales climatológicos de transporte de agua precipitable desde cada una de las fuentes con mayores contribuciones hacia NOSA para el periodo histórico (1980-2005). Los ciclos anuales de la columna izquierda se expresan en valor absoluto de transporte de agua precipitable hacia NOSA (mm). Los ciclos anuales de la columna derecha se expresan en porcentaje de agua precipitable transportada desde cada una de las fuentes respecto al total de agua precipitable sobre NOSA (%). Las líneas de color representan cada uno de los 11 modelos CMIP5 aquí estudiados; la línea negra representa a ERA5. El eje de las abscisas representa cada uno de los meses del año. Entre paréntesis se presenta el coeficiente de correlación entre los ciclos anuales climatológicos del transporte estimado para los modelos CMIP5 y el estimado para ERA5.

Por su parte, los ciclos anuales climatológicos del reciclaje de agua precipitable para NOSA (NOSA a NOSA), presentan una clara subestimación de magnitud para los modelos en comparación con ERA5, algo que también se puede observar en el valor porcentual de contribución. Se tienen valores de correlación bajos, especialmente para los modelos GFDL-ESM2M, GFDL-ESM2G, GFDL-CM3 y CanESM2, siendo este último el que posee los mayores inconvenientes, con una correlación de 0.15. Además, se debe destacar el modelo MIROC5, ya que su coeficiente de correlación con ERA5 es el mayor entre todos los modelos (0.92), indicando que es el que presenta una mejor estacionalidad del reciclaje de agua precipitable sobre NOSA para el periodo histórico, a pesar de que durante todo el ciclo anual las magnitudes absolutas se subestiman. Se resalta además que si se analizan en conjunto los ciclos anuales climatológicos estimados para los modelos CMIP5, el del reciclaje de agua precipitable sobre NOSA es el que posee las correlaciones más bajas con ERA5, en comparación con sus otras cuatro fuentes de humedad.

Siguiendo con la tercera fuente más importante de agua precipitable hacia NOSA, tenemos a TSA. Los ciclos anuales climatológicos estimados para los 11 modelos CMIP5 muestran un comportamiento similar en cuanto a los mínimos y máximos de transporte de agua precipitable, siendo Agosto el mes con las magnitudes más altas. Además, que durante los primeros meses del año (Enero a Abril), el transporte de agua precipitable desde TSA a NOSA es casi nulo, incrementando gradualmente durante los meses de Abril a Agosto, en los que la mayoría de los modelos presentan su pico de transporte. Las correlaciones del transporte de agua precipitable para los modelos desde esta fuente de humedad a NOSA son bastante elevadas, indicando una muy buena representación de estacionalidad durante todo el ciclo anual (todas las correlaciones superan 0.95, siendo la fuente hacia NOSA con las correlaciones más altas de las aquí presentadas). Por su parte, la magnitud de este transporte varía para cada modelo, siendo subestimado con respecto a ERA5 para la mayoría de los casos.

Los estimados de transporte de agua precipitable desde NATL hacia NOSA muestran algunas diferencias entre modelos, sin embargo presentan una buena estacionalidad durante todo el ciclo anual climatológico. Se observan subestimaciones de magnitud para todos los modelos entre Enero y Marzo, pero sobrestimaciones entre Abril y Noviembre para la mayoría de ellos. Los coeficientes de correlación más altos se observan en el transporte de agua precipitable estimado para los modelos MPI-ESM-MR (0.98) y MIROC5 (0.95).

Los estimados de transporte de agua precipitable para los modelos desde NAMZ hacia NOSA durante el periodo histórico muestran, en general, subestimaciones en comparación con lo calculado para ERA5. El pico de contribución de agua precipitable que se evidencia para ERA5 (Agosto) es captado sólo para uno de los modelos (NorESM1-M), mientras que para otros este pico se observa durante el mes inmediatamente anterior (Julio). A pesar de esto, para todos los modelos se tienen coeficientes de correlación mayores o iguales a 0.76, lo que da cuenta de una buena representación de la estacionalidad de los estimados de transporte de agua precipitable calculados para los modelos durante el periodo histórico.

A pesar de las diferencias entre los estimados de transporte de agua precipitable para los modelos CMIP5 y ERA5 a lo largo del ciclo anual, se destaca que la estacionalidad se encuentra bien representada en la mayoría de los casos. Estudios como los de Hoyos et al. (2018), Sakamoto et al. (2011) y Poveda et al. (2014), evalúan las principales fuentes de humedad para NOSA, y concluyen que el comportamiento de estas varía durante todo el año en función de las dinámicas de cada región. En la Figura 1 se puede observar que el estudio de Hoyos et al. (2018) concuerda con lo que nuestros estimados de transporte de agua precipitable hacia NOSA sugieren: aportes importantes desde las fuentes Atlánticas durante todo el año, aportes elevados de reciclaje sobre NOSA

principalmente durante las temporadas de MAM y SON, aportes significativos desde NAMZ durante la temporada JJA, entre otros.

- Transporte de precipitación hacia el norte de Suramérica

La Figura 2.3 muestra las contribuciones de precipitación de cada una de las 20 regiones estudiadas hacia NOSA para el periodo histórico (1980-2005), dadas por el cálculo del transporte de precipitación para los 11 modelos CMIP5 estudiados y el reanálisis ERA5. Es de notar que el orden de importancia es similar y cambia muy poco respecto al del transporte de agua precipitable hacia NOSA. Esto es consistente dado que el agua precipitable transportada es aquella que puede, por medio de la presencia y combinación de otros factores, precipitarse sobre la región. Así, las fuentes que se analizan para el caso del transporte de precipitación hacia NOSA son las mismas que las evaluadas para el transporte de agua precipitable: TNA, NOSA (reciclaje), TSA, NATL y NAMZ. Por otro lado, se destaca que los resultados de transporte de precipitación dados para ERA5 muestran un orden de importancia de las fuentes similar a los datos para los modelos CMIP5. De lo anterior podemos concluir que los estimados de transporte atmosférico de humedad calculados para los modelos CMIP5 captan en general y de manera adecuada la proporcionalidad e importancia de las 20 fuentes de precipitación para el norte de Suramérica.

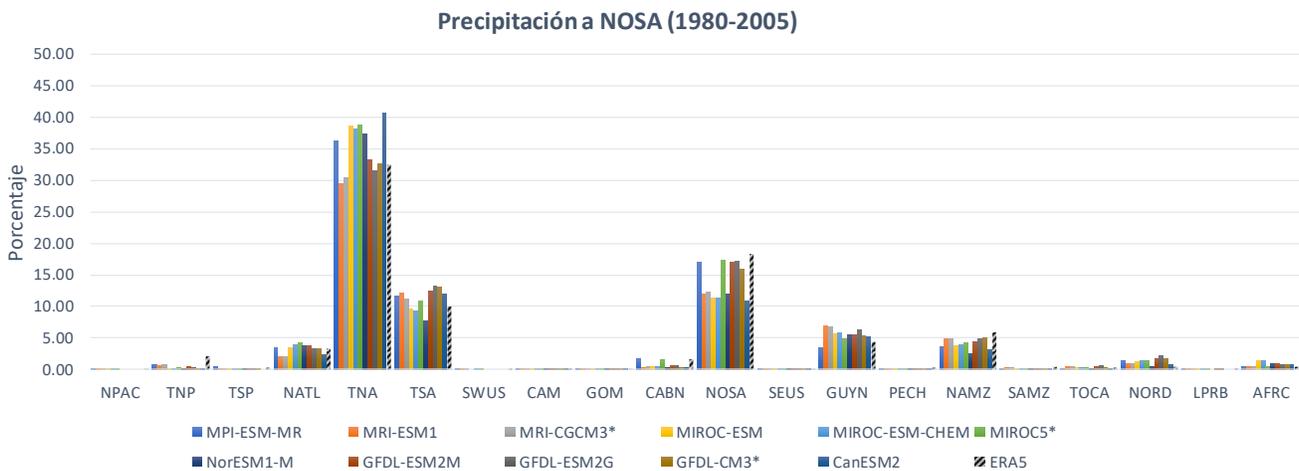


Figura 2.3. Contribuciones porcentuales totales (%) de precipitación desde cada una de las 20 regiones de estudio hacia NOSA durante el periodo histórico (1980-2005). Las barras de colores representan cada uno de los modelos CMIP5 aquí estudiados. Las barras achuradas representan el reanálisis climático ERA5.

En la Figura 2.4 se muestran los ciclos anuales climatológicos del transporte de precipitación durante el periodo histórico (1980-2005) calculado para los modelos CMIP5 y para el reanálisis ERA5, desde las fuentes de humedad más importantes hacia NOSA. Como era de esperarse, los ciclos anuales climatológicos de transporte de precipitación desde cada una de las fuentes a NOSA obedecen el comportamiento del transporte de agua precipitable hacia la región (Figura 2.2), teniendo mínimos y máximos de transporte de precipitación justo cuando

ocurren los mínimos y máximos de transporte de agua precipitable. En general, se presentan subestimaciones de la magnitud del transporte de precipitación para los modelos CMIP5 en comparación a los estimados para ERA5. Sin embargo, si se observan los ciclos anuales del porcentaje de contribución de precipitación desde cada una de las fuentes de importancia respecto al total de precipitación sobre NOSA durante el periodo histórico (columna derecha, Figura 2.4), se nota que los porcentajes son sobrestimados por los modelos CMIP5 para la fuente TNA, respecto a ERA5.

Como hemos identificado, la precipitación sobre NOSA a lo largo del ciclo anual climatológico durante el periodo histórico proviene de una variedad de fuentes, las cuales cambian dependiendo de la época del año, resaltando el océano Atlántico y el reciclaje de precipitación de la región como las de mayor relevancia. En cuanto a los valores de correlación entre los estimados de transporte de precipitación para los modelos CMIP5 y los de ERA5, se tiene que la estacionalidad es mejor representada desde la región oceánica TNA, con valores entre 0.95 y 0.99. Los estimados para los modelos CMIP5 desde las demás fuentes de precipitación hacia NOSA poseen valores con rangos más variables, aunque se destaca que los ciclos anuales de reciclaje de precipitación sobre NOSA tienen valores de correlación más elevados que en el caso del reciclaje de agua precipitable (comparar Figura 2.2 y Figura 2.4 – NOSA a NOSA), demostrando que la estacionalidad del reciclaje de precipitación posee un mejor comportamiento que la del reciclaje de agua precipitable para los modelos de circulación general aquí analizados.

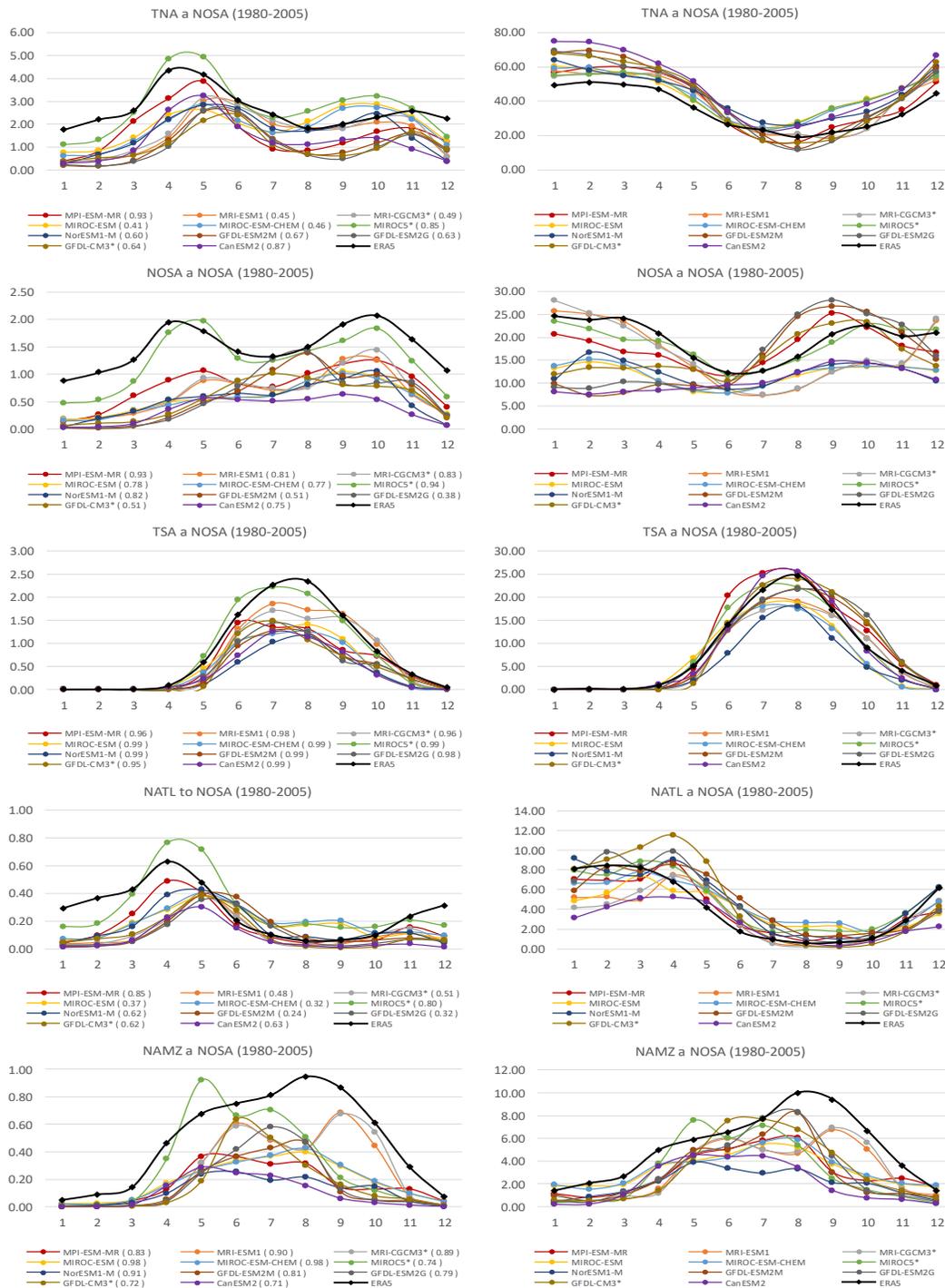


Figura 2.4. Ciclos anuales climatológicos del transporte de precipitación desde cada una de las fuentes con mayores contribuciones hacia NOSA para el periodo histórico (1980-2005). Los ciclos anuales de la columna izquierda se expresan en valor absoluto de transporte de precipitación hacia NOSA (mm/d). Los ciclos anuales de la columna derecha se expresan en porcentaje de precipitación transportada desde cada una de las fuentes respecto al total de precipitación sobre NOSA durante el periodo histórico (%). Las líneas de color representan cada uno de los 11 modelos CMIP5 aquí estudiados; la línea negra representa a ERA5. El eje de las abscisas representa cada uno de los meses del año. Entre paréntesis se presenta el coeficiente de correlación entre los ciclos anuales climatológicos del transporte estimado para los modelos CMIP5 y el estimado para ERA5.

2.2.1.2. Transporte de humedad atmosférica hacia el norte del Amazonas

- Transporte de agua precipitable hacia el norte del Amazonas

La Figura 2.5 muestra las contribuciones totales de agua precipitable transportada desde cada una de las 20 subregiones del dominio de estudio hacia NAMZ durante el periodo histórico (1980-2005), para los modelos CMIP5 y el reanálisis ERA5. Se evidencian valores elevados de transporte de agua precipitable desde las fuentes oceánicas Atlánticas, siendo TNA la región con el mayor aporte. Siguiendo en orden de importancia, se encuentran la región oceánica TSA, el reciclaje de agua precipitable y el Nordeste de Brasil (NORD). Los resultados de transporte de agua precipitable para los modelos CMIP5 evidencian un orden de importancia similar que para los de ERA5. De lo anterior podemos concluir que los estimados de transporte de agua precipitable para los modelos estudiados captan de manera adecuada la proporcionalidad e importancia de las 20 fuentes hacia NAMZ. La importancia de las regiones Atlánticas tropicales en el aporte de humedad atmosférica hacia el Amazonas ha sido documentada en estudios como Bosilovich & Chern (2006), Drumond et al. (2008; 2014), Rocha et al. (2017), Satyamurty et al. (2013), Sorí et al. (2018), entre otros. Además, múltiples estudios muestran que el reciclaje de humedad es una de las principales fuentes de vapor de agua en la región (Marengo, 2006; Rocha et al., 2017).

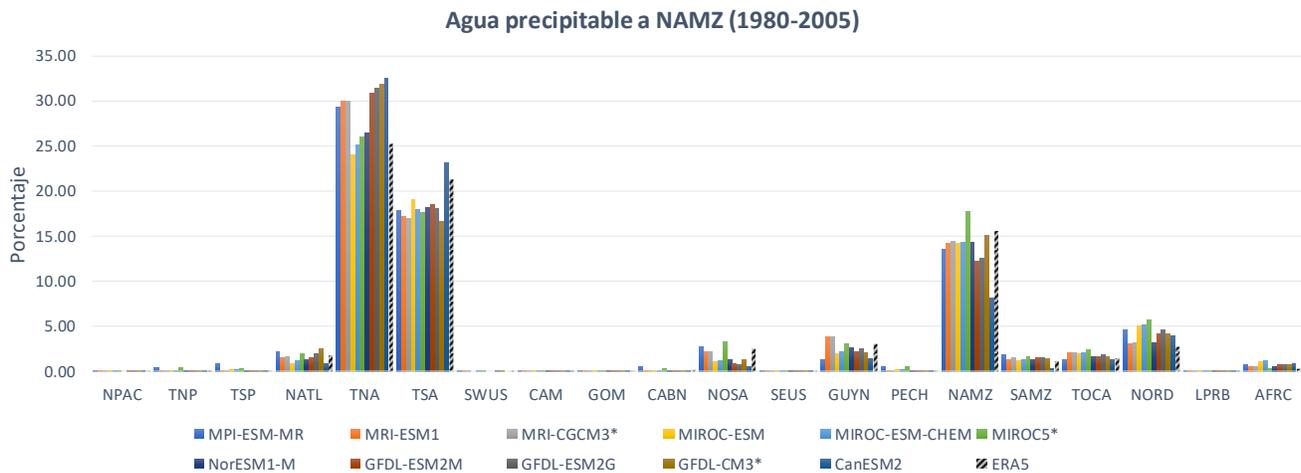


Figura 2.5. Contribuciones porcentuales totales (%) de agua precipitable desde cada una de las 20 regiones de estudio hacia NAMZ durante el periodo histórico (1980-2005). Las barras de colores representan cada uno de los modelos CMIP5 aquí estudiados. Las barras achuradas representan al reanálisis climático ERA5.

Dado el orden de importancia de las fuentes de agua precipitable para NAMZ durante el periodo histórico (1980-2005), se presentan a continuación los ciclos anuales climatológicos de los estimados de esta variable para los 11 modelos CMIP5 y el reanálisis ERA5, desde cada una de ellas (TNA, TSA, NAMZ y NORD), incluyendo además al sur del Amazonas (SAMZ), ya que, a pesar de que es su novena fuente de humedad en orden de importancia, se considera de interés en este estudio.

Observando la Figura 2.6, tenemos que el transporte estimado para los modelos CMIP5 posee un mejor comportamiento desde las dos fuentes oceánicas (TNA y TSA), lo anterior teniendo en cuenta tanto magnitud de la variable como los coeficientes de correlación respecto a los ciclos representados por ERA5. Para la fuente de agua precipitable más importante hacia NAMZ (TNA) durante el periodo histórico, se tienen ciclos anuales que se comportan de manera similar al reanálisis ERA5, con valores máximos entre Diciembre y Enero. Se tienen además valores mínimos de transporte de agua precipitable entre los meses de Junio y Octubre, aunque con subestimaciones en la magnitud de la variable para todos los modelos. En general, los ciclos anuales de transporte de agua precipitable desde TNA hacia NAMZ para los modelos CMIP5 presentan un muy buen comportamiento de la estacionalidad, evidenciado por los altos coeficientes de correlación con ERA5 (superiores o iguales a 0.92).

Al igual que para la fuente TNA, TSA muestra ciclos anuales de transporte de agua precipitable para los modelos con buenas estacionalidades, teniendo correlaciones con ERA5 iguales o superiores a 0.91. A pesar de esto, se observan subestimaciones del transporte de agua precipitable para todos los modelos, en comparación con ERA5, tanto en magnitud como en el porcentaje respecto al total de agua precipitable sobre NAMZ.

Analizando las fuentes continentales de mayor contribución de agua precipitable para NAMZ, encontramos que la estacionalidad no presenta tan buen comportamiento como en el caso de las fuentes oceánicas. Para el reciclaje de agua precipitable (NAMZ a NAMZ), se tienen subestimaciones para los modelos en la mayoría de los meses del ciclo anual climatológico, además de correlaciones bajas, e incluso negativas, respecto a ERA5. Modelos como MPI-ESM-MR, GFDL-ESM2M, GFDL-ESM2G, GFDL-CM3 y CanESM2 poseen correlaciones bajas y negativas, lo que significa que no sólo se tiene una estacionalidad mal representada, sino que en muchos de los casos se presentan comportamientos contrarios en dichos ciclos. No obstante, para algunos de los modelos sí se posee un buen comportamiento del reciclaje de agua precipitable sobre esta región Amazónica: MRI-ESM1 (0.92), MRI-CGCM3 (0.90) y NorESM1-M (0.82). Lo anterior deja en evidencia la existencia de dificultades de los modelos CMIP5 para representar el comportamiento de la estacionalidad del reciclaje de agua precipitable sobre NAMZ, así como para NOSA (Figura 2.2).

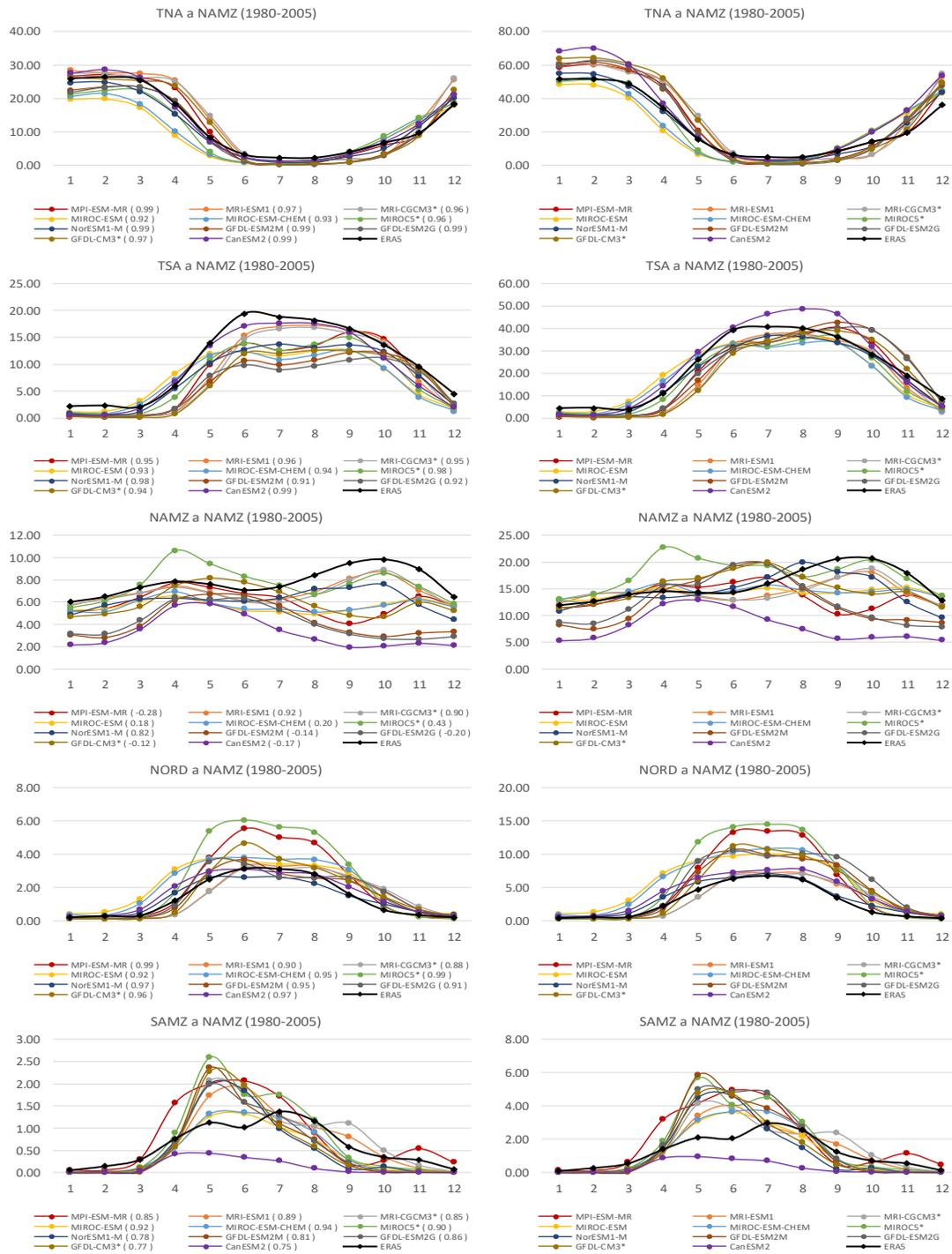


Figura 2.6. Ciclos anuales climatológicos del transporte de agua precipitable desde cada una de las fuentes con mayores contribuciones hacia NAMZ para el periodo histórico (1980-2005). Los ciclos anuales de la columna izquierda se expresan en valor absoluto de transporte de agua precipitable hacia NAMZ (mm). Los ciclos anuales de la columna derecha se expresan en porcentaje de agua precipitable transportada desde cada una de las fuentes respecto al total de agua precipitable sobre NAMZ durante el periodo histórico (%). Las líneas de color representan cada uno de los 11 modelos CMIP5 aquí estudiados; la línea negra representa a ERA5. El eje de las abscisas representa cada uno de los meses del año. Entre paréntesis se presenta el coeficiente de correlación entre los ciclos anuales climatológicos del transporte estimado para los modelos CMIP5 y el estimado para ERA5.

Por su parte, los estimados para los modelos del transporte de agua precipitable desde NORD a NAMZ durante el periodo histórico exhiben un buen comportamiento, con máximos entre los meses de Mayo a Agosto, tal y como se evidencia para ERA5, además de mínimos entre Noviembre y Marzo. A pesar de que para tres de los modelos (MPI-ESM-MR, MIROC5 y GFDL-CM3) existen sobrestimaciones marcadas en la magnitud durante la temporada de máximos, estos poseen valores altos de correlación respecto a ERA5 (0.99, 0.99 y 0.96, respectivamente), lo cual indica un comportamiento similar de la estacionalidad entre los ciclos calculados para dichos modelos y ERA5. Se podría decir incluso que todos los ciclos anuales de transporte de agua precipitable hacia NAMZ de los 11 modelos poseen una buena estacionalidad, siendo el de MRI-CGCM3 el que presenta una menor correlación (0.88) con el ciclo anual de ERA5.

Si bien SAMZ no es una fuente de gran contribución porcentual a NAMZ como las otras cuatro regiones descritas anteriormente (es la novena en orden de importancia en la contribución durante el periodo histórico), sí es considerada una fuente relevante debido a las conexiones que dichas regiones poseen, y a pesar de que sus hidroclimatologías presentan características diferentes (Agudelo et al., 2019; Arias et al., 2011; Marengo, 2009), es necesario analizar cómo una influye en la otra. En la última fila de la Figura 2.6 se detallan los ciclos anuales climatológicos estimados para el transporte de agua precipitable durante el periodo histórico para cada uno de los 11 modelos CMIP5 y ERA5. A pesar de que en los meses con valores mínimos, la mayoría de modelos muestran un buen comportamiento, no sucede lo mismo para los meses de valores máximos, con sobrestimaciones principalmente en Mayo y Junio. Los valores de correlación de los ciclos anuales de los modelos CMIP5 con ERA5 desde esta fuente de humedad son iguales o superiores a 0.75, siendo CanESM2 el modelo que posee la más baja (0.75) y MIROC-ESM-CHEM el que posee la más alta (0.94).

- Transporte de precipitación hacia el norte del Amazonas

La Figura 2.7 presenta los resultados de las contribuciones de precipitación desde cada una de las 20 subregiones estudiadas hacia NAMZ para el periodo histórico (1980-2005), dados por los estimados de transporte de precipitación para los 11 modelos de circulación general y para el reanálisis ERA5. Nótese que el orden de importancia del transporte de precipitación cambia muy poco respecto al de transporte de agua precipitable. Así, las fuentes analizadas para este transporte son las mismas que las evaluadas para el transporte de agua precipitable: TNA, TSA, NAMZ (reciclaje), NORD y SAMZ. Se destaca que los resultados de transporte de precipitación dados para los modelos CMIP5 muestran un orden de importancia de contribución similar que los dados para ERA5. De lo anterior podemos concluir que los estimados de transporte de precipitación obtenidos para los modelos CMIP5 captan, en general, la proporcionalidad e importancia en las contribuciones de precipitación hacia NAMZ desde las 20 fuentes consideradas.

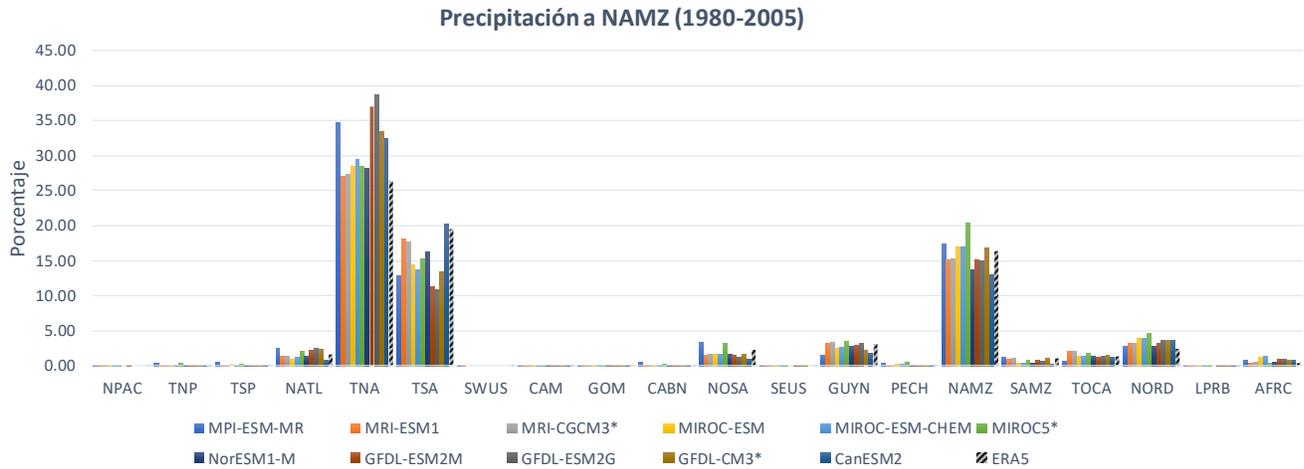


Figura 2.7. Contribuciones porcentuales totales (%) de precipitación desde cada una de las 20 regiones de estudio hacia NAMZ durante el periodo histórico (1980-2005). Las barras de colores representan cada uno de los modelos CMIP5 aquí estudiados. Las barras achuradas representan al reanálisis climático ERA5.

En la Figura 2.8 se muestran los ciclos anuales climatológicos de los estimados de transporte de precipitación durante el periodo histórico (1980-2005) para los modelos CMIP5 y para el reanálisis ERA5, de las fuentes con mayores contribuciones hacia NAMZ. Al igual que para los estimados de transporte de precipitación hacia NOSA, el transporte hacia el NAMZ presenta ciclos anuales climatológicos con mínimos y máximos que corresponden, en general, a los máximos y mínimos del transporte de agua precipitable (Figura 2.6). Además, se tienen subestimaciones de los estimados de transporte de precipitación para los modelos, respecto a ERA5, principalmente desde TNA, TSA y NAMZ (reciclaje).

La precipitación sobre NAMZ durante el periodo histórico proviene de una variedad de fuentes que cambian dependiendo de la época del año, siendo las regiones oceánicas tropicales del Atlántico (TNA y TSA) y el reciclaje de precipitación de la región, las de mayor relevancia. Por ejemplo, durante DEF, la fuente de mayor contribución a la precipitación de NAMZ es TNA, mientras para la temporada MAM el reciclaje de precipitación toma un papel relevante.

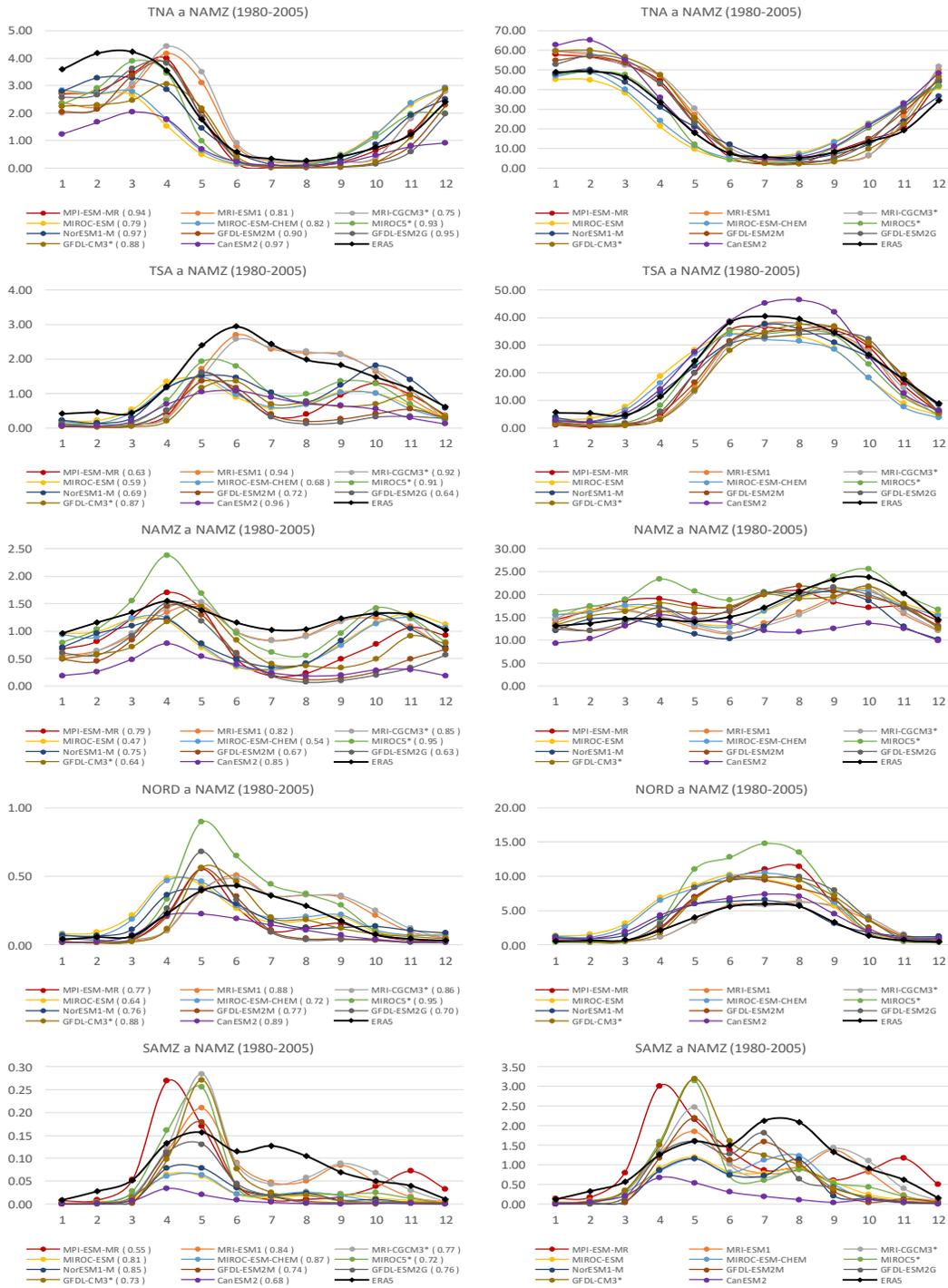


Figura 2.8. Ciclos anuales climatológicos del transporte de precipitación desde cada una de las fuentes con mayores contribuciones hacia NAMZ para el periodo histórico (1980-2005) . Los ciclos anuales de la columna izquierda se expresan en valor absoluto de transporte de precipitación hacia NAMZ (mm/d). Los ciclos anuales de la columna derecha se expresan en porcentaje de precipitación transportada desde cada una de las fuentes respecto al total de precipitación sobre NAMZ durante el periodo histórico (%). Las líneas de color representan cada uno de los 11 modelos CMIP5 aquí estudiados; la línea negra representa a ERA5. El eje de las abscisas representa cada uno de los meses del año. Entre paréntesis se presenta el coeficiente de correlación entre los ciclos anuales climatológicos del transporte estimado para los modelos CMIP5 y el estimado para ERA5.

Las correlaciones entre los ciclos anuales de transporte de precipitación calculados para los modelos CMIP5 con los calculados para reanálisis ERA5 poseen valores más elevados desde la región TNA, lo que significa que es para esta fuente de humedad en la que se observan las mejores estacionalidades de transporte de precipitación hacia NAMZ. Por su parte, el reciclaje de precipitación (NAMZ a NAMZ) posee, en general, valores de correlación más elevados que para el reciclaje de agua precipitable (Figura 2.6 y Figura 2.8 – NAMZ a NAMZ). Esto también se evidencia en el reciclaje de precipitación sobre NOSA.

2.2.1.3. Transporte de humedad atmosférica hacia el sur del Amazonas

- Transporte de agua precipitable hacia el sur del Amazonas

En la Figura 2.9 se muestran las contribuciones totales de agua precipitable hacia SAMZ desde cada una de las 20 subregiones estudiadas durante el periodo histórico (1980-2005), para los 11 modelos CMIP5 y el reanálisis ERA5. En esta se evidencia el orden de importancia de las fuentes de agua precipitable para SAMZ, siendo su reciclaje el principal contribuyente, seguido de TSA, TNA, NAMZ y NORD. Además, se destaca que los resultados en los estimados de transporte de agua precipitable desde cada una de las fuentes dados para los modelos CMIP5 muestran un orden de importancia similar que los calculados para ERA5. Así se concluye que los cálculos de transporte de agua precipitable para los modelos CMIP5 captan de manera adecuada la proporcionalidad e importancia de las contribuciones de agua precipitable desde las 20 fuentes consideradas hacia SAMZ.

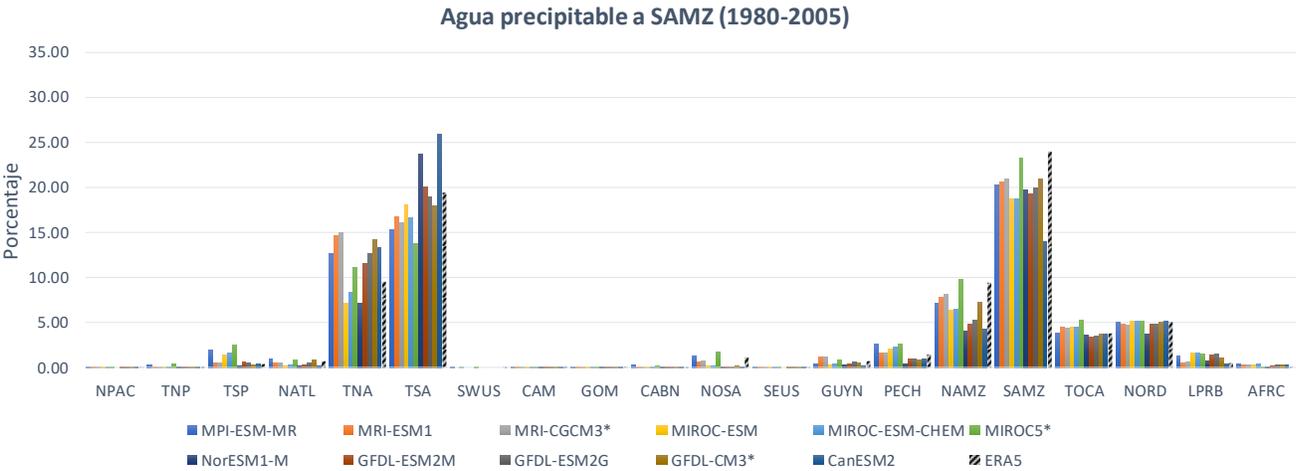


Figura 2.9. Contribuciones porcentuales totales (%) de agua precipitable desde cada una de las 20 regiones de estudio hacia SAMZ durante el periodo histórico (1980-2005). Las barras de colores representan cada uno de los modelos CMIP5 aquí estudiados. Las barras achuradas representan al reanálisis climático ERA5.

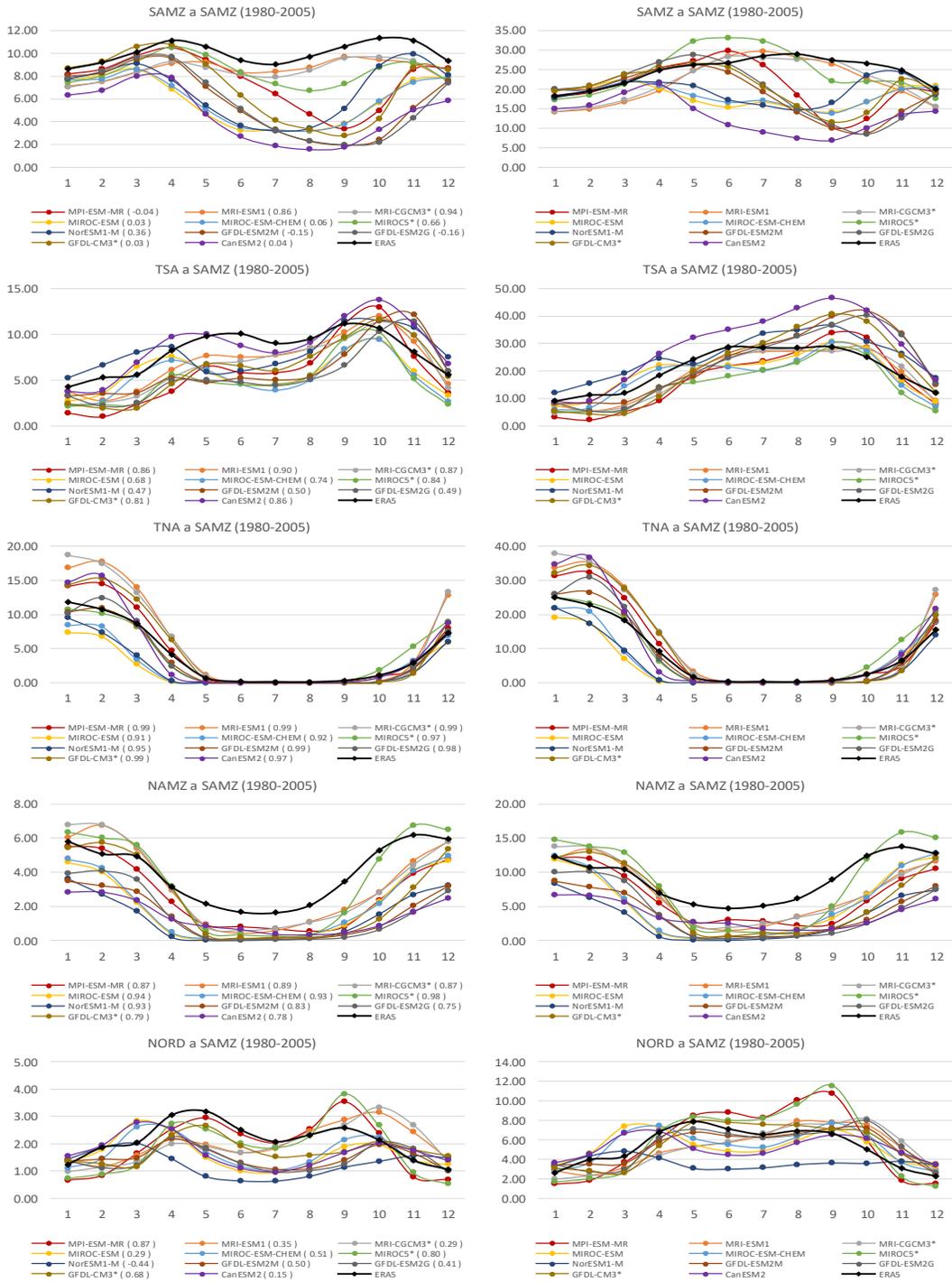


Figura 2.10. Ciclos anuales climatológicos del transporte de agua precipitable desde cada una de las fuentes con mayores contribuciones hacia SAMZ para el periodo histórico (1980-2005). Los ciclos anuales de la columna izquierda se expresan en valor absoluto de transporte de agua precipitable hacia SAMZ (mm). Los ciclos anuales de la columna derecha se expresan en porcentaje de agua precipitable transportada desde cada una de las fuentes respecto al total de agua precipitable sobre SAMZ durante el periodo histórico (%). Las líneas de color representan cada uno de los 11 modelos CMIP5 aquí estudiados; la línea negra representa a ERA5. El eje de las abscisas representa cada uno de los meses del año. Entre paréntesis se presenta el coeficiente de correlación entre los ciclos anuales climatológicos del transporte estimado para los modelos CMIP5 y el estimado para ERA5.

En la Figura 2.10 se presentan los ciclos anuales climatológicos estimados del transporte de agua precipitable durante el periodo histórico (1980-2005) para los 11 modelos CMIP5 y para el reanálisis ERA5, desde las 5 fuentes de mayor contribución a SAMZ. En la primera fila de la Figura 2.10 se pueden observar los estimados de reciclaje de agua precipitable sobre SAMZ durante el periodo histórico para cada uno de los 11 modelos y para ERA5. En general, los estimados para los modelos presentan subestimaciones tanto en la magnitud como en porcentaje de importancia, especialmente entre los meses de Julio y Octubre, lo cual considera dos meses de la temporada seca (Julio y Agosto) y dos meses de la transición a las lluvias (Septiembre y Octubre) en el sur de la selva Amazónica. Por otro lado, son pocos los modelos que tienen un coeficiente de correlación alto con ERA5, entre ellos MRI-ESM1 (0.86) y MRI-CGCM3 (0.94). Además, se destaca que aunque el ciclo anual de este reciclaje para el modelo MIROC5 presenta un coeficiente de correlación relativamente bajo, es el tercero más alto entre los 11 modelos (0.66). Los demás ciclos anuales de reciclaje estimados para los modelos presentan correlaciones muy bajas, e incluso negativas, con el reanálisis ERA5.

Los estimados de transporte de agua precipitable hacia SAMZ desde TSA presentan subestimaciones de las magnitudes respecto a ERA5 para la mayor parte del año climatológico, pero en especial entre los meses de Mayo y Agosto. Por otro lado, mientras el ciclo para ERA5 muestra su pico de transporte en el mes de Septiembre, los de los modelos CMIP5 lo presentan en Octubre o en Noviembre. Para esta fuente de agua precipitable hacia SAMZ se tienen coeficientes de correlación variantes: mientras algunos de los ciclos representados por los modelos poseen una mediana o buena estacionalidad respecto al reanálisis (MPI-ESM-MR (0.86), MRI-ESM1 (0.90), MRI-CMCM3 (0.87), MIROC5 (0.84), GFDL-CM3 (0.81) y CanESM2 (0.86)), el resto se encuentran por debajo de un 0.80 de correlación. Es decir, aproximadamente la mitad de los modelos CMIP5 aquí analizados son capaces de representar, en términos generales, la estacionalidad del transporte de agua precipitable de TSA a SAMZ.

En cuanto al transporte de agua precipitable desde la región oceánica TNA a SAMZ se tiene un muy buen comportamiento de los ciclos anuales calculados para los modelos, en comparación con ERA5, ya que estos muestran sus máximos y mínimos de manera correcta, aunque con variaciones en la magnitud en cada caso. Específicamente, es entre los meses de Mayo y Octubre cuando los ciclos para los modelos siguen con mayor fidelidad la magnitud del transporte presentado por ERA5. Además, las correlaciones entre los ciclos para los modelos y ERA5 son altas, oscilando entre 0.91 y 0.99. Lo anterior sugiere que los ciclos de transporte de agua precipitable desde TNA hacia SAMZ calculados para los modelos CMIP5 siguen de manera adecuada la estacionalidad del ciclo anual de ERA5.

El transporte de agua precipitable desde NAMZ a SAMZ presentan claras subestimaciones para los modelos, tanto en la magnitud como en el porcentaje de importancia como fuente, comparado con ERA5. Sin embargo, y a pesar de que la magnitud de la variable se subestima durante la mayor parte del año, la estacionalidad de estos ciclos presenta un buen comportamiento, alcanzado correlaciones con ERA5 de hasta 0.98 para MIROC5, siendo este el modelo con la mayor correlación, y hasta un mínimo de 0.75 observado para GFDL-ESM2G.

Finalmente, la fuente NORD presenta magnitudes de sus ciclos anuales estimados para los modelos más bajas que ERA5, principalmente entre Abril y Julio, donde la subestimación ocurre para la totalidad de estos. La estacionalidad tiene un buen comportamiento para un par de modelos: MPI-ESM-MR (0.87) y MIROC5 (0.80); mientras que el resto de los ciclos posee valores de correlación con ERA5 que se encuentran entre -0.44 y 0.68, evidenciando poca similitud entre la estacionalidad de los modelos y el reanálisis.

- Transporte de precipitación hacia el sur del Amazonas

La Figura 2.11 muestra las contribuciones totales de precipitación de cada una de las 20 subregiones estudiadas hacia SAMZ para el periodo histórico (1980-2005) dadas por las estimaciones de transporte de precipitación para los 11 modelos CMIP5 estudiados y el reanálisis ERA5. El orden de importancia es similar al presentado en el transporte de agua precipitable, es por esto que las fuentes que se analizan en esta sección son las mismas: SAMZ (reciclaje como fuente principal de precipitación), TSA, TNA, NAMZ y NORD. Comparando las contribuciones totales de precipitación dadas para los modelos con las dadas para ERA5 se concluye que, en general, estas son captadas adecuadamente.

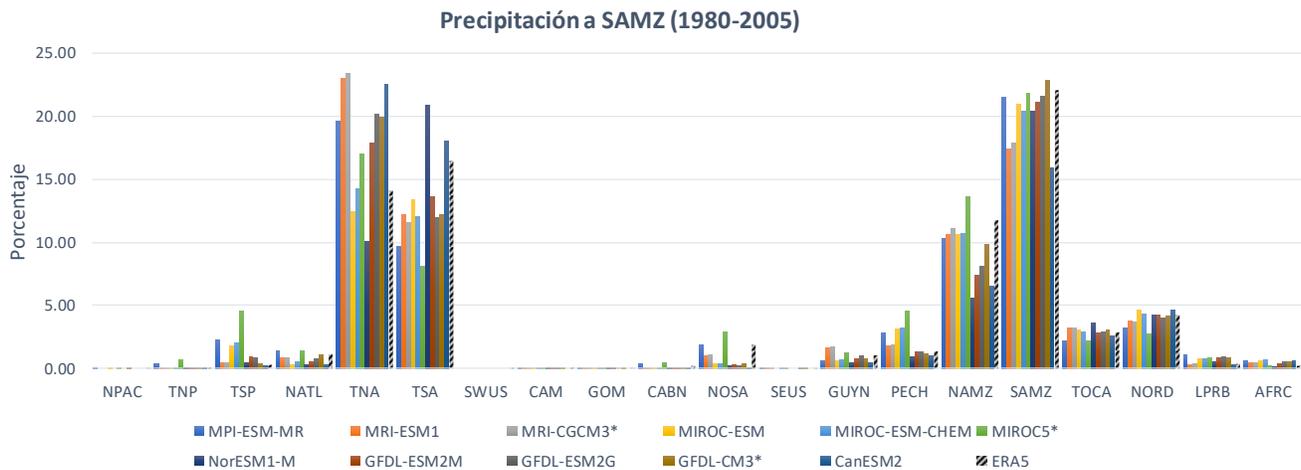


Figura 2.11. Contribuciones porcentuales totales (%) de precipitación desde cada una de las 20 regiones de estudio hacia SAMZ durante el periodo histórico (1980-2005). Las barras de colores representan cada uno de los modelos CMIP5 aquí estudiados. Las barras achuradas representan al reanálisis climático ERA5.

En la Figura 2.12 se presentan los ciclos anuales climatológicos del transporte de precipitación desde las fuentes de humedad más importantes para SAMZ, estimados durante el periodo histórico (1980-2005) para los 11 modelos CMIP5 y el reanálisis ERA5.

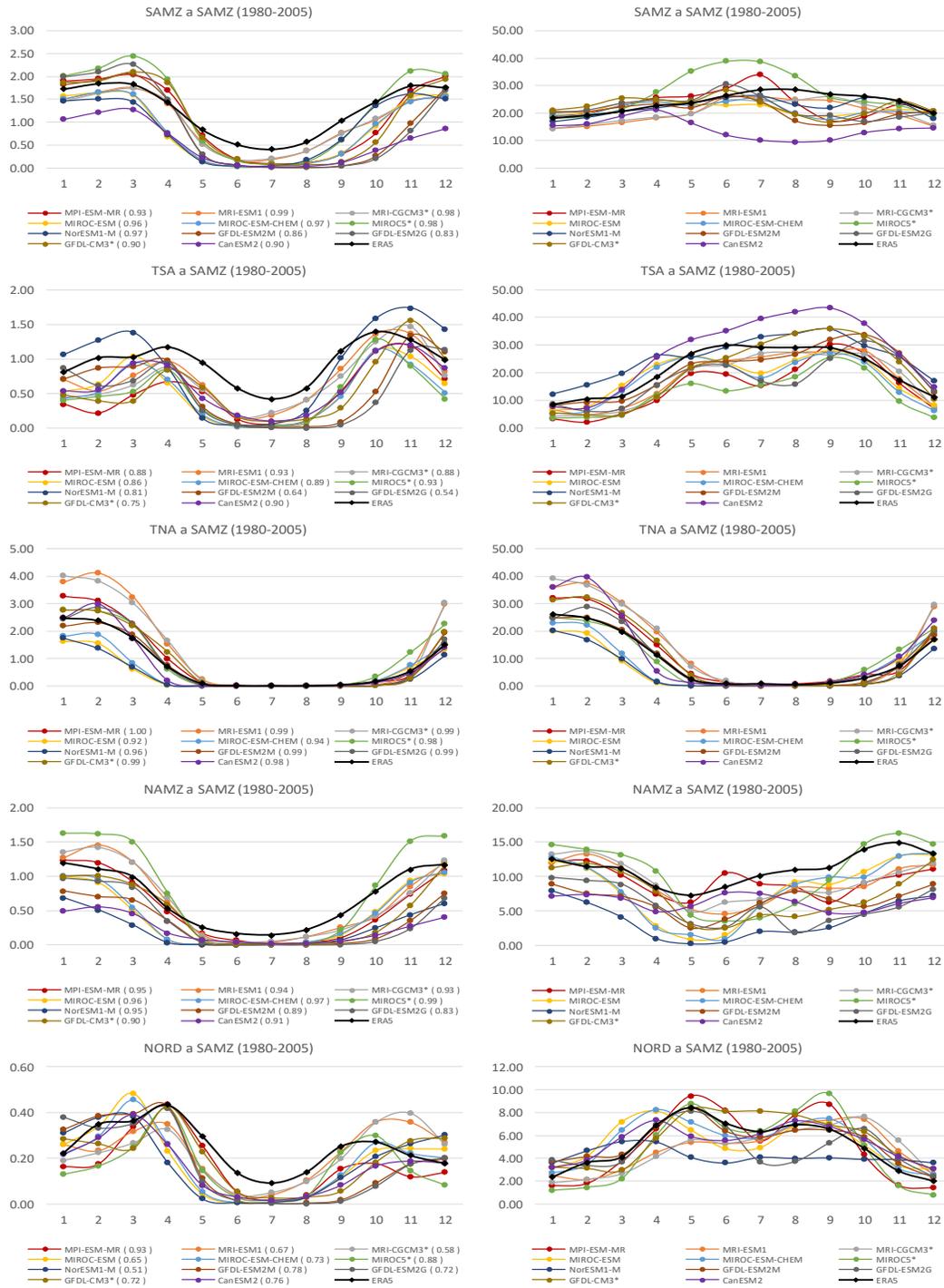


Figura 2.12. Ciclos anuales climatológicos del transporte de precipitación desde cada una de las fuentes con mayores contribuciones hacia SAMZ para el periodo histórico (1980-2005). Los ciclos anuales de la columna izquierda se expresan en valor absoluto de transporte de precipitación hacia SAMZ (mm/d). Los ciclos anuales de la columna derecha se expresan en porcentaje de precipitación transportada desde cada una de las fuentes respecto al total de precipitación sobre SAMZ durante el periodo histórico (%). Las líneas de color representan cada uno de los 11 modelos CMIP5 aquí estudiados; la línea negra representa a ERA5. El eje de las abscisas representa cada uno de los meses del año. Entre paréntesis se presenta el coeficiente de correlación entre los ciclos anuales climatológicos del transporte estimado para los modelos CMIP5 y el estimado para ERA5.

Los ciclos anuales climatológicos del transporte de precipitación desde las 5 fuentes mostrados en la Figura 2.12 presentan comportamientos acordes con los del transporte de agua precipitable (Figura 2.10), con picos de precipitación a lo largo del año generados debido a la cantidad de agua precipitable transportada desde cada una de estas fuentes.

Las correlaciones entre los ciclos anuales de transporte de precipitación calculados para los modelos CMIP5 y los calculados para el reanálisis ERA5 muestran valores más elevados desde TNA (con valores entre 0.92 y 1), lo cual significa que la estacionalidad de los ciclos anuales de transporte de precipitación representada por los modelos desde esta fuente se asemeja a la de ERA5. Por su parte, los ciclos anuales de reciclaje de precipitación estimados (SAMZ a SAMZ) poseen, en general, valores de correlación más elevados que los del reciclaje de agua precipitable (Figura 2.10 y Figura 2.12 – SAMZ a SAMZ), evidenciando que existe un mejor comportamiento de la estacionalidad del transporte de precipitación que del transporte de agua precipitable hacia SAMZ. Esto también se notó en el caso del reciclaje de precipitación sobre NOSA y NAMZ.

Finalmente, es de notar, y recordando la subestimación del reciclaje de agua precipitable para los modelos CMIP5 respecto a ERA5 durante la temporada seca del sur del Amazonas (JJA) (Figura 2.10 – SAMZ a SAMZ), que para el reciclaje de precipitación también se evidencia este comportamiento durante la misma temporada del año, lo cual es consistente con el hecho de que si los estimados de reciclaje de agua precipitable para los modelos presentan subestimaciones en sus magnitudes, también se tengan subestimaciones en las cantidades estimadas de reciclaje de precipitación sobre la región. Se resalta además el papel tan relevante que cumple el reciclaje de precipitación sobre el sur del Amazonas, ya que su porcentaje de importancia respecto a su precipitación total a lo largo del ciclo anual permanece entre un 20% y un 30%, a pesar de que existan disminuciones en la magnitud de la variable en determinadas temporadas del año (primera fila, Figura 2.12).

2.2.2. Distribución espacial del transporte de humedad atmosférica sobre la región de estudio

En la presente sección se realiza el análisis espacial, tanto de los estimados de transporte de agua precipitable como de transporte de precipitación, para los modelos CMIP5 durante el periodo histórico (1980-2005), y se comparan respecto a los estimados para ERA5. Esto permite analizar de forma espacial el transporte de humedad atmosférica hacia las tres regiones de interés (NOSA, NAMZ y SAMZ) desde cinco fuentes diferentes (TNA, TSA, NOSA, NAMZ y SAMZ). Estas fuentes se escogieron ya que, según su clasificación de importancia durante el periodo histórico, son las que mayor contribución de humedad tienen hacia las regiones de interés. Para efectos de presentar resultados concisos, se seleccionaron sólo dos modelos para la discusión de estos mapas espaciales. Dichos modelos son MIROC5 y MRI-CGCM3, que fueron identificados como los que poseen un mejor y un peor desempeño, respectivamente, en la representación de la variable P-E, discutida en el Capítulo I (ver diagramas de Taylor - Figura 1.14). La selección de modelos basada en su representación de la variable P-E se debe, principalmente, a nuestro interés de analizar las diferencias de transporte de humedad atmosférica entre modelos con una representación adecuada y una representación deficiente de esta variable que acopla los balances de humedad entre el suelo y la atmósfera.

2.2.2.1. Transporte de agua precipitable

A continuación, se presentan los promedios climatológicos históricos de los estimados de transporte de agua precipitable para los dos modelos escogidos (MIROC5 y MRI-CGCM3) durante las temporadas DEF y SON, así como la diferencia entre lo que muestran los estimados para dichos modelos respecto a los de ERA5, durante el mismo periodo y para las mismas temporadas. Así, la Figura 2.13 representa los estimados de transporte de agua precipitable desde el océano Atlántico Tropical Norte (TNA), la Figura 2.14 desde el océano Atlántico Tropical Sur (TSA), la Figura 2.15 desde el norte de Suramérica (NOSA), la Figura 2.16 desde el norte del Amazonas (NAMZ) y la Figura 2.17 desde el sur del Amazonas (SAMZ). Todo lo anterior para el periodo histórico (1980-2005) y sobre todo el dominio de estudio.

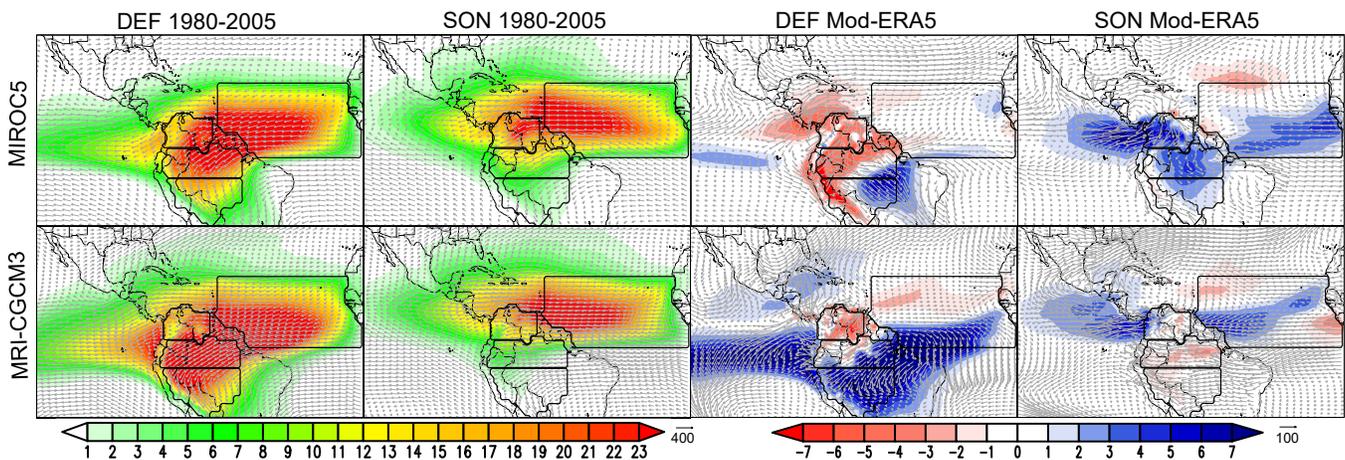


Figura 2.13. Agua precipitable transportada desde el océano Atlántico Tropical Norte (TNA) sobre el dominio de estudio durante el periodo histórico (1980-2005). Cuatro regiones se encuentran resaltadas en el mapa: TNA (fuente de agua precipitable), y NOSA, NAMZ y SAMZ (regiones de interés). Las dos primeras columnas muestran las temporadas del año Diciembre-Enero-Febrero (DEF) y Septiembre-Octubre-Noviembre (SON); las dos últimas columnas muestran las diferencias entre el modelo y ERA5 (Mod – ERA5) para las mismas temporadas y durante el mismo periodo histórico. En las filas se muestran los estimados de los dos modelos escogidos (MIROC5 y MRI-CGCM3). Unidades dadas en mm. Los vectores representan el flujo de humedad integrado en la vertical, en $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$.

La fuente de agua precipitable TNA, que corresponde a la más importante para dos de las regiones de interés (NOSA y NAMZ) y la tercera para el sur de la Amazonía, muestra valores elevados de contribución de la variable para ambos modelos (Figura 2.13), en especial durante la temporada DEF. Además, los mapas de transporte durante DEF para los dos modelos presentan comportamientos similares, con valores más elevados sobre el norte de la Amazonía y el sureste del norte de Suramérica. Para la temporada SON, los valores totales de agua precipitable disminuyen, principalmente hacia el norte y el sur del Amazonas, teniendo un comportamiento similar en ambos modelos. Dicho comportamiento se puede evidenciar claramente en los ciclos anuales climatológicos de transporte de agua precipitable estudiados de la sección anterior (Figura 2.6 y Figura 2.10), en los cuales se observa que el transporte desde TNA hacia la cuenca del Amazonas es mayor durante DEF y menor durante SON. Por su parte, las diferencias presentadas entre los estimados de transporte de agua precipitable para los modelos y los del reanálisis climático ERA5 muestran algunas similitudes, aunque también discrepancias.

Empezando con las similitudes, tenemos que para ambos modelos se sobrestima el transporte de agua precipitable desde TNA hacia el sureste de NAMZ y el nordeste de SAMZ en DEF, además que se subestima la variable sobre NOSA durante esta misma temporada. A pesar de dichas similitudes, se resalta que durante DEF, los estimados para los modelos difieren sobre las regiones del oeste Amazónico, tanto norte como sur, ya que mientras para MIROC5 existen subestimaciones de la variable, para MRI-CGCM3 se tienen sobrestimaciones. Lo anterior se puede relacionar con un flujo desde el Atlántico más débil en el modelo MIROC5, según lo indican los vectores de las diferencias de VIMF que van hacia el este, y un flujo más fuerte desde el Atlántico en el modelo MRI-CGCM3, según lo indican los vectores de las diferencias de VIMF fortalecidos hacia el sur. Para la temporada SON, las diferencias con ERA5 entre los estimados para un modelo y otro se dan principalmente sobre las regiones de NOSA y NAMZ: mientras para MIROC5 se presenta una sobrestimación marcada sobre ambas regiones (de hasta 5mm), para MRI-CGCM3 se tienen subestimaciones relativamente bajas (Figura 2.13).

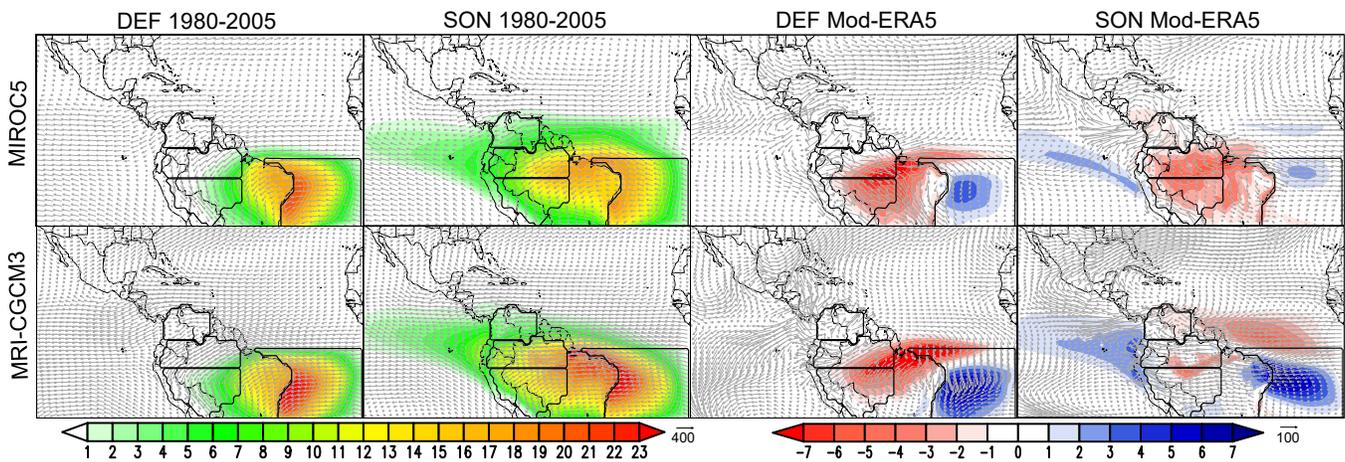


Figura 2.14. Agua precipitable transportada desde el océano Atlántico Tropical Sur (TSA) sobre el dominio de estudio durante el periodo histórico (1980-2005). Cuatro regiones se encuentran resaltadas en el mapa: TSA (fuente de agua precipitable), y NOSA, NAMZ y SAMZ (regiones de interés). Las dos primeras columnas muestran las temporadas del año Diciembre-Enero-Febrero (DEF) y Septiembre-Octubre-Noviembre (SON); las dos últimas columnas muestran las diferencias entre el modelo y ERA5 (Mod – ERA5) para las mismas temporadas y durante el mismo periodo histórico. En las filas se muestran los estimados de los dos modelos escogidos (MIROC5 y MRI-CGCM3). Unidades dadas en mm. Los vectores representan el flujo de humedad integrado en la vertical, en $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$.

En la Figura 2.14 se observa el transporte de humedad estimado desde la región oceánica TSA y se evidencia que su comportamiento es similar para ambos modelos y para las dos temporadas del año, resaltando que para MRI-CGCM3 se tienen valores más elevados que para MIROC5 sobre la costa este de Brasil, tanto para DEF como para SON. Los mapas de diferencias con el reanálisis climático durante DEF muestran un comportamiento similar para ambos modelos, con sobrestimaciones sobre la región fuente (TSA) y subestimaciones sobre el sureste de NAMZ y el nordeste de SAMZ (aunque para MIROC5 esta subestimación llega hasta un poco más al sur de SAMZ que para el caso de MRI-CGCM3). Dichas subestimaciones de transporte sobre el sureste de NAMZ y el nordeste de SAMZ durante DEF podrían estar relacionadas con un flujo más débil saliendo de TSA en estos modelos CMIP5, tal y como lo indican los vectores de las diferencias de VIMF sobre esta región oceánica, en ambos casos. Además, durante SON ambos modelos presentan subestimaciones sobre NAMZ y SAMZ; sin embargo, para el caso de

MIROC5, dicha subestimación se extiende mucho más que en MRI-CGCM3, llegando incluso a regiones como NORD. Lo anterior se relaciona, de nuevo, con flujos de humedad más débiles para MIROC5 que para ERA5, evidenciados en los vectores de diferencia de VIMF hacia el este, sobre TSA y parte de NAMZ. Una pequeña subestimación sobre NOSA es también identificada en los estimados de transporte para ambos modelos durante SON.

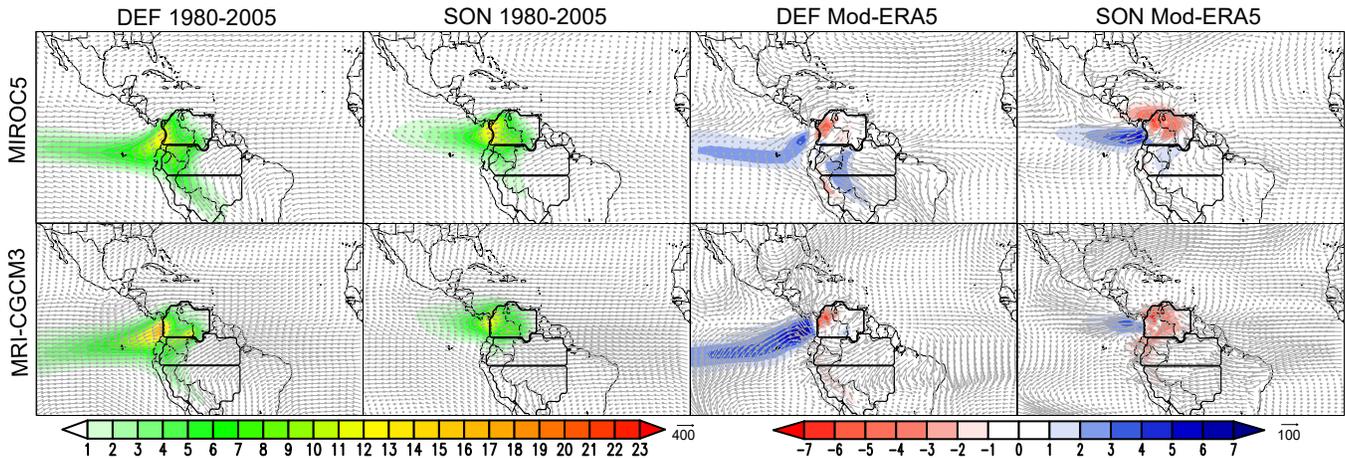


Figura 2.15. Agua precipitable transportada desde el norte de Suramérica (NOSA) sobre el dominio de estudio durante el periodo histórico (1980-2005). Tres regiones se encuentran resaltadas en el mapa: NOSA (fuente de agua precipitable y región de interés), y NAMZ y SAMZ (regiones de interés). Las dos primeras columnas muestran las temporadas del año Diciembre-Enero-Febrero (DEF) y Septiembre-Octubre-Noviembre (SON); las dos últimas columnas muestran las diferencias entre el modelo y ERA5 (Mod – ERA5) para las mismas temporadas y durante el mismo periodo histórico. En las filas se muestran los estimados de los dos modelos escogidos (MIROC5 y MRI-CGCM3). Unidades dadas en mm. Los vectores representan el flujo de humedad integrado en la vertical, en $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$.

En la Figura 2.15 se presenta el transporte de agua precipitable estimado desde NOSA hacia todo el dominio de estudio. Si se detallan sus dos primeras columnas se nota que para ambos modelos los estimados de transporte desde NOSA son espacialmente similares para las dos temporadas. En cuanto a las diferencias entre los estimados para los modelos y los estimados para ERA5 se tiene que durante DEF ambos presentan subestimaciones de la variable sobre el noroeste de NOSA, pero una franja de sobrestimación que se extiende desde NOSA hacia el océano Pacífico. Las subestimaciones mostradas por ambos modelos sobre el noroeste de NOSA se asocian con flujos de humedad más débiles sobre la región, en comparación con ERA5, evidenciado en los vectores de las diferencias de VIMF sobre esta región continental. Durante SON, se presentan subestimaciones para los dos modelos sobre NOSA y sobrestimaciones de transporte de agua precipitable hacia el océano Pacífico.

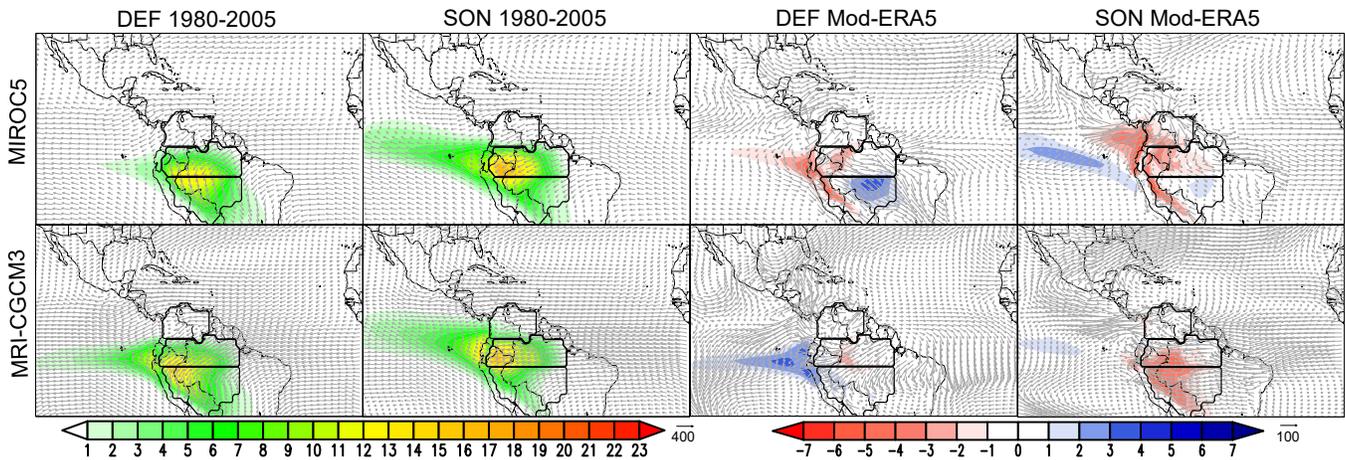


Figura 2.16. Agua precipitable transportada desde el norte del Amazonas (NAMZ) sobre el dominio de estudio durante el periodo histórico (1980-2005). Tres regiones se encuentran resaltadas en el mapa: NAMZ (fuente de agua precipitable y región de interés), y NOSA y SAMZ (regiones de interés). Las dos primeras columnas muestran las temporadas del año Diciembre-Enero-Febrero (DEF) y Septiembre-Octubre-Noviembre (SON); las dos últimas columnas muestran las diferencias entre el modelo y ERA5 (Mod – ERA5) para las mismas temporadas y durante el mismo periodo histórico. En las filas se muestran los estimados de los dos modelos escogidos (MIROC5 y MRI-CGCM3). Unidades dadas en mm. Los vectores representan el flujo de humedad integrado en la vertical, en $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$.

En la Figura 2.16 se presenta el transporte de agua precipitable desde NAMZ hacia todo el dominio de estudio, durante el periodo 1980-2005. En estos mapas se evidencia el reciclaje de humedad que ocurre sobre el norte del Amazonas, además de la cantidad de agua precipitable que sale de NAMZ y se transporta, principalmente, a SAMZ. Esto también se puede observar en la sección anterior, en la cual identificamos que NAMZ es la cuarta fuente más importante en la contribución de agua precipitable hacia SAMZ (Figura 2.9). Se tienen valores más elevados de agua precipitable transportada desde NAMZ hacia SAMZ durante DEF, lo cual se puede ver en el ciclo anual climatológico de este transporte (Figura 2.10 - NAMZ a SAMZ). Por su parte, el reciclaje de agua precipitable sobre NAMZ tiene mayores valores durante SON, tanto para MIROC5 como para MRI-CGCM3 (Figura 2.6 – NAMZ a NAMZ). Para la comparación de los estimados de ambos modelos con los de ERA5, se tiene que las mayores similitudes se presentan durante SON, con subestimaciones del reciclaje sobre NAMZ y del transporte hacia SAMZ. Las subestimaciones para el caso de MIROC5 podrían estar relacionadas con flujos de humedad más débiles que en ERA5, lo cual se evidencia en los vectores de las diferencias de VIMF sobre NAMZ recurvadas hacia el este del dominio. Para MRI-CGCM3, los vectores de las diferencias de VIMF muestran que el modelo podría estar simulando flujos más fuertes que ERA5, saliendo de la región continental hacia el océano Pacífico, lo que podría generar menos humedad atmosférica disponible sobre NAMZ y bajo transporte atmosférico hacia SAMZ. Durante DEF, los estimados de transporte de agua precipitable para los dos modelos también muestran una pequeña subestimación del reciclaje de humedad sobre NAMZ, pero menor que durante SON.

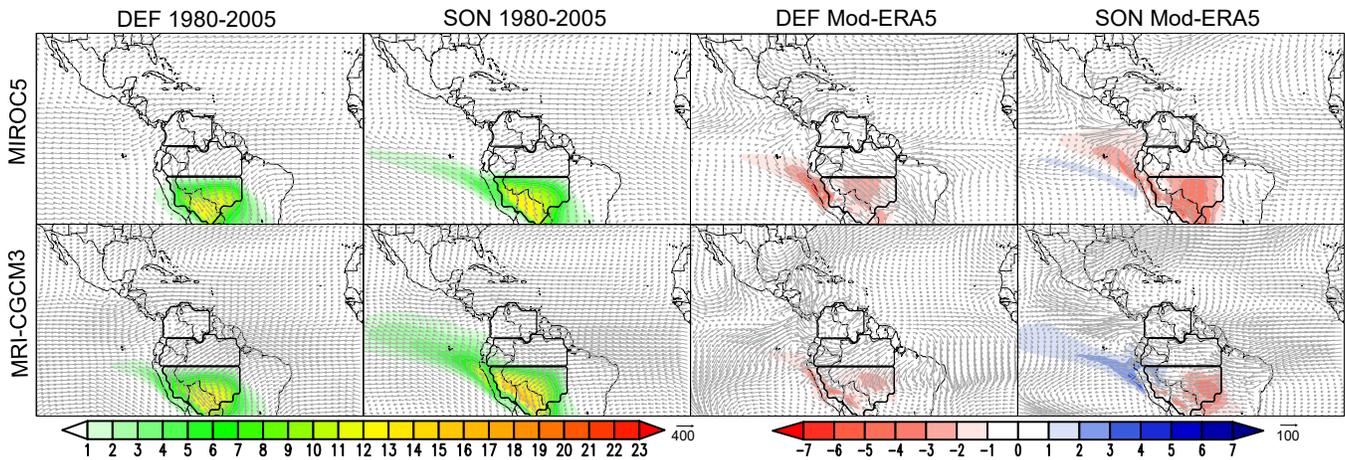


Figura 2.17. Agua precipitable transportada desde el sur del Amazonas (SAMZ) sobre el dominio de estudio durante el periodo histórico (1980-2005). Tres regiones se encuentran resaltadas en el mapa: SAMZ (fuente de agua precipitable y región de interés), y NOSA y NAMZ (regiones de interés). Las dos primeras columnas muestran las temporadas del año Diciembre-Enero-Febrero (DEF) y Septiembre-Octubre-Noviembre (SON); las dos últimas columnas muestran las diferencias entre el modelo y ERA5 (Mod – ERA5) para las mismas temporadas y durante el mismo periodo histórico. En las filas se muestran los estimados de los dos modelos escogidos (MIROC5 y MRI-CGCM3). Unidades dadas en mm. Los vectores representan el flujo de humedad integrado en la vertical, en $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$.

En la Figura 2.17 se presenta el transporte de agua precipitable estimado desde SAMZ durante el periodo histórico. Para ambos modelos, MIROC5 y MRI-CGCM3, se tiene un comportamiento similar del transporte sobre el dominio de estudio para las temporadas DEF y SON. Es evidente, además, el reciclaje de humedad que ocurre sobre SAMZ durante SON. En cuanto a las diferencias entre los estimados para los modelos y los del reanálisis climático ERA5, se presentan subestimaciones por parte de los modelos, principalmente del reciclaje de agua precipitable sobre SAMZ. Lo anterior confirma la subestimación del reciclaje de agua precipitable mostrada en los ciclos anuales climatológicos para los modelos CMIP5 sobre esta región boscosa (Figura 2.10 – SAMZ a SAMZ). Estas subestimaciones de reciclaje sobre SAMZ parecen estar relacionadas, en la mayoría de los casos, con flujos de humedad más débiles sobre la región simulados por los modelos en comparación con ERA5, tanto para DEF como para SON (ver los vectores de diferencia VIMF para ambas temporadas y modelos - Figura 2.17).

2.2.2.2. Transporte de precipitación

A continuación, se presentan los promedios climatológicos históricos (1980-2005) del transporte de precipitación estimado para los dos modelos escogidos (MIROC5 y MRI-CGCM3) durante las temporadas DEF y SON, y la diferencia entre lo estimado para dichos modelos y lo estimado para ERA5, para las mismas temporadas y durante el mismo periodo de tiempo. Así, la Figura 2.18 muestra los estimados del transporte de precipitación desde el océano Atlántico Tropical Norte (TNA), la Figura 2.19 desde el océano Atlántico Tropical Sur (TSA), la Figura 2.20 desde el norte de Suramérica (NOSA), la Figura 2.21 desde el norte del Amazonas (NAMZ) y la Figura 2.22 desde el sur del Amazonas (SAMZ), sobre todo el dominio de estudio durante el periodo histórico (1980-2005).

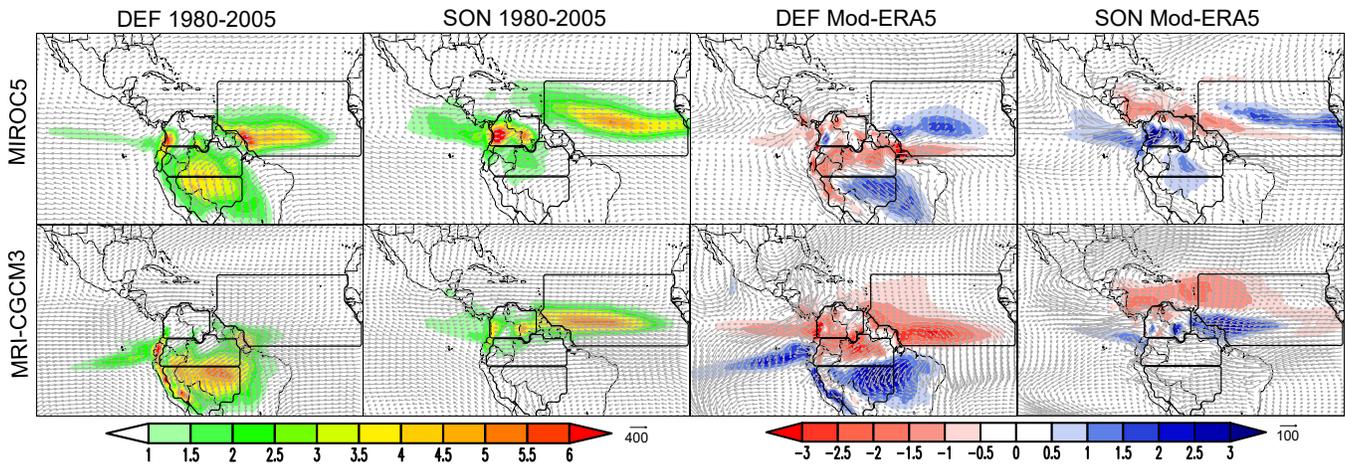


Figura 2.18. Precipitación transportada desde el océano Atlántico Tropical Norte (TNA) sobre el dominio de estudio durante el periodo histórico (1980-2005). Cuatro regiones se encuentran resaltadas en el mapa: TNA (fuente de precipitación), y NOSA, NAMZ y SAMZ (regiones de interés). Las dos primeras columnas muestran las temporadas del año Diciembre-Enero-Febrero (DEF) y Septiembre-Octubre-Noviembre (SON); las dos últimas columnas muestran las diferencias entre el modelo y ERA5 (Mod – ERA5) para las mismas temporadas y durante el mismo periodo histórico. En las filas se muestran los estimados de los dos modelos escogidos (MIROC5 y MRI-CGCM3). Unidades dadas en mm. Los vectores representan el flujo de humedad integrado en la vertical, en $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$.

La Figura 2.18 presenta los estimados de transporte de precipitación durante el periodo histórico desde la región TNA. Se debe recordar que dicha región es la fuente de agua precipitable más importante para dos de las regiones de interés (NOSA y NAMZ) y la tercera para SAMZ. Se observan valores de precipitación transportada más elevados para el modelo MRI-CGCM3 durante DEF y para MIROC5 durante SON. Además, se resalta el comportamiento de esta variable durante las dos temporadas presentadas, con mayores contribuciones de precipitación hacia el norte y el sur de la Amazonía durante DEF. Durante SON, las mayores contribuciones de precipitación desde esta región oceánica se dan hacia NOSA, y tal como sucede para el caso del transporte de agua precipitable, los valores de precipitación transportada disminuyen durante esta temporada sobre NAMZ y SAMZ, lo que también se puede observar en los ciclos anuales presentados en la Figura 2.8 y la Figura 2.12. En cuanto a las diferencias entre los estimados para los modelos y ERA5, se tiene acuerdo en que ambos presentan sobrestimaciones de precipitación transportada desde TNA hacia SAMZ y subestimaciones hacia NOSA y NAMZ durante DEF. Tal y como se había mencionado para el análisis espacial de transporte de agua precipitable desde esta región, dichas subestimaciones hacia NOSA y NAMZ podrían tener explicación dados los flujos de humedad más débiles desde el Atlántico, evidenciados en los vectores de las diferencias de VIMF que van hacia el este; mientras que las sobrestimaciones de transporte de humedad hacia SAMZ, específicamente para el modelo MRI-CGCM3, se explican por un flujo más fuerte desde el Atlántico, evidenciado en los vectores de diferencias de VIMF fortalecidos hacia el sur del dominio. Para SON, se tienen sobrestimaciones de la precipitación transportada desde TNA hacia NOSA, principalmente para el modelo MIROC5.

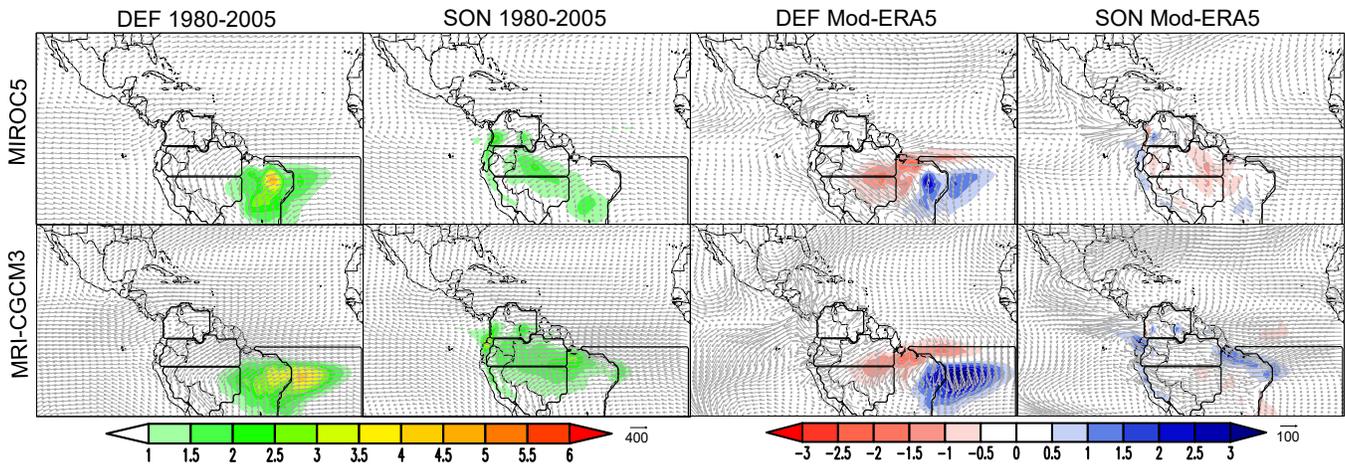


Figura 2.19. Precipitación transportada desde el océano Atlántico Tropical Sur (TSA) sobre el dominio de estudio durante el periodo histórico (1980-2005). Cuatro regiones se encuentran resaltadas en el mapa: TSA (fuente de precipitación), y NOSA, NAMZ y SAMZ (regiones de interés). Las dos primeras columnas muestran las temporadas del año Diciembre-Enero-Febrero (DEF) y Septiembre-Octubre-Noviembre (SON); las dos últimas columnas muestran las diferencias entre el modelo y ERA5 (Mod – ERA5) para las mismas temporadas y durante el mismo periodo histórico. En las filas se muestran los estimados de los dos modelos escogidos (MIROC5 y MRI-CGCM3). Unidades dadas en mm. Los vectores representan el flujo de humedad integrado en la vertical, en $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$.

Los estimados de transporte de precipitación desde TSA sobre todo el dominio de estudio durante el periodo histórico se muestran en la Figura 2.19. Se observan similitudes entre los estimados de transporte para los dos modelos y durante ambas temporadas del año, con aportes más elevados de precipitación desde TSA hacia las tres regiones de interés durante SON que durante DEF, lo cual se puede observar también en sus ciclos anuales (Figura 2.4, Figura 2.8 y Figura 2.12). Las diferencias entre los estimados de transporte de precipitación para ambos modelos y ERA5 muestran similitudes durante DEF, con subestimaciones de la precipitación transportada hacia NAMZ y SAMZ. Similar al transporte de agua precipitable desde TSA, estas subestimaciones se relacionan directamente con flujos de humedad más débiles desde esta región oceánica (ver vectores de diferencias de VIMF sobre TSA - Figura 2.19).

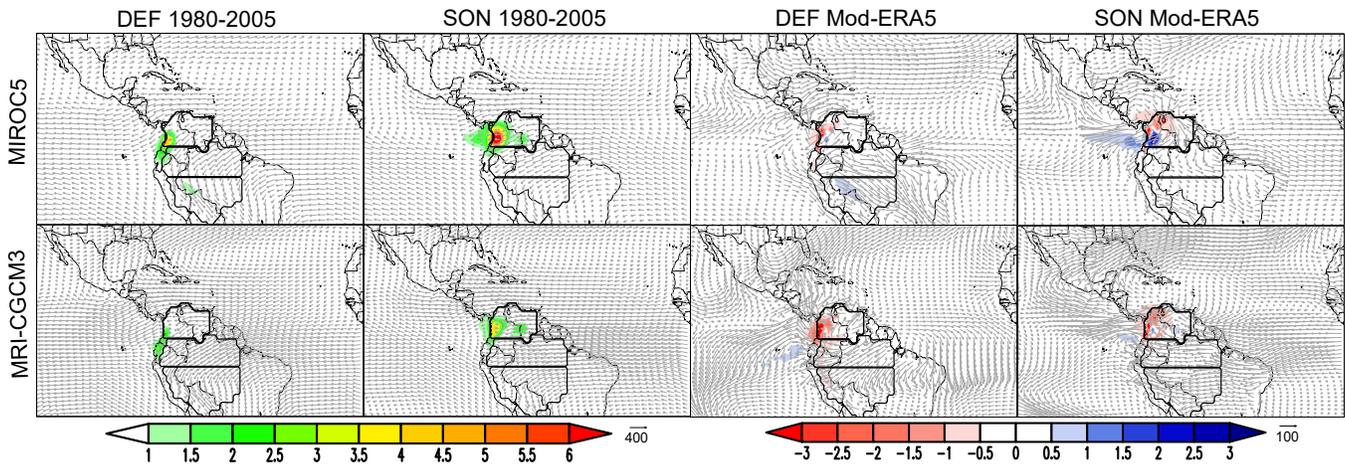


Figura 2.20. Precipitación transportada desde el norte de Suramérica (NOSA) sobre el dominio de estudio durante el periodo histórico (1980-2005). Tres regiones se encuentran resaltadas en el mapa: NOSA (fuente de precipitación y región de interés), y NAMZ y SAMZ (regiones de interés). Las dos primeras columnas muestran las temporadas del año Diciembre-Enero-Febrero (DEF) y Septiembre-Octubre-Noviembre (SON); las dos últimas columnas muestran las diferencias entre el modelo y ERA5 (Mod – ERA5) para las mismas temporadas y durante el mismo periodo histórico. En las filas se muestran los estimados de los dos modelos escogidos (MIROC5 y MRI-CGCM3). Unidades dadas en mm. Los vectores representan el flujo de humedad integrado en la vertical, en $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$.

La Figura 2.20 muestra los estimados de precipitación aportada por NOSA durante el periodo histórico sobre todo el dominio de estudio. Se evidencian estimados de precipitación transportada similares para ambos modelos y temporadas, destacando que para MIROC5 se tienen magnitudes más elevadas. En estos mapas se muestra cómo la precipitación reciclada en NOSA tiene un papel importante, y con mayores magnitudes durante SON (comparado con DEF). Por otro lado, las diferencias entre los estimados para los dos modelos y ERA5 muestran similitudes, principalmente durante DEF, temporada en la que para ambos se subestiman el reciclaje de precipitación al oeste de NOSA, relacionado con flujos de humedad más débiles sobre la región (ver vectores de diferencias de VIMF sobre NOSA - Figura 2.20). Durante SON, los estimados de transporte de precipitación para los modelos presentan más discrepancias, ya que mientras para MIROC5 se tienen subestimaciones al noroeste y sobrestimaciones al suroeste de NOSA, para MRI-CGCM3 se tienen marcadas subestimaciones sobre todo el oeste de la región.

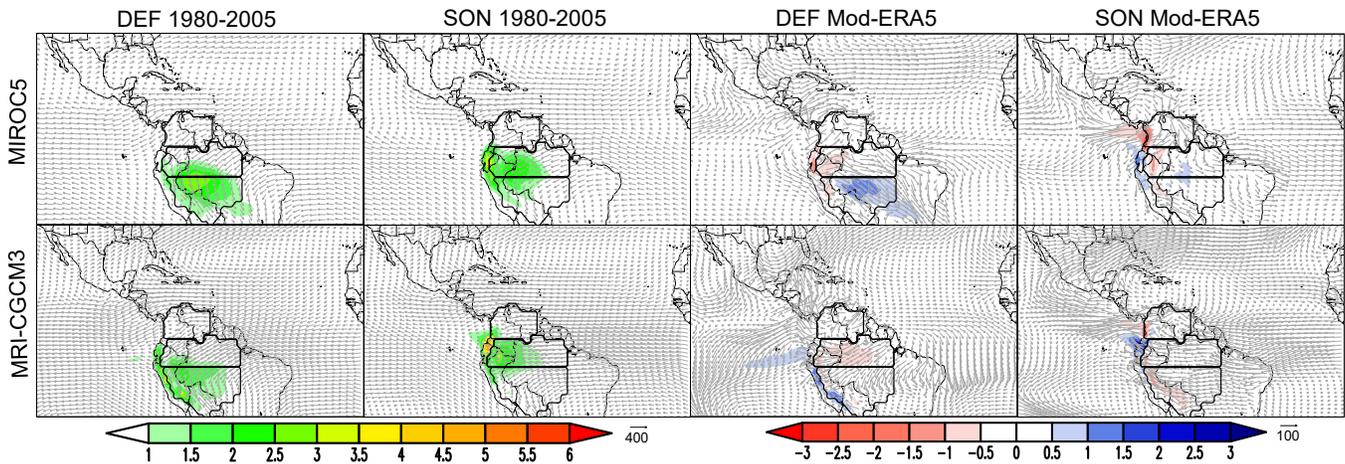


Figura 2.21. Precipitación transportada desde el norte del Amazonas (NAMZ) sobre el dominio de estudio durante el periodo histórico (1980-2005). Tres regiones se encuentran resaltadas en el mapa: NAMZ (fuente de precipitación y región de interés), y NOSA y SAMZ (regiones de interés). Las dos primeras columnas muestran las temporadas del año Diciembre-Enero-Febrero (DEF) y Septiembre-Octubre-Noviembre (SON); las dos últimas columnas muestran las diferencias entre el modelo y ERA5 (Mod – ERA5) para las mismas temporadas y durante el mismo periodo histórico. En las filas se muestran los estimados de los dos modelos escogidos (MIROC5 y MRI-CGCM3). Unidades dadas en mm. Los vectores representan el flujo de humedad integrado en la vertical, en $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$.

El transporte de precipitación estimado desde NAMZ sobre el dominio de estudio para el periodo histórico se observa en la Figura 2.21. Es evidente que durante DEF se tiene aporte de precipitación de NAMZ a SAMZ, lo cual concuerda con el ciclo anual presentado en la Figura 2.12 (NAMZ a SAMZ). Además, durante SON se tiene un aporte significativo de precipitación reciclada sobre la región. Las diferencias entre los estimados de transporte de precipitación para los dos modelos y ERA5 muestran subestimaciones del reciclaje sobre NAMZ en DEF, lo cual podría tener relación con los flujos de humedad más débiles sobre NAMZ (MIROC5) y más fuertes saliendo hacia el Pacífico (MRI-CGCM3) desde la región en cuestión (vectores de diferencia de VIMF sobre NAMZ - Figura 2.21). En el caso de MIROC5 se encuentra, además, sobrestimación sobre SAMZ, evidenciando que los estimados de transporte desde NAMZ a SAMZ durante DEF para el modelo MRI-CGCM3 poseen mayores similitudes con los del reanálisis ERA5.

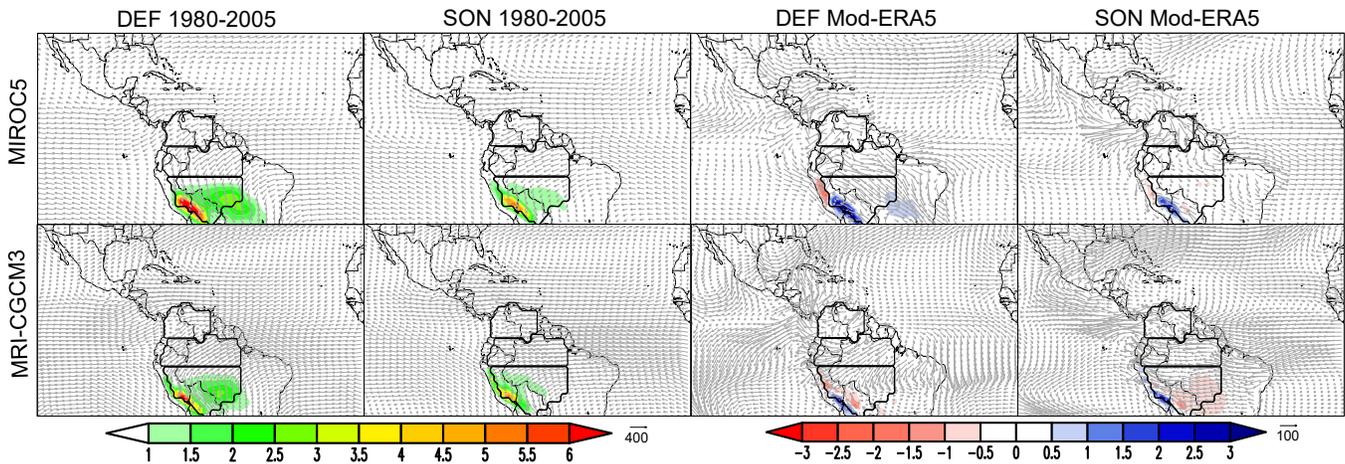


Figura 2.22. Precipitación transportada desde el sur del Amazonas (SAMZ) sobre el dominio de estudio durante el periodo histórico (1980-2005). Tres regiones se encuentran resaltadas en el mapa: SAMZ (fuente de precipitación y región de interés), y NOSA y NAMZ (regiones de interés). Las dos primeras columnas muestran las temporadas del año Diciembre-Enero-Febrero (DEF) y Septiembre-Octubre-Noviembre (SON); las dos últimas columnas muestran las diferencias entre el modelo y ERA5 (Mod – ERA5) para las mismas temporadas y durante el mismo periodo histórico. En las filas se muestran los estimados de los dos modelos escogidos (MIROC5 y MRI-CGCM3). Unidades dadas en mm. Los vectores representan el flujo de humedad integrado en la vertical, en $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$.

Finalmente, en la Figura 2.22 se observan los estimados de transporte de precipitación desde SAMZ sobre todo el dominio de estudio durante el periodo histórico. Los paneles de esta figura muestran que el aporte de precipitación más importante que SAMZ realiza es sobre ella misma, es decir, su reciclaje de precipitación. Se observan estimados de precipitación reciclada sobre SAMZ para ambas temporadas del año; sin embargo, estos son más bajos durante SON, lo cual coincide con la transición entre la temporada seca y la temporada de lluvias en esta región Amazónica. En cuanto a las diferencias entre los estimados para los modelos y ERA5, se exhiben comportamientos similares, presentándose, para ambos casos, sobrestimaciones de reciclaje de precipitación sobre el suroeste de SAMZ, tanto en DEF como en SON.

2.3. Discusión y conclusiones

Conocer y comprender el comportamiento del transporte de las masas de vapor de agua, cómo y hacia dónde van, es de total relevancia, especialmente bajo la influencia del cambio climático (Trenberth et al., 2011). La influencia de este fenómeno puede generar cambios significativos en el comportamiento normal del transporte atmosférico (Gimeno et al., 2012). Por lo general, los cambios anómalos de los patrones, magnitudes y estacionalidades de este transporte de humedad están asociados con la ocurrencia de eventos extremos como sequías (Drumond et al., 2019; Herrera-Estrada et al., 2019; Marengo & Espinoza, 2016; Roy et al., 2019; Salah et al., 2018; Stojanovic et al., 2017) o inundaciones (Lavers et al., 2013; Marengo & Espinoza, 2016; Trenberth et al., 2015), los cuales pueden tener impactos sociales y ambientales devastadores. Es por lo anterior que tener estimaciones adecuadas del transporte de humedad atmosférica sobre las diferentes regiones del globo es esencial en el diagnóstico y pronóstico del movimiento del agua a través de la atmósfera. Lastimosamente, los

datos observacionales del transporte de humedad sobre nuestra región son escasos, por lo que recurrir a los modelos de circulación general continúa siendo una herramienta fundamental para este tipo de estudios (Palomino-Lemus et al., 2017; Samanta et al., 2019). Así, el presente capítulo se enfocó en el análisis de los estimados históricos (1980-2005) del transporte de humedad atmosférica para los 11 modelos CMIP5 considerados, identificando los principales sesgos respecto al reanálisis ERA5. Dicho análisis estuvo centrado en tres regiones de importancia: el norte de Suramérica (NOSA), el norte del Amazonas (NAMZ) y el sur del Amazonas (SAMZ). Las estimaciones de transporte de humedad atmosférica se realizaron utilizando el modelo analítico semi-lagrangiano DRM, desarrollado por Domínguez et al., (2006) y modificado por Martínez & Domínguez, (2014). A continuación se presentan las principales conclusiones por región de interés.

2.3.1. Norte de Suramérica

Las fuentes de humedad atmosférica hacia el norte de Suramérica han sido previamente estudiadas desde diferentes enfoques (Arias, Martínez, et al., 2015; Hoyos et al., 2018; Poveda et al., 2014; Sakamoto et al., 2011). La ubicación geográfica de la región favorece el transporte de vapor de agua hacia su interior, con gran cantidad de fuentes que poseen variaciones a lo largo del año (Arias, Martínez, et al., 2015; Gimeno et al., 2012; Hoyos et al., 2018; Poveda et al., 2014). En este sentido, los vientos alisios se encargan de transportar la humedad desde el océano Atlántico y del Amazonas hacia los Andes orientales (Arias, Martínez, et al., 2015; Espinoza et al., 2015; Hoyos et al., 2018). Las principales fuentes de humedad hacia el norte de Suramérica identificadas en este análisis coinciden con otros estudios (Arias, Martínez, et al., 2015; Hoyos et al., 2018), resaltando las contribuciones desde el océano Atlántico y del reciclaje de humedad como las fuentes de humedad de mayor relevancia (Hoyos et al., 2018).

De este capítulo se llega a la conclusión de que, en general y a pesar de que los estimados de transporte de humedad hacia el norte de Suramérica dados para los modelos CMIP5 y para ERA5 poseen diferencias a lo largo del ciclo anual, tanto en magnitud como en estacionalidad, estos se encuentran medianamente bien representados en la mayoría de los casos, con resultados que, en general, son similares a los encontrados en estudios anteriores: mayores aportes desde las fuentes Atlánticas, contribuciones de reciclaje de humedad durante las temporadas MAM y SON, y un aporte significativo de humedad desde el norte del Amazonas durante JJA (Arias, Martínez, et al., 2015; Hoyos et al., 2018; Sakamoto et al., 2011).

Sintetizando los resultados más importantes para los estimados de transporte de humedad atmosférica hacia el norte de Suramérica mediante los modelos CMIP5 considerados, tenemos que:

- 1) Las principales fuentes de agua precipitable hacia NOSA son: TNA, NOSA (reciclaje), TSA, NATL, GUYN y NAMZ. Pese a que NAMZ no es la fuente dominante para NOSA, se resalta su importancia en contribución durante la temporada JJA.
- 2) Las fuentes más importantes de precipitación para NOSA son: TNA, NOSA (reciclaje), TSA, GUYN, NAMZ y NATL. Nótese que el orden cambia un poco con respecto a las fuentes de agua precipitable.

- 3) En cuanto al transporte de humedad hacia NOSA durante el periodo histórico se concluye que los modelos CMIP5 presentan estacionalidades y magnitudes del aporte de agua precipitable más cercanas a las de ERA5 desde las regiones oceánicas, especialmente desde TSA. Al igual que para el caso de transporte de agua precipitable, los estimados para los modelos CMIP5 poseen una mejor estacionalidad respecto a ERA5 para el transporte de precipitación desde TSA (mayores valores de correlación con ERA5). En general, se presentan subestimaciones del transporte de precipitación por parte de los modelos y desde todas las fuentes de importancia, las cuales se suponen tiene relación con la subestimación de la precipitación total durante el periodo histórico dada por estos, fundamentalmente sobre las fuentes continentales (ver ciclos anuales de precipitación histórica de NOSA y NAMZ en la Figura 1.3).

- 4) El reciclaje de agua precipitable sobre NOSA posee las menores correlaciones en comparación con sus otras cuatro fuentes de mayor contribución (TNA, TSA, NATL y NAMZ), lo cual significa que su estacionalidad posee mayores sesgos respecto a lo estimado para ERA5 que el transporte desde otras regiones. Además, se concluye que se tienen menores sesgos respecto a ERA5 para la estacionalidad del reciclaje de precipitación que de agua precipitable, a pesar de que para todos los modelos se tienen subestimaciones en su magnitud respecto al reanálisis.

- 5) Por medio de un análisis detallado de los valores de correlación de los estimados de transporte para los modelos respecto a los de ERA5, se llega a la conclusión de que la estacionalidad de estos posee diferentes comportamientos, dependiendo de la fuente de humedad en particular (Tabla 2.1). Por ejemplo, para el caso de NOSA tenemos que la estacionalidad del transporte de agua precipitable desde TNA es mejor representada por el modelo CanESM2, pero que para el transporte de precipitación lo hace mejor el modelo MPI-ESM-MR (Tabla 2.1). Por su parte, la estacionalidad del reciclaje sobre NOSA, tanto de agua precipitable como de precipitación, es mejor para MIROC5, con correlaciones de 0.92 y 0.94, respectivamente. Para la estacionalidad del transporte de humedad desde TSA a NOSA se destaca el modelo CanESM2, resaltando que otros modelos también lo hacen muy bien, con valores de correlación muy cercanos: MIROC5 para el transporte de agua precipitable, y NorESM1-M, MIROC-ESM-CHEM, GFDL-ESM2M, MIROC5 y MIROC-ESM para el transporte de precipitación. Finalmente, los estimados para MPI-ESM-MR son los que poseen la mejor estacionalidad del transporte de humedad desde NATL.

Dado que los estimados para los modelos con las mejores estacionalidades pueden variar dependiendo de la fuente, la Figura 2.23 sintetiza de manera general las correlaciones entre los modelos CMIP5 y ERA5. La Figura 2.23 muestra la dispersión, la media, los mínimos y los máximos de los valores de correlación dados para cada modelo con respecto a ERA5, para las cinco fuentes de humedad de mayor importancia hacia la región de interés específica. Para el caso de NOSA, se consideraron las siguientes fuentes: TNA, NOSA (reciclaje), TSA, NATL y NAMZ. De esta manera, la Figura 2.23a muestra los modelos CMIP5 con mayores coeficientes de correlación para la estacionalidad de los ciclos anuales de transporte de agua precipitable y de transporte de precipitación, teniendo en cuenta, en conjunto, las cinco fuentes mencionadas. Así, tenemos que MPI-ESM-MR y MIROC5 son los que mejor representan dicha estacionalidad, ya que son los que poseen la menor dispersión en los valores de correlación, destacando además que MIROC5 es el modelo que más se acerca a la magnitud del transporte de precipitación de

ERA5 durante casi todo el ciclo anual climatológico, desde las cinco fuentes de mayor importancia (Figura 2.4). A pesar de que modelos como CanESM2 también poseen una buena estacionalidad desde algunas de las fuentes, presentan altos sesgos en la estacionalidad del transporte de precipitación desde algunas otras.

2.3.2. Norte del Amazonas

Debido a que el Amazonas es una región clave por su papel en la regulación del clima local, regional y global (Arraut et al., 2012; A. Drumond et al., 2014; IPCC, 2013; Marengo et al., 2004; Nobre et al., 2016; Sampaio et al., 2018; Spracklen & Garcia-Carreras, 2015; Zemp et al., 2014), el entendimiento del comportamiento de la circulación atmosférica y de sus fuentes de humedad atmosférica más importantes tiene relevancia, no sólo para ella misma sino para Suramérica en general (Rocha et al., 2017). Modificaciones en la circulación atmosférica del Amazonas podrían generar grandes cambios en otras regiones del globo, y en particular, sobre el norte de Suramérica (Agudelo et al., 2019; Magrin et al., 2014; Molina et al., 2019; Ruiz-Vásquez et al., 2020).

Estudios recientes han mostrado que el reciclaje de humedad más alto en cuencas a nivel mundial se da específicamente sobre regiones boscosas, tales como el Amazonas y el Congo (Tuinenburg et al., 2020). El reciclaje de humedad en el Amazonas posee un aporte de 20%, aproximadamente, en la generación de su precipitación total (15% para el norte y 40% para el sur) (Rocha et al., 2017). Otros estudios más recientes sugieren tasas de reciclaje de precipitación sobre el Amazonas aún más altas, hasta de 36% (Tuinenburg et al., 2020). Rocha et al. (2017) realizaron una evaluación de la distribución de los componentes del balance hídrico sobre la cuenca del Amazonas y determinaron que, en general, esta región se comporta tanto como sumidero, como fuente de humedad para otras regiones, dependiendo de la temporada del año (Rocha et al., 2017), y que sus principales fuentes son de origen Atlántico, además de su reciclaje de humedad (Rocha et al., 2017). Otros estudios concluyen que el Atlántico Tropical es la fuente de humedad más importante para el Amazonas, (Bosilovich & Chern, 2006; Drumond et al., 2008, 2014; Satyamurty et al., 2013; Sorí et al., 2018). Lo anterior coincide claramente con nuestros resultados, que identifican a TNA, TSA y NAMZ (reciclaje) como las principales fuentes de humedad para el norte del Amazonas. Otros análisis de transporte de humedad han dado a conocer que la humedad que ingresa a la Amazonía lo hace preferiblemente desde el este, es decir desde las regiones Atlánticas, principalmente durante JJA (Martins et al., 2015). Lo anterior se hace evidente en nuestros resultados, especialmente para el transporte de agua precipitable de TSA a NAMZ (Figura 2.6).

Sintetizando nuestros resultados sobre los estimados de transporte de humedad hacia el norte del Amazonas mediante los modelos CMIP5 tenemos que:

- 1) Las principales fuentes de agua precipitable para NAMZ son: TNA, TSA, NAMZ (reciclaje), NORD y GUYN.
- 2) Las fuentes más importantes de transporte de precipitación para NAMZ son: TNA, NAMZ (reciclaje), TSA, NORD y GUYN. Nótese que el orden cambia un poco con respecto a las fuentes de agua precipitable.
- 3) Los estimados para los modelos CMIP5 poseen una mejor estacionalidad y magnitud del transporte de agua precipitable desde las regiones oceánicas (TNA y TSA), siendo TNA la mejor en ambas características. Para el caso de la estacionalidad del transporte de precipitación, los estimados de los modelos CMIP5

presentan un mejor desempeño desde TNA que desde las otras cuatro fuentes (mayores valores de correlación con ERA5). Se notan además, subestimaciones en el transporte de precipitación para los modelos CMIP5, principalmente desde TNA, TSA y NAMZ (reciclaje). Dichas subestimaciones se suponen tiene relación con la subestimación de la variable precipitación total durante el periodo histórico dada por los modelos, especialmente sobre las fuentes continentales y TNA (Figura 1.2 y Figura 1.3).

- 4) Los ciclos anuales de reciclaje de agua precipitable sobre NAMZ estimados para los modelos tienen las menores correlaciones con los estimados de ERA5, en comparación con las otras fuentes, lo cual significa que los modelos poseen mayores dificultades para representar la estacionalidad de este reciclaje. Además, la mayoría de los estimados para los modelos CMIP5 subestiman su magnitud. Por otro lado, se concluye que los modelos tienen una mejor estacionalidad del reciclaje de precipitación que de agua precipitable, a pesar de que para todos los modelos se subestima la magnitud, en comparación con ERA5.
- 5) El análisis detallado de los estimados para los modelos CMIP5 que poseen mejores estacionalidades del transporte de agua precipitable y del transporte de precipitación desde cada una de las fuentes de humedad hacia NAMZ se presenta en la Tabla 2.1. Al igual que para NOSA, los modelos que representan las mejores estacionalidades de transporte hacia NAMZ varían dependiendo de la fuente de humedad. En general, los estimados para los modelos poseen una buena estacionalidad del transporte de humedad desde las dos regiones Atlánticas (TNA y TSA), y aunque CanESM2 es el modelo que tiene la mejor estacionalidad para ambos transportes atmosféricos desde estas dos regiones oceánicas, son varios los modelos que también lo hacen muy bien, con valores de correlación muy cercanos a los de CanESM2: (i) Para el caso de transporte de agua precipitable desde TNA, todos los estimados para los modelos se catalogan como buenos, con correlaciones entre 0.92 y 0.99; por su parte, para el transporte desde TSA, todas las correlaciones están entre 0.91 y 0.99, siendo CanESM2, MIROC5 y NorESM1-M los mejores modelos. (ii) Para el caso del transporte de precipitación desde TNA, también se destacan NorESM1-M, GFDL-ESM2G, MPI-ESM-MR, MIROC5 y GFDL-ESM2M, con correlaciones mínimas de 0.90; y desde TSA se destacan los modelos MRI-ESM1 (0.94), MRI-CGCM3 (0.92) y MIROC5 (0.91), con valores de correlación con ERA5 superiores a 0.90.

Al igual que para el caso de NOSA, el análisis de la distribución de las correlaciones entre ciclos anuales de transporte hacia la región NAMZ se basó en una síntesis general de cómo los 11 modelos representan la estacionalidad del transporte de agua precipitable y del transporte de precipitación hacia la región, desde las cinco fuentes de humedad más importantes para ella. En la Figura 2.23b se observa la dispersión, la media, los mínimos y los máximos de los valores de correlación de los ciclos anuales de transporte estimados para cada modelo con respecto a ERA5, para las cinco fuentes de humedad de mayor contribución hacia NAMZ (TNA, TSA, NAMZ, NORD y SAMZ). Así, los modelos con mejor estacionalidad del transporte para ambas variables desde todas estas fuentes de humedad (en conjunto) hacia NAMZ son MRI-ESM1, MRI-CGCM3 y NorESM1-M, aunque MIROC5 también presenta un buen comportamiento, especialmente para la estacionalidad del transporte de precipitación. A pesar de que CanESM2 lo hace bien para algunas fuentes específicas, como las Atlánticas, la dispersión de las gráficas evidencia que su estacionalidad del transporte de agua precipitable desde algunas de las fuentes hacia NAMZ no es la mejor, específicamente en su reciclaje de agua precipitable (correlación con ERA5 de -0.17 – ver Figura

2.6: NAMZ a NAMZ). De la distribución de correlaciones para NAMZ (Figura 2.23b) se resalta, además, que se presenta una mayor dispersión de estos valores en el transporte de agua precipitable para la mayoría de los modelos. Dicha dispersión ocurre debido al pobre desempeño de la estacionalidad del reciclaje de agua precipitable dada para los modelos CMIP5 (a excepción de MRI-ESM1, MRI-CGCM3 y NorESM1-M), teniendo incluso correlaciones negativas. De esta manera, los estimados para los modelos CMIP5 aquí analizados presentan serios problemas en la representación de la estacionalidad del reciclaje de agua precipitable sobre la región norte del Amazonas, y en general, la mayoría de ellos presentan altas dispersiones en sus valores de correlación con ERA5 del transporte de agua precipitable hacia NAMZ desde sus cinco principales fuentes de humedad.

2.3.3. Sur del Amazonas

Sintetizando los resultados de los estimados de transporte de humedad atmosférica hacia el sur del Amazonas según los 11 modelos CMIP5 analizados en este estudio, tenemos que:

- 1) Las principales fuentes de agua precipitable para SAMZ son: SAMZ (reciclaje), TSA, TNA, NAMZ y NORD.
- 2) Las fuentes más importantes de precipitación para SAMZ son: SAMZ (reciclaje), TNA, TSA, NAMZ y NORD. Nótese que el orden cambia un poco con respecto a las fuentes de agua precipitable.
- 3) Los estimados para los modelos CMIP5 poseen una mejor estacionalidad del transporte de agua precipitable y del transporte de precipitación hacia SAMZ desde TNA que desde sus otras cuatro fuentes. Tanto para el transporte de agua precipitable como para el de precipitación, se evidencian subestimaciones de magnitud por parte de los modelos, especialmente para los meses de mitad de año (Figura 2.10 y Figura 2.12). Dichas subestimaciones en ambos transportes se relacionan directamente con la subestimación de la variable precipitación total durante el periodo histórico dada por los modelos, especialmente sobre las fuentes continentales y TNA (Figura 1.2 y Figura 1.3).
- 4) En cuanto al reciclaje de agua precipitable en SAMZ, se presentan correlaciones bajas con ERA5 para los ciclos anuales estimados de los modelos CMIP5. Además, se tienen subestimaciones de la magnitud respecto a ERA5, en especial durante la temporada seca y la de transición a las lluvias en el sur del Amazonas (JJA y SON, respectivamente). Se tiene una mejor estacionalidad del reciclaje de precipitación que del reciclaje de agua precipitable, a pesar de casi todos los estimados para los modelos también subestiman, aunque en menor cantidad, la magnitud de la variable durante gran parte del año, y de que todos los modelos, sin excepción, lo hacen entre Mayo y Octubre (abarcando toda la temporada seca del sur del Amazonas y parte de la de transición a las lluvias). Dichas subestimaciones durante la temporada seca por parte de los modelos de circulación general se han notado desde CMIP3 y aún perduran en CMIP5 (Hirota & Takayabu, 2013; Martins et al., 2015).
- 5) Un análisis más detallado sobre los modelos CMIP5 que mejor estacionalidad poseen del transporte de agua precipitable y del transporte de precipitación desde cada una de las fuentes de humedad hacia SAMZ se presenta en la Tabla 2.1. De nuevo, los mejores modelos varían según la fuente de humedad.

Para el caso del reciclaje (SAMZ a SAMZ), los modelos de la familia MRI (MRI-CGCM3 y MRI-ESM1) son los que mejor lo hacen. Para el transporte de agua precipitable de TSA a SAMZ, la mejor representación la tiene MRI-ESM1, mientras para el transporte de precipitación lo hace mejor MIROC5.

Dada la variedad de los mejores modelos para las diferentes fuentes, en la Figura 2.23c observamos la dispersión, la media, los mínimos y los máximos de los valores de correlación entre los ciclos anuales de transporte dados para cada modelo con ERA5, para las cinco fuentes de humedad de mayor importancia en contribución hacia SAMZ (SAMZ, TSA, TNA, NAMZ y NORD). Estos resultados demuestran que, aunque los mejores modelos varían dependiendo de la fuente, algunos de ellos se destacan por su buen comportamiento en la representación del transporte de humedad de manera general. Este es el caso de MIROC5, que posee una buena estacionalidad para ambos transportes de humedad durante el periodo histórico, especialmente para el transporte de precipitación, para el que existe menor dispersión de las correlaciones con ERA5. Por su parte, MPI-ESM-MR y CanESM2 también se destacan por su buena estacionalidad del transporte de precipitación. Y es que a pesar de que CanESM2 no es el modelo con mejor representación del transporte hacia SAMZ desde ninguna de las fuentes de precipitación (Tabla 2.1), en general lo hace muy bien, con coeficientes de correlación altos desde todas ellas. Para SAMZ (Figura 2.23c), se concluye que los estimados de transporte para los modelos CMIP5 aquí evaluados presentan menor dispersión en sus correlaciones de ciclos anuales para el transporte de precipitación con respecto a ERA5, lo cual significa mayores acuerdos con el reanálisis en la representación de la estacionalidad de esta variable hacia SAMZ desde sus cinco fuentes principales analizadas en conjunto, en comparación con el transporte de agua precipitable. Lo anterior es un comportamiento que también es observado para NAMZ.

Tabla 2.1. Modelos CMIP5 con mejor desempeño en la representación de la estacionalidad del transporte de agua precipitable y del transporte de precipitación para cada región de interés, respecto a ERA5. Se detalla cada una de las tres regiones de interés y sus fuentes de importancia. Los modelos aquí presentados presentan las mayores correlaciones con el transporte estimado con ERA5.

Correlaciones con ERA5					
Sumidero de humedad	Fuente de humedad	Transporte de agua precipitable		Transporte de precipitación	
NOSA	TNA	CanESM2	▲ 0.97	MPI-ESM-MR	■ 0.93
	NOSA	MIROC5	■ 0.92	MIROC5	■ 0.94
	TSA	CanESM2	▲ 0.99	CanESM2	▲ 0.99
	NATL	MPI-ESM-MR	▲ 0.98	MPI-ESM-MR	▼ 0.85
	NAMZ	MRI-ESM1	■ 0.93	MIROC-ESM-CHEM	▲ 0.98
NAMZ	TNA	CanESM2	▲ 0.99	CanESM2	▲ 0.97
	TSA	CanESM2	▲ 0.99	CanESM2	▲ 0.96
	NAMZ	MRI-ESM1	■ 0.92	MIROC5	▲ 0.95
	NORD	MIROC5	▲ 0.99	MIROC5	▲ 0.95
	SAMZ	MIROC-ESM-CHEM	■ 0.94	MIROC-ESM-CHEM	▼ 0.87
SAMZ	SAMZ	MRI-CGCM3	■ 0.94	MRI-ESM1	▲ 0.99
	TSA	MRI-ESM1	■ 0.90	MIROC5	■ 0.93
	TNA	MPI-ESM-MR	▲ 0.99	MPI-ESM-MR	▲ 1.00
	NAMZ	MIROC5	▲ 0.98	MIROC5	▲ 0.99
	NORD	MPI-ESM-MR	▼ 0.87	MPI-ESM-MR	■ 0.93

Según la información presentada en la Tabla 2.1, la estacionalidad del reciclaje de agua precipitable y de precipitación es mejor representada por el modelo MIROC5 para el norte de Suramérica, por MRI-ESM1 (reciclaje de agua precipitable) y MIROC5 (reciclaje de precipitación) para el norte del Amazonas, y por los dos modelos de la familia MRI (MRI-CGCM3 y MRI-ESM1) para el sur del Amazonas. En general, se resalta que MIROC5 es identificado un mayor número de ocasiones como el modelo de mejor desempeño en la representación de la estacionalidad del transporte de agua precipitable y del transporte de precipitación para cada una de las regiones de interés, con respecto a ERA5. Según la Tabla 2.1, dicho modelo es el mejor en 8 oportunidades, seguido por CanESM2 con 7, MPI-ESM-MR con 7, MRI-ESM1 con 4, MIROC-ESM-CHEM con 3 y finalmente, MRI-CGCM3 con 1. Contrariamente a MIROC5 y realizando un análisis similar al anterior, pero con los modelos que ocupan la última posición en su desempeño en la representación de la estacionalidad del transporte de humedad para cada región de interés respecto a ERA5, se llega a la conclusión que GFDL-ESM2G es uno de los modelos que posee los mayores inconvenientes. Incluso, si se observan la Figura 2.23 y la Figura 2.24, se evidencia que los modelos de la familia GFDL hacen parte de los que presentan las mayores dispersiones de los coeficientes de correlación entre sus ciclos anuales y los de ERA5.

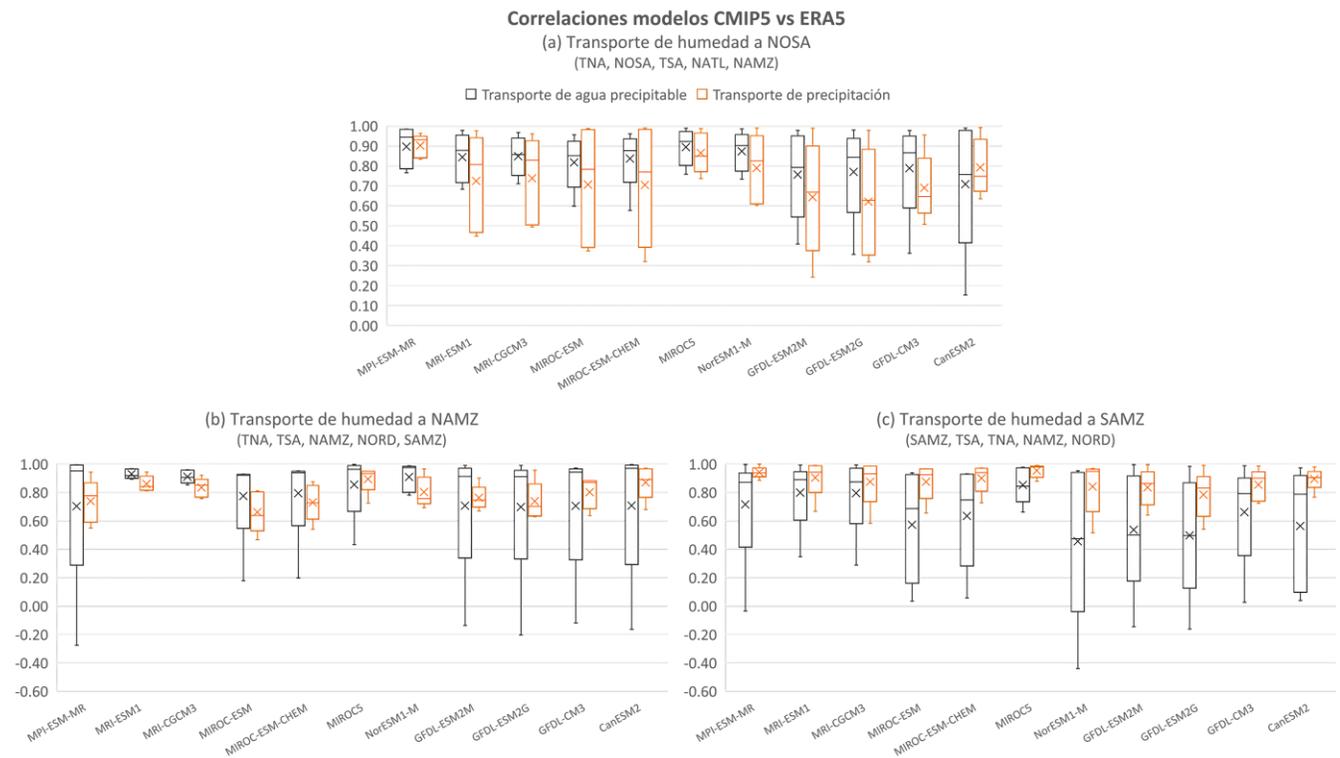


Figura 2.23. Distribución de los coeficientes de correlación entre los ciclos anuales (estacionalidad) del transporte de humedad (transporte de agua precipitable y transporte de precipitación) representados por cada uno de los 11 modelos CMIP5 y ERA5 durante el periodo histórico (1980-2005). Se presentan las distribuciones de correlaciones para el transporte desde las 5 fuentes de mayor importancia para cada una de las tres regiones de interés ((a) NOSA: TNA, NOSA, TSA, NATL y NAMZ; (b) NAMZ: TNA, TSA, NAMZ, NORD y SAMZ; (c) SAMZ: SAMZ, TSA, TNA, NAMZ y NORD). Las equis (X) muestran la media de las correlaciones de las cinco fuentes respectivas y del modelo en particular.

Correlaciones modelos CMIP5 vs ERA5

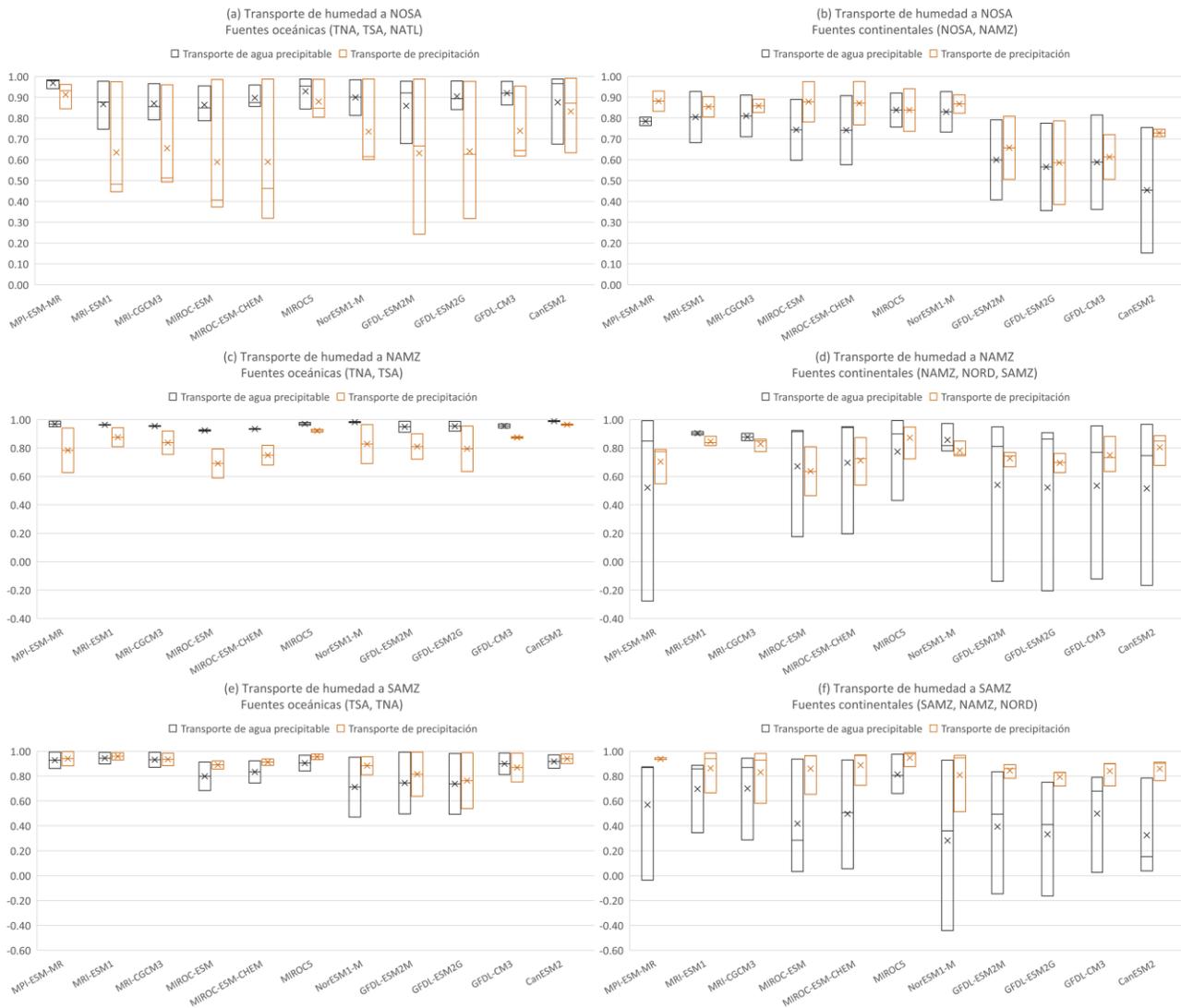


Figura 2.24. Distribución de los coeficientes de correlación entre los ciclos anuales (estacionalidad) del transporte de humedad (transporte de agua precipitable y transporte de precipitación) representados por cada uno de los 11 modelos CMIP5 y ERA5 durante el periodo histórico (1980-2005). Se presentan las distribuciones de correlaciones para el transporte de humedad discriminadas entre fuentes oceánicas y continentales de mayor contribución para cada una de las tres regiones de interés (**NOSA:** (a) Fuentes oceánicas: TNA, TSA, NATL y (b) Fuentes continentales: NOSA, NAMZ; **NAMZ:** (c) Fuentes oceánicas: TNA, TSA y (d) Fuentes continentales: NAMZ, NORD, SAMZ; **SAMZ:** (e) Fuentes oceánicas: TSA, TNA y (f) Fuentes continentales: SAMZ, NAMZ, NORD). Las equis (X) muestran la media de las correlaciones de las cinco fuentes respectivas y del modelo en particular.

De manera general, en la Figura 2.24 se logra observar que el transporte de humedad desde las regiones terrestres hacia la cuenca del Amazonas (NAMZ y SAMZ), incluyendo el reciclaje de cada una de ellas, posee las menores correlaciones con el ciclo anual de ERA5, en comparación con los ciclos anuales del transporte de humedad atmosférico desde las regiones oceánicas, especialmente para el transporte de agua precipitable. Esto

se debe, casi exclusivamente, al problema que existe en la representación de la estacionalidad del ciclo anual de los estimados de reciclaje de agua precipitable sobre ambas regiones, con correlaciones bajas para la mayoría de los modelos CMIP5 (incluso negativas), respecto a ERA5 (ver correlaciones en Figura 2.6 - NAMZ a NAMZ y Figura 2.10 - SAMZ a SAMZ). En general, los estimados de transporte de humedad para los modelos CMIP5 poseen mayores inconvenientes con el reciclaje de agua precipitable sobre las regiones continentales que con el transporte a ellas desde el océano, lo cual se puede relacionar directamente con las dificultades que poseen dichos modelos en simular el ciclo anual de la evaporación sobre las masas continentales, vistas en el Capítulo I (Figura 1.7), y las cuales a su vez, podrían estar relacionadas con las parametrizaciones de las interacciones suelo-atmósfera específicas de estos modelos de circulación general (Dirmeyer et al., 2013b, 2013a; Koster et al., 2002; Lorenz et al., 2016).

Por otro lado, teniendo en cuenta los modelos CMIP5 que poseen los menores (MIROC-ESM, MIROC-ESM-CHEM, MIROC5) y los mayores (MRI-ESM1, MRI-CGCM3) sesgos en la representación de la variable P-E para el periodo histórico (1980-2005), según el análisis de diagramas de Taylor presentado en el Capítulo I (Figura 1.14), se observa que no existe una diferencia notable en cuanto a la magnitud y la estacionalidad de los estimados del transporte de humedad entre los dos conjuntos de modelos, aunque espacialmente puedan mostrar diferencias desde algunas de las fuentes y en algunas temporadas (ver análisis espacial del transporte de humedad en la pág. 78). No obstante, se destaca que MIROC5, el cual fue identificado en el Capítulo I como uno de los modelos con mejor representación de las cuatro variables estudiadas sobre todo el dominio de estudio (precipitación, evaporación, agua precipitable y P-E), es también uno de los que presenta, en general, los mejores estimados de transporte de humedad, especialmente de transporte de precipitación, desde todas las fuentes consideradas hacia las regiones estudiadas (Figura 2.23). Aunque algunos de los modelos también se destacan en casos específicos, los estimados de transporte calculados para MIROC5 tienen un buen comportamiento para las tres regiones de interés. Lo anterior sugiere que una buena representación en conjunto de las variables precipitación, evaporación y agua precipitable por parte de los modelos CMIP5, produce en general, los mejores estimados de transporte de humedad mediante DRM. Esto tiene sentido, si se considera la premisa de que el seguimiento de la humedad atmosférica es más preciso al procesar o al tener datos de entrada que son más detallados y/o bien representados (Tuinenburg & Staal, 2020).

Así, el modelo MIROC5 se sigue destacando en el presente estudio y confirma de nuevo el buen desempeño de sus variables atmosféricas y cómo estas pueden, a su vez, generar estimados de transporte y de reciclaje de humedad atmosférica adecuados y cercanos a lo representado por un reanálisis de última generación como ERA5. MIROC5 ha sido catalogado por diferentes estudios como un modelo con una representación aceptable de la precipitación sobre nuestra región (Bonilla-Ovallos & Mesa Sánchez, 2017; Ortega et al., 2020; Ortega & Arias, 2018; Rincón et al., 2018), además de ser uno de los modelos capaces de representar fenómenos de circulación atmosférica regional como el Chorro del Chocó sobre el oeste de Colombia (Palomino-Lemus et al., 2015; Sierra et al., 2018). En particular, esta buena representación del Chorro del Chocó por parte de MIROC5 se encuentra directamente relacionada con su aceptable representación de la precipitación en la región y de la posición de la ZCIT (Sierra et al., 2018). Nuestro análisis añade, entonces, que MIROC5 no sólo tiene una buena representación de la precipitación sobre la región, sino que también es capaz de representar variables como evaporación y agua precipitable, y que en conjunto, esto contribuye a producir estimados de transporte y de reciclaje de humedad más cercanos a la realidad.

En cuanto al Amazonas, se tiene que los modelos MRI-ESM1 y MRI-CGCM3 destacan por su buena representación de la estacionalidad del transporte de humedad atmosférica para NAMZ, desde sus fuentes de mayor contribución, con valores altos de correlación con ERA5 y poca dispersión (Figura 2.23b). MIROC5 también posee un buen desempeño para NAMZ, especialmente para la variable transporte de precipitación. Para el caso de SAMZ tenemos, nuevamente, a MIROC5 dentro de los mejores modelos en cuanto a estacionalidad, especialmente para el transporte de precipitación (Figura 2.23c). Además, se concluye que la gran dispersión de los coeficientes de correlación para el transporte de agua precipitable observada en la Figura 2.23 (b y c) tiene una relación directa con sesgos en la estacionalidad de los estimados de reciclaje de agua precipitable sobre estas regiones. Es decir, dicha dispersión está dada, casi exclusivamente, por las bajas correlaciones que se tienen entre los estimados de reciclaje de agua precipitable de la mayoría de los modelos CMIP5 y el reanálisis ERA5 sobre NAMZ y SAMZ, poniendo en evidencia, nuevamente, los inconvenientes existentes en la estimación de esta variable sobre dichas zonas continentales y la relación que esto podría tener con las dificultades en las simulaciones del ciclo anual de la evaporación por parte de los modelos CMIP5 sobre ellas (Figura 1.7).

Capítulo III

Análisis de proyecciones de transporte de humedad atmosférica para finales del siglo XXI (2070-2100) bajo el escenario RCP8.5

3.1. Introducción

Una de las consecuencias del cambio climático es la intensificación del ciclo del agua (Allan & Soden, 2008; Held & Soden, 2006; O’Gorman & Schneider, 2009). Diversos estudios han aportado a la comprensión de cómo el cambio climático puede modificar variables atmosféricas, tales como precipitación, evaporación, o cantidad de vapor de agua en la atmósfera, y cómo el movimiento de estas masas de agua cambiará bajo el forzamiento radiativo generado por el aumento de las emisiones antrópicas de GEI. El IPCC ha encabezado esta tarea, dando a conocer regularmente el balance de la evidencia científica sobre el cambio climático, además de sus impactos dentro de los ámbitos naturales y sociales (IPCC, 2014). En la actualidad, los modelos de circulación general son las herramientas más adecuadas para el análisis de la variabilidad a futuro del clima terrestre (Palomino-Lemus et al., 2017; Samanta et al., 2019), ya que por medio de sus proyecciones bajo diferentes escenarios, podemos entender cómo el sistema climático podría transformarse con dichos forzamientos.

Una de las consecuencias que este fenómeno puede generar sobre el clima planetario es la modificación del transporte de masas húmedas alrededor del globo (Lavers et al., 2015). Los cambios observados en las últimas décadas sobre algunas regiones del mundo han encendido las alarmas en el campo científico. Estudios como el de Liu y Allan (2013) concluyeron que uno de los efectos del cambio climático es que las regiones tropicales húmedas serán cada vez más húmedas, mientras que las secas serán cada vez más secas (Liu & Allan, 2013). Algunos otros estudios como los de Chen et al. (2014), Kharin et al. (2013), Polade et al. (2014), Sillmann et al. (2013), Toreti et al. (2013), entre otros, han concluido que los extremos de precipitación serán cada vez más frecuentes y de mayor magnitud en muchas regiones del planeta (Lavers et al., 2015).

Una mejor comprensión de cómo se podría comportar el movimiento del agua a través de la atmósfera bajo efectos de cambio climático daría una explicación de porqué o de qué manera la precipitación sobre ciertas regiones se verá afectada. Pocos son los estudios que analizan la variable de transporte de humedad bajo escenarios de cambio climático. Lavers et al. (2015) analizan cómo los modelos CMIP5 proyectan el transporte de vapor de agua bajo efecto del cambio climático a nivel mundial, identificando incrementos en este transporte atmosférico a nivel global, principalmente en las altas latitudes del hemisferio norte, donde se observa una señal robusta de aumento de precipitación tanto en el presente como en proyecciones para el siglo XXI (Lavers et al., 2015). Además, el aumento global de vapor de agua también ha sido bien documentado y responde conforme a la relación de Clausius-Clapeyron (Held & Soden, 2006; Lavers et al., 2013, 2015; O’Gorman & Muller, 2010; Trenberth, 2011).

En este tercer capítulo se analizan los resultados de los estimados de transporte y reciclaje de humedad en las regiones estudiadas para el periodo comprendido entre 2070 y 2100, calculados a partir de las proyecciones para

finales del siglo XXI provenientes de los 11 modelos CMIP5 bajo el escenario extremo RCP8.5 y por medio de la implementación del modelo analítico semi-lagrangiano DRM. Al igual que en el capítulo anterior, se analizan tres regiones de interés: norte de Suramérica (NOSA), norte del Amazonas (NAMZ) y sur del Amazonas (SAMZ).

3.2. Resultados y análisis

3.2.1. Promedios regionales de transporte de humedad para finales del siglo XXI

A continuación, se estudian las proyecciones para finales del siglo XXI del reciclaje y transporte de humedad atmosférica hacia las tres regiones de interés, obtenidas para los 11 modelos CMIP5 bajo el escenario RCP8.5. Para ello, se analizan gráficas de contribución porcentual desde las fuentes de humedad de mayor contribución para cada una de las tres regiones indicadas, y los ciclos anuales climatológicos de transporte de humedad dados para estos modelos. Al igual que en el Capítulo II, las variables a analizar son transporte de agua precipitable y transporte de precipitación.

3.2.1.1. Proyecciones de transporte de humedad atmosférica hacia el norte de Suramérica para finales del siglo XXI

- Transporte de agua precipitable hacia el norte de Suramérica

Para el análisis de proyecciones para finales del siglo XXI del transporte de agua precipitable hacia el norte de Suramérica se consideran las regiones contribuyentes más importantes identificadas durante el periodo histórico (Capítulo II). Así, para NOSA tenemos, en orden de mayor a menor contribución en el clima presente: TNA, NOSA (reciclaje), TSA, NATL y NAMZ.

La Figura 3.1 muestra la contribución porcentual de agua precipitable desde cada una de las fuentes de mayor importancia hacia NOSA, tanto para el periodo histórico como para las proyecciones. Además, se detallan los ciclos anuales de las diferencias entre la proyección para finales de siglo (2070-2100) y la simulación histórica (1980-2005) (futuro-histórico) para cada uno de los modelos CMIP5.

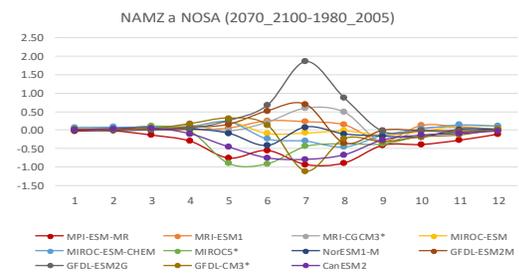
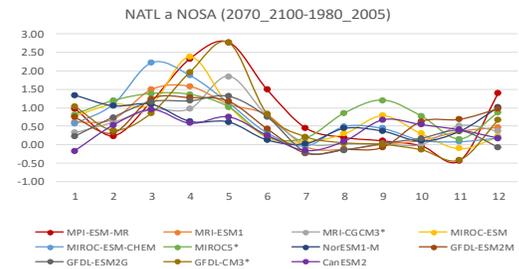
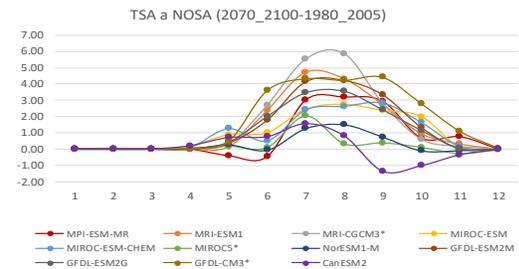
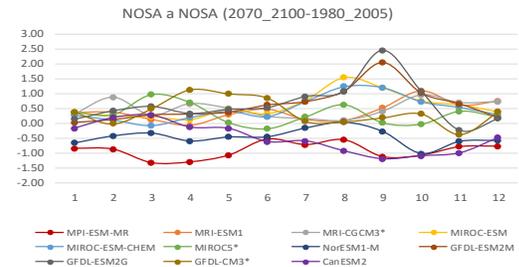
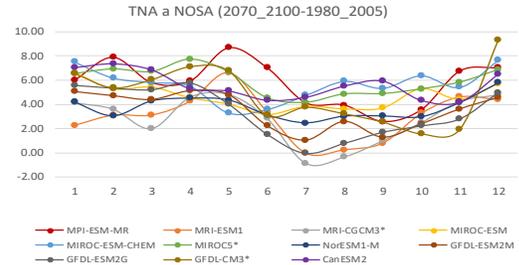
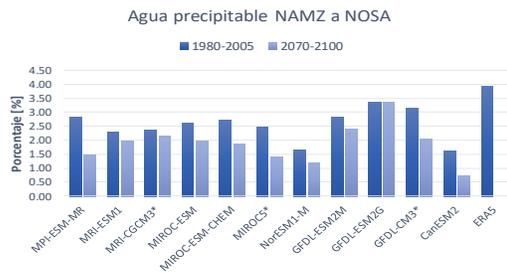
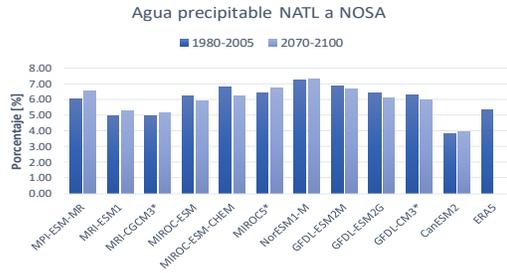
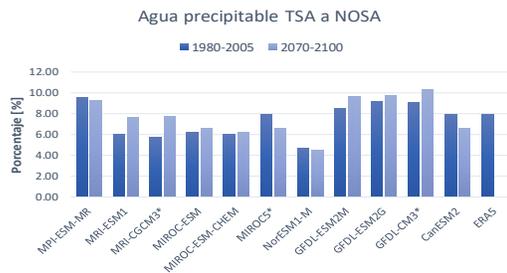
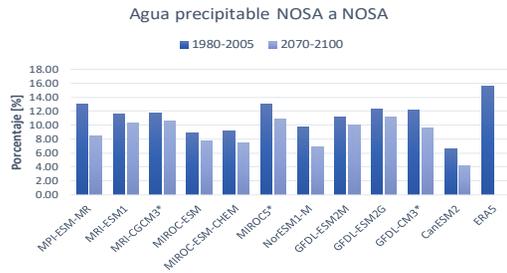
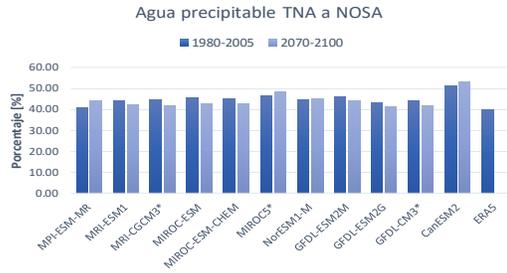


Figura 3.1. Diferencia de contribuciones climatológicas de agua precipitable desde las regiones con mayor importancia hacia NOSA para los periodos histórico (1980-2005) y futuro (2070-2100) para cada modelo CMIP5 considerado. Izquierda: Contribuciones climatológicas totales dadas en porcentaje (%) respecto al total de agua precipitable sobre NOSA durante el periodo correspondiente (Histórico: 1980-2005; Futuro: 2070-2100). Derecha: Ciclos anuales climatológicos de la diferencia del agua precipitable transportada (mm) hacia NOSA entre ambos periodos (Futuro– Histórico). El eje de las abscisas representa cada uno de los doce meses del año.

Como se ha discutido en los capítulos anteriores, TNA es la fuente de agua precipitable más importante hacia NOSA. Según los estimados para los modelos CMIP5, esta región contribuye con más del 40% de la humedad atmosférica en la región. Comparando los valores totales de contribución entre los periodos histórico y futuro, la mayoría de los estimados para los modelos sugieren una disminución de importancia de TNA como fuente de agua precipitable hacia NOSA para finales del siglo XXI. Específicamente, los modelos MRI-ESM1, MRI-CGCM3, MIROC-ESM, MIROC-ESM-CHEM, GFDL-ESM2M, GFDL-ESM2G y GFDL-CM3 proyectan este comportamiento (Figura 3.1). Por su parte, los ciclos anuales climatológicos de las diferencias entre los periodos futuro e histórico sugieren aumentos generalizados en el valor neto del transporte de agua precipitable desde TNA hacia NOSA, con incrementos de hasta 8 mm en la contribución de esta variable durante inicios (Enero a Abril) y finales (Diciembre) del año climatológico.

El reciclaje de agua precipitable es la segunda fuente de mayor contribución para NOSA. Los estimados para los 11 modelos CMIP5 sugieren disminuciones de importancia de esta variable como fuente de agua precipitable para finales de siglo. En cuanto a los ciclos anuales, se muestra que los estimados para los modelos proyectan tanto aumentos como disminuciones en las contribuciones del reciclaje de agua precipitable, resaltando que la mayoría de estos sugieren que el reciclaje neto sobre NOSA aumentará para finales del siglo XXI.

Por otro lado, se proyectan aumentos de agua precipitable transportada desde las otras dos regiones Atlánticas, de la siguiente manera: desde TSA, principalmente entre los meses de Abril y Noviembre y desde NATL, principalmente en la temporada MAM. Lo anterior se puede evidenciar tanto en los ciclos anuales de diferencias de transporte de agua precipitable desde estas regiones (Figura 3.1), como en los consensos de las proyecciones para finales del siglo XXI dados para los 11 modelos CMIP5 (Figura 3.17). Por su parte, desde NAMZ se proyectan disminuciones de agua precipitable transportada a NOSA durante la segunda mitad del año (JJA y SON).

En conclusión, los modelos CMIP5 considerados proyectan aumentos de agua precipitable transportada desde las fuentes oceánicas más importantes (TNA, TSA y NATL) y del reciclaje neto de la variable sobre NOSA para finales del siglo XXI, a pesar de que se proyectan disminuciones de su importancia en contribución.

- Transporte de precipitación hacia el norte de Suramérica

La Figura 3.2 muestra la contribución porcentual de precipitación desde cada una de las fuentes de mayor importancia hacia NOSA, tanto para el periodo histórico como para finales del siglo XXI. Esta figura deja en evidencia que el comportamiento a futuro del aporte de precipitación desde las fuentes más importantes hacia NOSA es mucho más incierto que en el caso del transporte de agua precipitable.

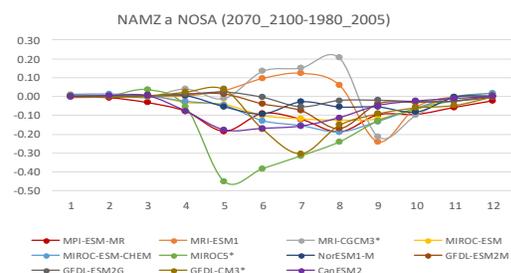
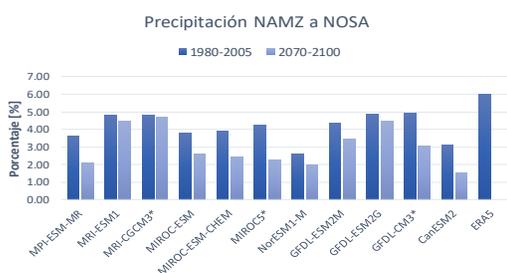
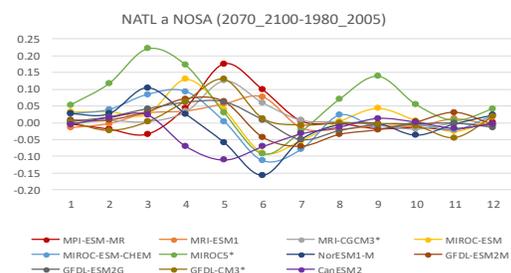
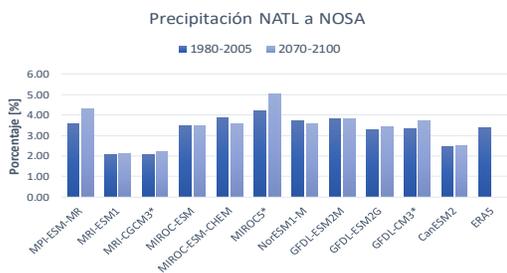
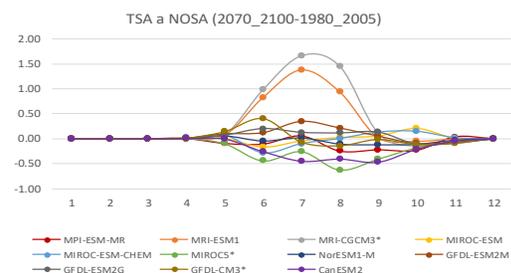
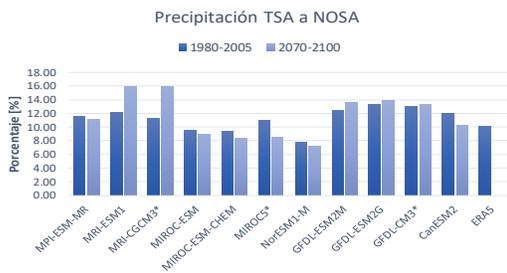
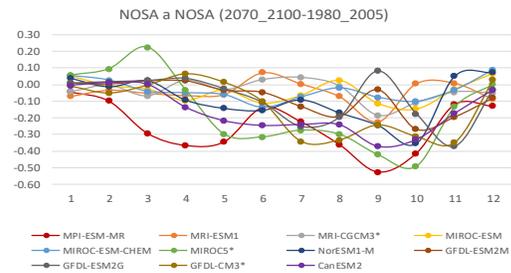
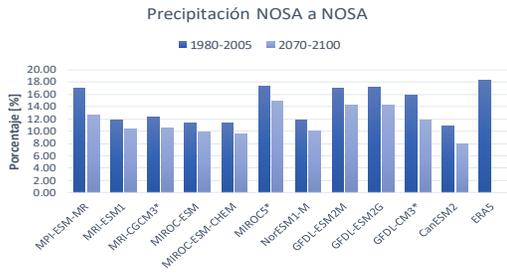
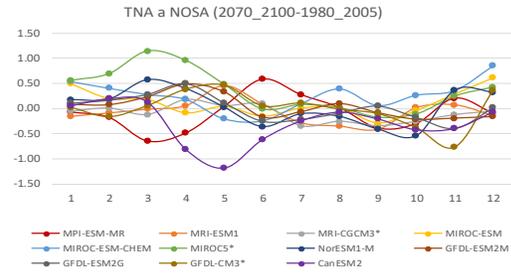
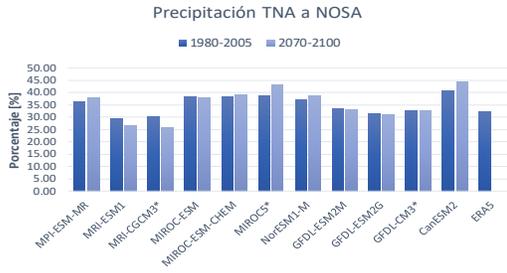


Figura 3.2. Diferencia de contribuciones climatológicas de precipitación desde las regiones con mayor importancia hacia NOSA para los periodos histórico (1980-2005) y futuro (2070-2100) para cada modelo CMIP5 considerado. Izquierda: Contribuciones climatológicas totales dadas en porcentaje (%) respecto al total de precipitación sobre NOSA durante el periodo correspondiente (Histórico: 1980-2005; Futuro: 2070-2100). Derecha: Ciclos anuales climatológicos de la diferencia de precipitación transportada (mm) hacia NOSA entre ambos periodos (Futuro– Histórico). El eje de las abscisas representa cada uno de los doce meses del año.

Las proyecciones de precipitación aportada desde la región oceánica TNA muestran desacuerdos marcados entre los modelos, ya que mientras algunos sugieren pequeños aumentos, otros sugieren disminuciones. Las temporadas en las que se presenta el mayor acuerdo entre ellos son MAM (aumentos) y SON (disminuciones). Por su parte, los porcentajes de importancia en la contribución de TNA a NOSA que proyectan los modelos para el futuro también presentan comportamientos diferenciados: mientras que seis de los modelos proyectan disminuciones de importancia respecto al periodo histórico, cinco sugieren aumentos de este porcentaje.

Las proyecciones para finales del siglo XXI de los estimados para los modelos CMIP5 sugieren disminuciones del reciclaje de precipitación sobre NOSA, con mayores cambios durante los meses de Agosto a Octubre. Es decir, que a pesar de que para el reciclaje de agua precipitable se proyectan aumentos sobre la región, la precipitación reciclada no tendrá ese comportamiento para finales de siglo.

El resto de las fuentes de importancia hacia NOSA muestran un panorama variante en cuanto al cambio de precipitación transportada para finales del siglo XXI. Se debe destacar que para el caso del transporte desde NAMZ hacia NOSA, se proyectan disminuciones del aporte de precipitación, además de una disminución de importancia respecto al periodo histórico, para todos los modelos CMIP5.

3.2.1.2. Proyecciones de transporte de humedad atmosférica hacia el norte del Amazonas para finales del siglo XXI

- Transporte de agua precipitable hacia el norte del Amazonas

Según los análisis presentados en el Capítulo II, las principales fuentes de agua precipitable hacia NAMZ son TNA, TSA, NAMZ (reciclaje), NORD y SAMZ. La Figura 3.3 presenta las contribuciones porcentuales totales de agua precipitable desde cada una de las fuentes más importantes hacia NAMZ, tanto para el periodo histórico como para las proyecciones a finales del siglo XXI, además, se muestran los ciclos anuales climatológicos de las diferencias entre proyecciones y simulaciones históricas (futuro-histórico) del transporte de agua precipitable hacia NAMZ.

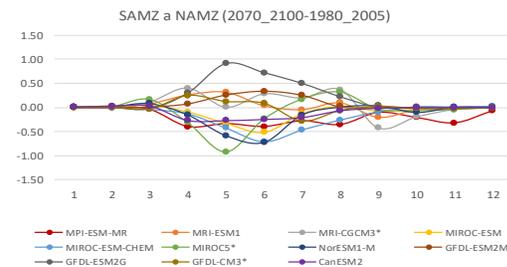
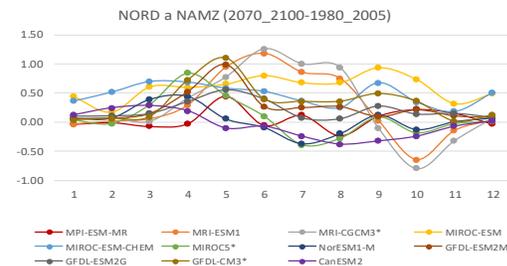
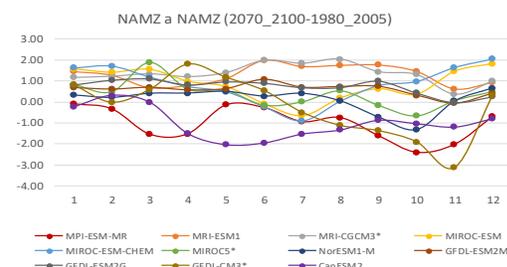
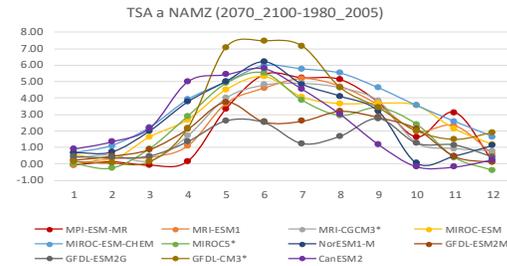
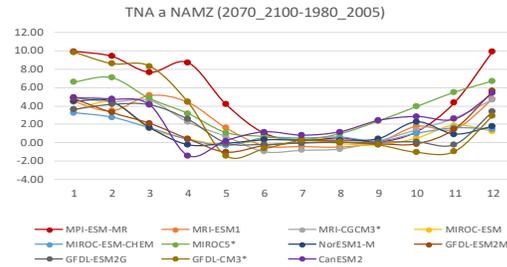
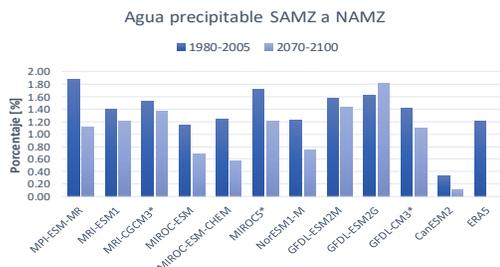
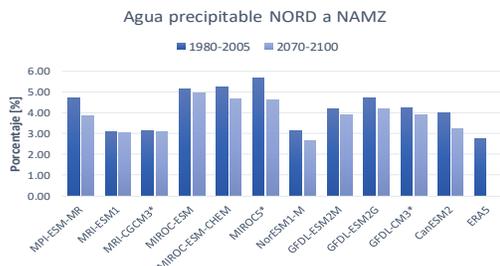
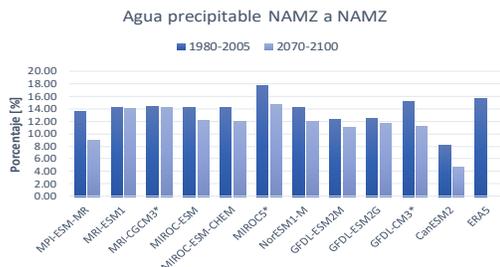
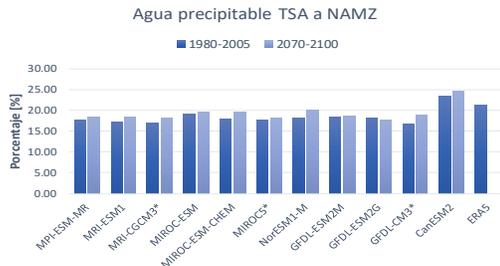
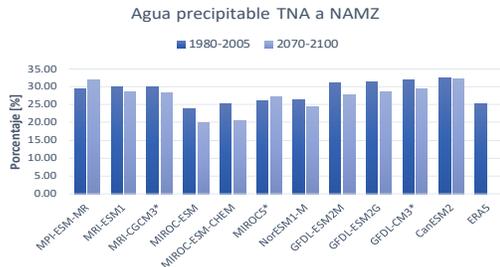


Figura 3.3. Diferencia de contribuciones climatológicas de agua precipitable desde las regiones con mayor importancia hacia NAMZ para los periodos histórico (1980-2005) y futuro (2070-2100) para cada modelo CMIP5 considerado. Izquierda: Contribuciones climatológicas totales dadas en porcentaje (%) respecto al total de agua precipitable sobre NAMZ durante el periodo correspondiente (Histórico: 1980-2005; Futuro: 2070-2100). Derecha: Ciclos anuales climatológicos de la diferencia del agua precipitable transportada (mm) hacia NAMZ entre ambos periodos (Futuro– Histórico). El eje de las abscisas representa cada uno de los doce meses del año.

En comparación con los valores totales de contribución de agua precipitable entre el periodo histórico y el futuro, los estimados para la mayoría de los modelos sugieren disminución desde TNA para finales del siglo XXI. Los ciclos anuales climatológicos de las diferencias entre los periodos futuro e histórico indican, sin embargo, aumentos en la magnitud del transporte de agua precipitable para finales de siglo. A partir de estos dos resultados se llega a la conclusión de que, a pesar de que los modelos sugieren mayores magnitudes de transporte de agua precipitable desde TNA hacia NAMZ, su importancia como fuente hacia la región disminuirá para finales del siglo XXI.

Para la segunda fuente más importante hacia NAMZ, se tiene un panorama diferente. Las proyecciones analizadas sugieren que la región TSA aumentará su importancia como fuente de agua precipitable hacia NAMZ (10 de los 11 modelos sugieren este aumento de importancia porcentual). Asimismo, las magnitudes de agua precipitable también sugieren aumentos para finales del siglo XXI, especialmente entre los meses de Mayo a Septiembre, según los estimados para la mayoría de los modelos CMIP5 evaluados.

Por su parte, se proyecta que el reciclaje de agua precipitable sobre NAMZ disminuirá su importancia de contribución total para finales del siglo XXI, según los estimados de los 11 modelos CMIP5 estudiados. A pesar de lo anterior, muchos de estos sugieren aumentos en la magnitud de la variable, para algunos de hasta 2 mm para finales de siglo. Desde las regiones NORD y SAMZ también se sugieren reducciones en el porcentaje de importancia como fuentes hacia NAMZ, a pesar de que en el caso de NORD, las proyecciones apuntan a incrementos en las magnitudes de transporte para la mayoría de los modelos.

- Transporte de precipitación hacia el norte del Amazonas

La Figura 3.4 muestra la contribución porcentual de precipitación desde cada una de las fuentes de importancia a NAMZ para el periodo histórico y para finales del siglo XXI, además de los ciclos anuales climatológicos de las diferencias entre proyecciones y simulaciones históricas (futuro-histórico) del transporte de precipitación hacia la región. Las diferencias de contribución total de precipitación desde TNA entre el periodo histórico y las proyecciones dejan en evidencia cómo para la mayoría de los modelos se proyectan disminuciones de importancia como fuente de precipitación para finales del siglo XXI (Figura 3.4). En los ciclos anuales climatológicos desde esta fuente de humedad se tienen, además, acuerdos de reducciones, principalmente durante la segunda mitad del año, siendo JJA y SON las temporadas en las cuales se tienen mayores consensos (Figura 3.18).

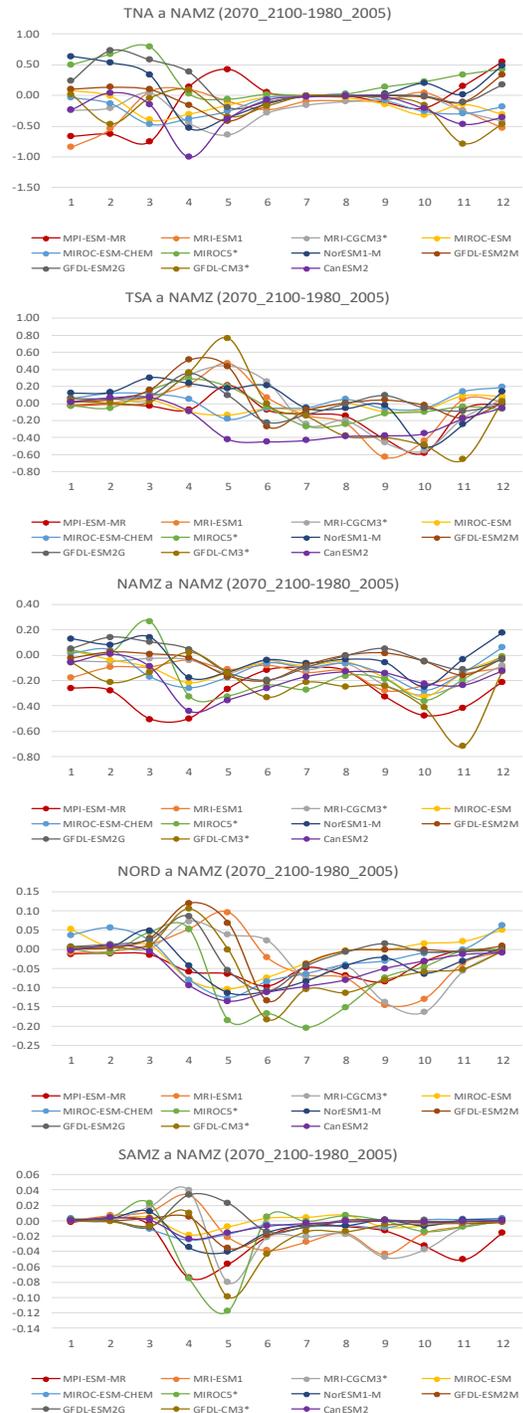
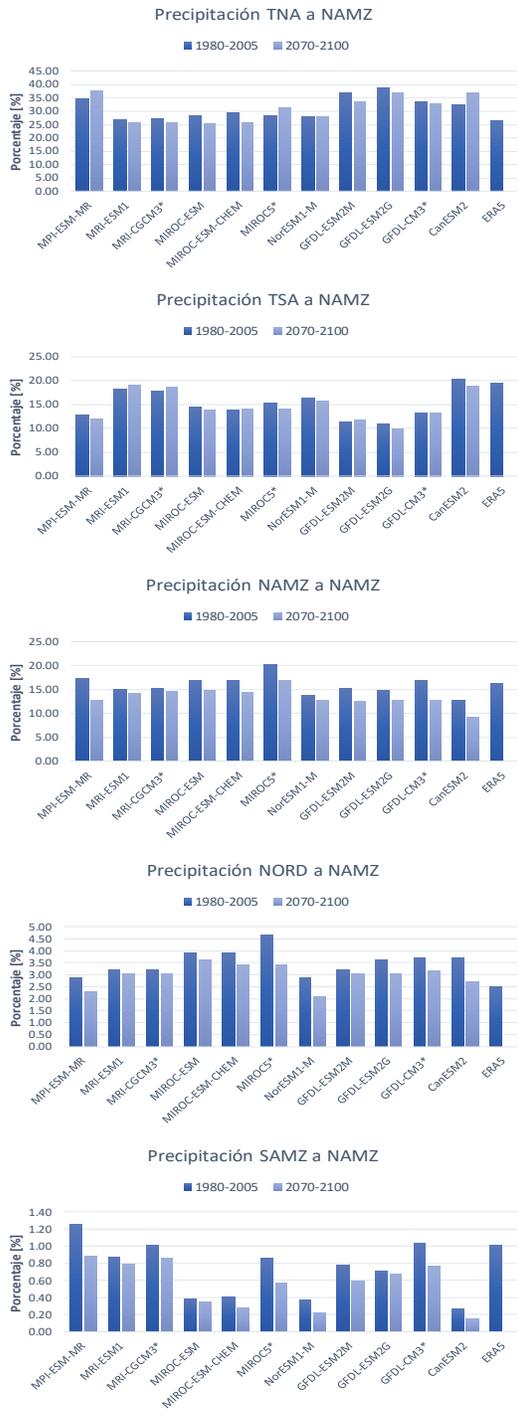


Figura 3.4. Diferencia de contribuciones climatológicas de precipitación desde las regiones con mayor importancia hacia NAMZ para los periodos histórico (1980-2005) y futuro (2070-2100) para cada modelo CMIP5 considerado. Izquierda: Contribuciones climatológicas totales dadas en porcentaje (%) respecto al total de precipitación sobre NAMZ durante el periodo correspondiente (Histórico: 1980-2005; Futuro: 2070-2100). Derecha: Ciclos anuales climatológicos de la diferencia de precipitación transportada (mm) hacia NAMZ entre ambos periodos (Futuro– Histórico). El eje de las abscisas representa cada uno de los doce meses del año.

Las proyecciones para finales del siglo XXI para la precipitación aportada desde la segunda fuente más importante hacia NAMZ, TSA, indican que se tendrán aumentos durante las primeras dos temporadas del año (DEF y MAM) y disminuciones para las dos últimas (JJA y SON). A pesar de este comportamiento, la magnitud de la diferencia varía de modelo a modelo. Por su parte, el cambio de importancia proyectado por los modelos (contribución total) de TSA hacia NAMZ no presenta un patrón claro: mientras que la mitad de los modelos sugiere que dicha importancia aumentará para finales del siglo XXI, la otra mitad sugiere disminuciones.

Por otro lado, las proyecciones del reciclaje de precipitación sobre NAMZ para finales del siglo XXI sugieren: (i) disminuciones en el porcentaje de contribución total, lo que da cuenta de que la importancia del reciclaje de NAMZ será menor para el futuro; y (ii) disminuciones en la magnitud de la variable según la mayoría de los modelos, pero con acuerdos mayores durante las tres últimas temporadas del año (MAM, JJA, SON). Dicha magnitud de cambio difiere entre modelos, siendo MPI-ESM-MR, MIROC5 y GFDL-CM3, los que proyectan las mayores diferencias respecto al periodo histórico.

Para las últimas dos fuentes de humedad importancia para NAMZ (NORD y SAMZ) se tiene un panorama similar, con proyecciones de disminución de su importancia para todos los modelos, además de reducciones en la magnitud de este transporte, principalmente a partir de la temporada MAM y hasta SON.

3.2.1.3. Proyecciones de transporte de humedad atmosférica hacia el sur del Amazonas para finales del siglo XXI

- Transporte de agua precipitable hacia el sur del Amazonas

Según el análisis presentado en el Capítulo II, las principales fuentes de humedad atmosférica hacia SAMZ son SAMZ (reciclaje de humedad como principal contribución), TSA, TNA, NAMZ y NORD. La Figura 3.5 muestra las diferencias de las contribuciones climatológicas de agua precipitable desde estas regiones hacia SAMZ para los periodos histórico (1980-2005) y futuro (2070-2100). Además, se presentan los ciclos anuales climatológicos de las diferencias entre proyecciones y simulaciones históricas (futuro-histórico) del transporte de agua precipitable hacia SAMZ.



Figura 3.5. Diferencia de contribuciones climatológicas de agua precipitable desde las regiones con mayor importancia hacia SAMZ para los periodos histórico (1980-2005) y futuro (2070-2100) para cada modelo CMIP5 considerado. Izquierda: Contribuciones climatológicas totales dadas en porcentaje (%) respecto al total de agua precipitable sobre SAMZ durante el periodo correspondiente (Histórico: 1980-2005; Futuro: 2070-2100). Derecha: Ciclos anuales climatológicos de la diferencia del agua precipitable transportada (mm) hacia SAMZ entre ambos periodos (Futuro– Histórico). El eje de las abscisas representa cada uno de los doce meses del año.

De la Figura 3.5 se puede observar que las proyecciones sugieren disminuciones en las contribuciones totales del reciclaje de agua precipitable sobre la región para finales del siglo XXI, lo cual significa que esta variable perderá importancia para el periodo 2070-2100. Lo anterior es un comportamiento que se repite para los estimados de todos los modelos CMIP5 aquí evaluados. Los ciclos anuales climatológicos de las diferencias entre los dos periodos considerados sugieren, en general, aumentos de agua precipitable reciclada durante la primera mitad del año, y disminuciones durante la segunda mitad. A pesar de que el comportamiento (estacionalidad) de los ciclos anuales de las diferencias poseen similitudes entre modelos, la magnitud de dicho cambio presenta marcadas discrepancias.

La segunda fuente humedad de mayor importancia para SAMZ es TSA. Las proyecciones de transporte de agua precipitable desde esta región oceánica sugieren aumentos en la contribución total hacia SAMZ, lo que significa que esta región Atlántica aumentará su importancia como fuente para finales de siglo. En cuanto al comportamiento de los ciclos anuales climatológicos de las diferencias entre los periodos futuro e histórico, se proyectan aumentos de transporte de agua precipitable durante todos los meses, pero con diferencias en la magnitud entre los estimados de los modelos, que van desde 0 hasta 5-6 mm, aproximadamente.

Para TNA, que es la tercera fuente de importancia de agua precipitable hacia SAMZ, se proyectan disminuciones en su contribución total para finales del siglo XXI, según la mayoría de modelos. Por su parte, los ciclos anuales climatológicos no muestran señales claras sobre aumento o disminución de la humedad transportada desde TNA a SAMZ, aunque se resalta que entre Junio y Septiembre, las magnitudes de estas diferencias son cercanas a cero, es decir, los estimados para los modelos proyectan que durante estos meses el cambio de transporte de agua precipitable será poco.

Para las últimas dos fuentes de humedad hacia SAMZ (NAMZ y NORD), se sugieren disminuciones en su importancia como fuentes para finales del siglo XXI. A pesar de esto, se proyectan, en general, aumentos de la magnitud de la variable desde NORD. La señal de cambio de la magnitud del transporte desde NAMZ hacia SAMZ no es tan clara en los ciclos anuales de los modelos CMIP5.

- Transporte de precipitación hacia el sur del Amazonas

La Figura 3.6 muestra la contribución porcentual de precipitación desde cada una de las fuentes de mayor importancia para SAMZ para el periodo histórico y para las proyecciones, además de los ciclos anuales climatológicos de las diferencias entre proyecciones y simulaciones históricas (futuro-histórico) de transporte de precipitación hacia la región. Las proyecciones para el reciclaje de precipitación sobre SAMZ muestran disminuciones en la contribución total, según todos los estimados de los modelos CMIP5 aquí evaluados. Además, se sugieren reducciones en la magnitud del reciclaje de precipitación sobre la región durante casi todo el año, para el periodo 2070-2100, siendo más evidente durante la temporada SON (Figura 3.6).

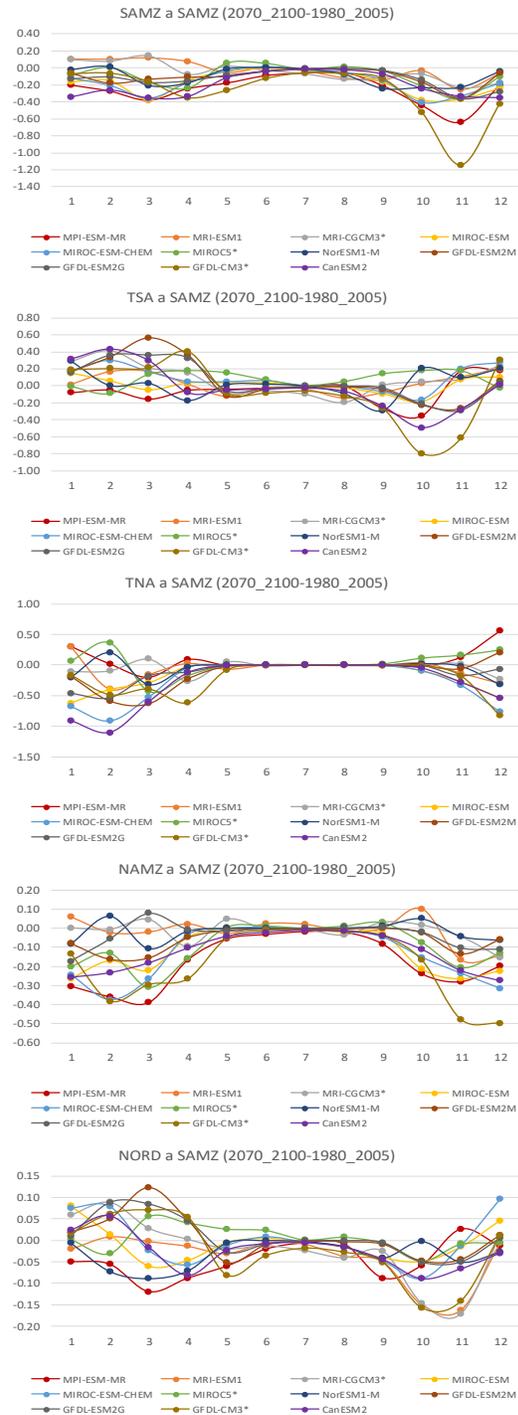
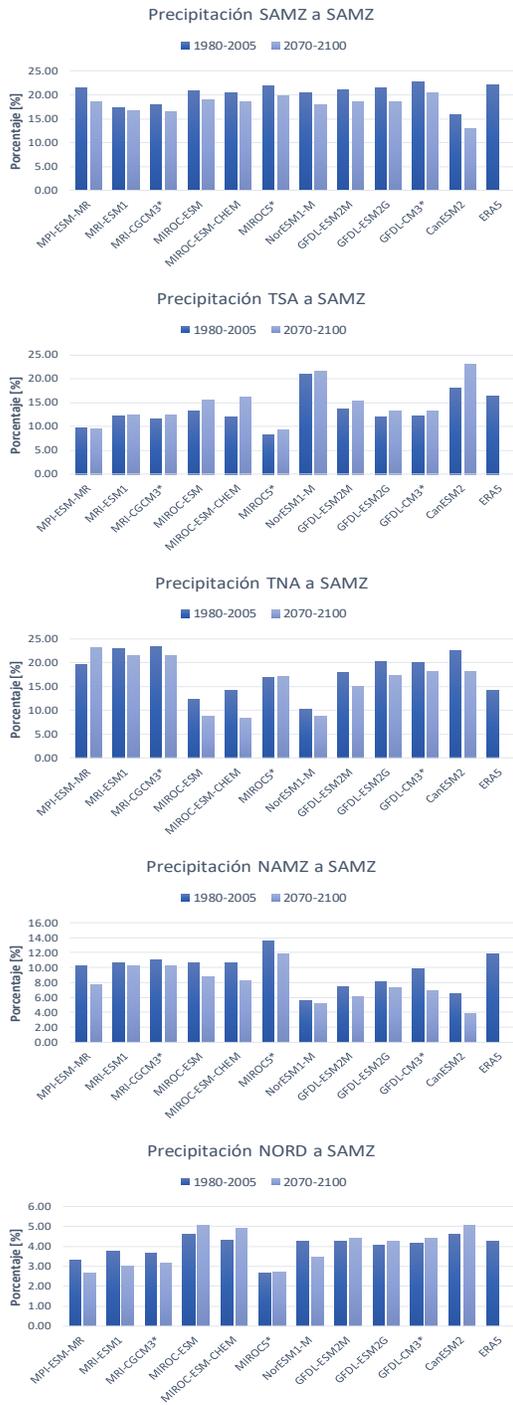


Figura 3.6. Diferencia de contribuciones climatológicas de precipitación desde las regiones con mayor importancia hacia SAMZ para los periodos histórico (1980-2005) y futuro (2070-2100) para cada modelo CMIP5 considerado. Izquierda: Contribuciones climatológicas totales dadas en porcentaje (%) respecto al total de precipitación sobre SAMZ durante el periodo correspondiente (Histórico: 1980-2005; Futuro: 2070-2100). Derecha: Ciclos anuales climatológicos de la diferencia de precipitación transportada (mm) hacia SAMZ entre ambos periodos (Futuro– Histórico). El eje de las abscisas representa cada uno de los doce meses del año.

Por su parte, para la fuente de precipitación TSA, se proyectan aumentos en su importancia total de contribución para finales de siglo (este cambio es proyectado por 10 de los 11 modelos). Las magnitudes de las diferencias de transporte de precipitación a lo largo del ciclo anual son variantes entre modelos, pero se proyectan aumentos durante la primera mitad del año climatológico y disminuciones durante la segunda mitad, aunque entre Mayo y Agosto estos valores se encuentran más cercanos a cero, indicando cambios de magnitud menores que durante el resto del año. Estas bajas magnitudes de cambio a futuro durante los meses de Mayo a Agosto (hasta Septiembre en algunos casos), también se pueden observar en los ciclos anuales de las diferencias de aporte de precipitación desde las otras cuatro fuentes de SAMZ.

Las proyecciones de transporte de precipitación desde TNA sugieren disminuciones en su importancia como fuente para SAMZ (para 9 de los 11 modelos CMIP5 se proyecta dicha señal de cambio). Además, los ciclos anuales climatológicos de las diferencias entre los periodos futuro e histórico proyectan reducciones en la magnitud de la variable, principalmente durante los últimos y primeros meses del año climatológico (Noviembre a Abril).

Finalmente, desde NAMZ se proyectan disminuciones generalizadas de la contribución total de precipitación hacia SAMZ, es decir, disminución de su importancia como fuente de precipitación para finales del siglo XXI. Además, según la mayoría de los ciclos anuales climatológicos de diferencias, se proyectan reducciones en la magnitud del transporte de precipitación desde NAMZ, principalmente entre los meses de Octubre y Abril.

3.2.2. Patrones espaciales de proyecciones de transporte de humedad atmosférica sobre la región de estudio para finales del siglo XXI

Esta sección analiza los patrones espaciales de los cambios proyectados para el transporte de humedad atmosférica entre el periodo futuro (2070-2100) y el periodo histórico (198-2005) según los modelos CMIP5 considerados, tanto para el transporte de agua precipitable como para el transporte de precipitación. Las fuentes de humedad analizadas corresponden a las de mayor relevancia durante el periodo histórico (TNA, TSA, NOSA, NAMZ y SAMZ) para cada una de las regiones continentales aquí estudiadas (NOSA, NAMZ y SAMZ). De igual manera que en el Capítulo II, se analizan los cambios proyectados por los modelos con la mejor y peor representación de P-E en las simulaciones históricas: MIROC5 y MRI-CGCM3, respectivamente (ver diagramas de Taylor - Figura 1.14).

3.2.2.1. Patrones espaciales de transporte de agua precipitable

A continuación, se analizan los cambios proyectados para el transporte de agua precipitable según los dos modelos seleccionados. Así, la Figura 3.7 muestra los cambios proyectados en transporte de agua precipitable desde el océano Atlántico Tropical Norte (TNA), la Figura 3.8 desde el océano Atlántico Tropical Sur (TSA), la Figura 3.9 desde el norte de Suramérica (NOSA), la Figura 3.10 desde el norte del Amazonas (NAMZ) y la Figura 3.11 desde el sur del Amazonas (SAMZ).

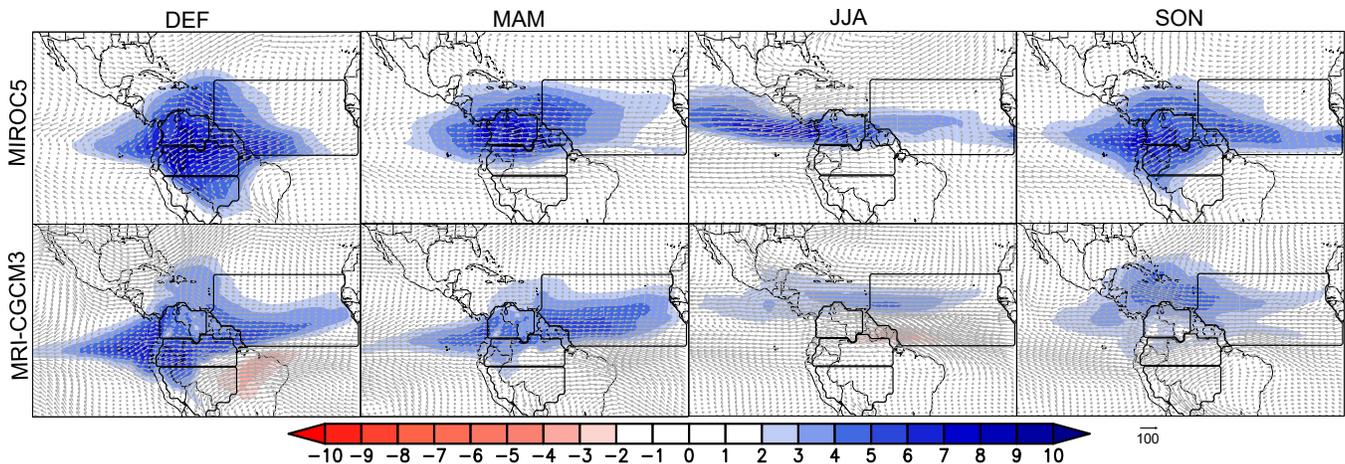


Figura 3.7. Cambios absolutos proyectados de agua precipitable transportada desde el océano Atlántico Tropical Norte (TNA) sobre el dominio de estudio para finales del siglo XXI. Los valores presentados corresponden las diferencias entre el periodo futuro (2070-2100) y el periodo histórico (1980-2005). Los colores azules indican aumentos de la variable. Los colores rojos indican disminuciones de la variable. Se resaltan cuatro regiones en el mapa: TNA (fuente de agua precipitable), NOSA, NAMZ y SAMZ (regiones de interés). Las columnas representan las temporadas del año: Diciembre-Enero-Febrero (DEF), Marzo-Abril-Mayo (MAM, Junio-Julio-Agosto (JJA) y Septiembre-October-Noviembre (SON). En las filas se encuentran los dos modelos con la mejor y peor representación de P-E en las simulaciones históricas (MIROC5 y MRI-CGCM3, respectivamente). Unidades dadas en mm. Los vectores representan la diferencia del flujo de humedad integrado en la vertical entre ambos periodos, en $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$.

Las diferencias del transporte de agua precipitable desde la región oceánica TNA entre los periodos futuro e histórico se pueden observar en la Figura 3.7. Se debe recordar que, según los análisis realizados para el periodo histórico, TNA es la principal fuente de humedad para dos de las regiones de interés: NOSA y NAMZ. Estos mapas muestran aumentos generalizados de transporte de agua precipitable desde esta región para finales del siglo XXI, pero con mayores cambios proyectados para el modelo MIROC5. Además, como lo indican los ciclos anuales de la diferencia del transporte de agua precipitable entre ambos periodos (Figura 3.1 para NOSA, Figura 3.3 para NAMZ y Figura 3.5 para SAMZ), se sugieren, en general, aumentos en la magnitud del transporte de agua precipitable desde esta fuente oceánica para finales de siglo. Para el caso de NOSA, se sugieren incrementos de transporte desde TNA durante todas las temporadas del año (ver Figura 3.1). Por su parte, el transporte de agua precipitable desde TNA hacia NAMZ también aumentará su magnitud para finales del siglo XXI, principalmente durante las dos primeras temporadas del año (DEF y MAM) (ver Figura 3.3). Finalmente, los estimados para los modelos sugieren que el transporte de agua precipitable desde TNA hacia SAMZ será mayor para finales de siglo, especialmente durante DEF (ver Figura 3.5).

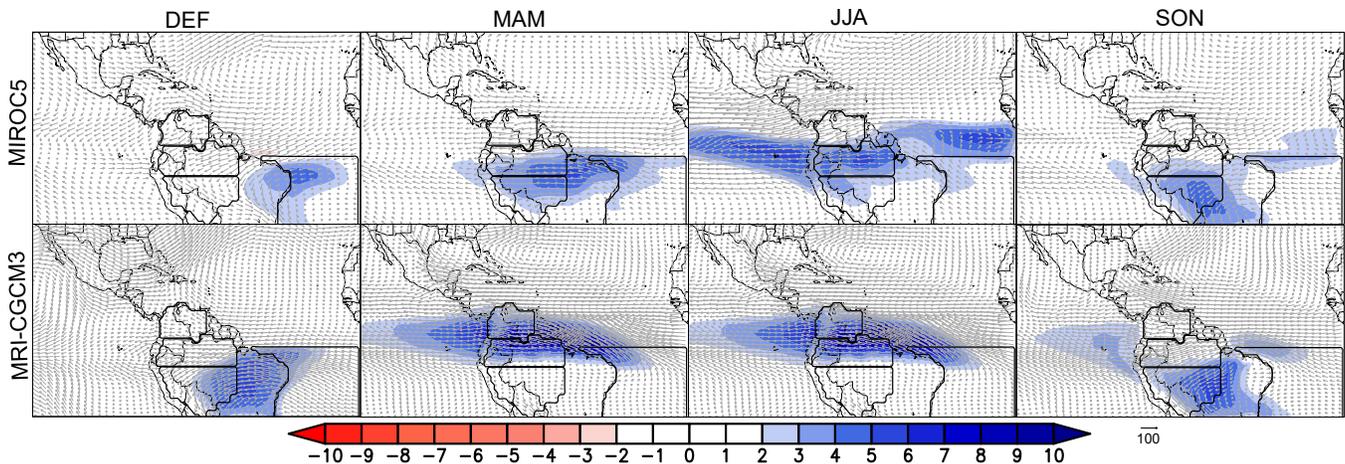


Figura 3.8. Cambios absolutos proyectados de agua precipitable transportada desde el océano Atlántico Tropical Sur (TSA) sobre el dominio de estudio para finales del siglo XXI. Los valores presentados corresponden las diferencias entre el periodo futuro (2070-2100) y el periodo histórico (1980-2005). Los colores azules indican aumentos de la variable. Los colores rojos indican disminuciones de la variable. Se resaltan cuatro regiones en el mapa: TSA (fuente de agua precipitable), NOSA, NAMZ y SAMZ (regiones de interés). Las columnas representan las temporadas del año: Diciembre-Enero-Febrero (DEF), Marzo-Abril-Mayo (MAM, Junio-Julio-Agosto (JJA) y Septiembre-Octubre-Noviembre (SON). En las filas se encuentran los dos modelos con la mejor y peor representación de P-E en las simulaciones históricas (MIROC5 y MRI-CGCM3, respectivamente). Unidades dadas en mm. Los vectores representan la diferencia del flujo de humedad integrado en la vertical entre ambos periodos, en $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$.

Las diferencias del transporte de agua precipitable desde la región oceánica TSA entre los periodos futuro e histórico se pueden observar en la Figura 3.8. Según los análisis presentados en el Capítulo II, TSA es la tercera fuente de mayor contribución hacia NOSA y la segunda hacia NAMZ. Los estimados para los modelos sugieren que el transporte de la variable desde TSA y hacia estas dos regiones aumentará para finales del siglo XXI. Para el caso de NOSA, se proyectan incrementos de transporte desde TSA durante la temporada JJA, aunque los resultados entre modelos difieren en su magnitud, ya que MRI-CGCM3 proyecta mayores cambios que MIROC5. Los aumentos sugeridos de transporte desde esta masa oceánica hacia NOSA durante la temporada JJA también se pueden detallar en la Figura 3.1. Para el caso de NAMZ, los resultados son más contundentes, ya que para ambos modelos se proyectan aumentos de agua precipitable transportada desde TSA, con valores más altos en las temporadas MAM y JJA, lo cual también se puede observar en los ciclos anuales de las diferencias proyectadas en transporte de agua precipitable hacia la región (Figura 3.3).

El cambio proyectado en el transporte de agua precipitable desde NOSA se observa en la Figura 3.9. Estas proyecciones sugieren que el reciclaje de agua precipitable aumentará sobre algunas zonas del norte de Suramérica durante el periodo 2070-2100. Dichos cambios son más evidentes sobre el oeste y sur de NOSA, durante todas las temporadas del año.

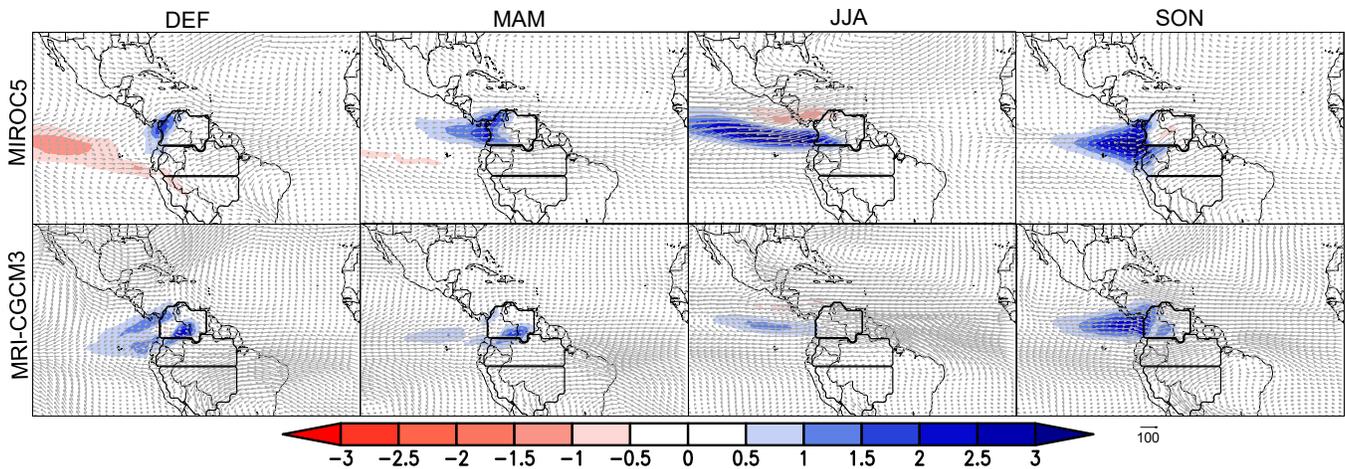


Figura 3.9. Cambios absolutos proyectados de agua precipitable transportada desde el norte de Suramérica (NOSA) sobre el dominio de estudio para finales del siglo XXI. Los valores presentados corresponden las diferencias entre el periodo futuro (2070-2100) y el periodo histórico (1980-2005). Los colores azules indican aumentos de la variable. Los colores rojos indican disminuciones de la variable. Se resaltan cuatro regiones en el mapa: NOSA (fuente de agua precipitable y región de interés), NAMZ y SAMZ (regiones de interés). Las columnas representan las temporadas del año: Diciembre-Enero-Febrero (DEF), Marzo-Abril-Mayo (MAM), Junio-Julio-Agosto (JJA) y Septiembre-Octubre-Noviembre (SON). En las filas se encuentran los dos modelos con la mejor y peor representación de P-E en las simulaciones históricas (MIROC5 y MRI-CGCM3, respectivamente). Unidades dadas en mm. Los vectores representan la diferencia del flujo de humedad integrado en la vertical entre ambos periodos, en $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$.

Las proyecciones para finales de siglo XXI sobre el cambio de transporte de agua precipitable desde NAMZ y hacia todo el dominio de estudio se pueden observar en la Figura 3.10. En estos mapas se evidencia, principalmente, el cambio proyectado en el reciclaje de agua precipitable sobre NAMZ. Para ambos modelos se sugieren aumentos en la magnitud del reciclaje de agua precipitable para finales del siglo XXI, aunque con mayores cambios para MRI-CGCM3. Las temporadas en las que se proyectan mayores cambios en los valores de reciclaje de agua precipitable sobre NAMZ son DEF y MAM (ver Figura 3.3 – NAMZ a NAMZ).

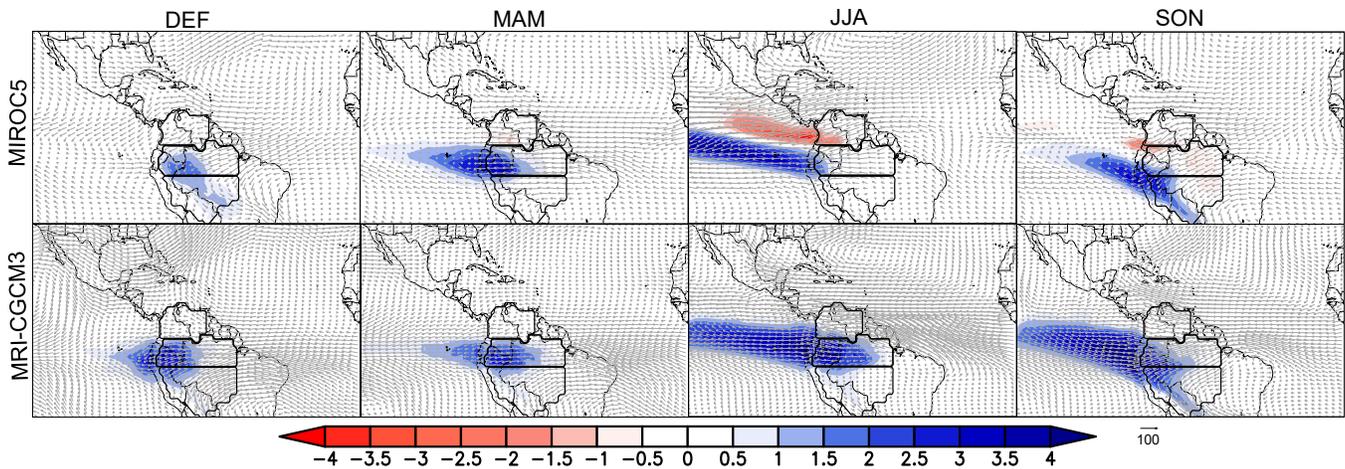


Figura 3.10. Cambios absolutos proyectados de agua precipitable transportada desde el norte del Amazonas (NAMZ) sobre el dominio de estudio para finales del siglo XXI. Los valores presentados corresponden las diferencias entre el periodo futuro (2070-2100) y el periodo histórico (1980-2005). Los colores azules indican aumentos de la variable. Los colores rojos indican disminuciones de la variable. Se resaltan cuatro regiones en el mapa: NAMZ (fuente de agua precipitable y región de interés), NOSA y SAMZ (regiones de interés). Las columnas representan las temporadas del año: Diciembre-Enero-Febrero (DEF), Marzo-Abril-Mayo (MAM), Junio-Julio-Agosto (JJA) y Septiembre-Octubre-Noviembre (SON). En las filas se encuentran los dos modelos con la mejor y peor representación de P-E en las simulaciones históricas (MIROC5 y MRI-CGCM3, respectivamente). Unidades dadas en mm. Los vectores representan la diferencia del flujo de humedad integrado en la vertical entre ambos periodos, en $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$.

Finalmente, en la Figura 3.11 se presentan los cambios absolutos proyectados para finales del siglo XXI del agua precipitable transportada desde SAMZ sobre el dominio de estudio. Se proyectan aumentos del reciclaje de agua precipitable sobre la región, con valores más altos durante las dos primeras temporadas del año (DEF y MAM). Para JJA y SON también se sugieren aumentos de la magnitud de este reciclaje, pero más bajos que para el resto del año. Además, durante estas dos últimas temporadas el modelo MIROC5 sugiere menores cambios para finales de siglo que MRI-CGCM3.

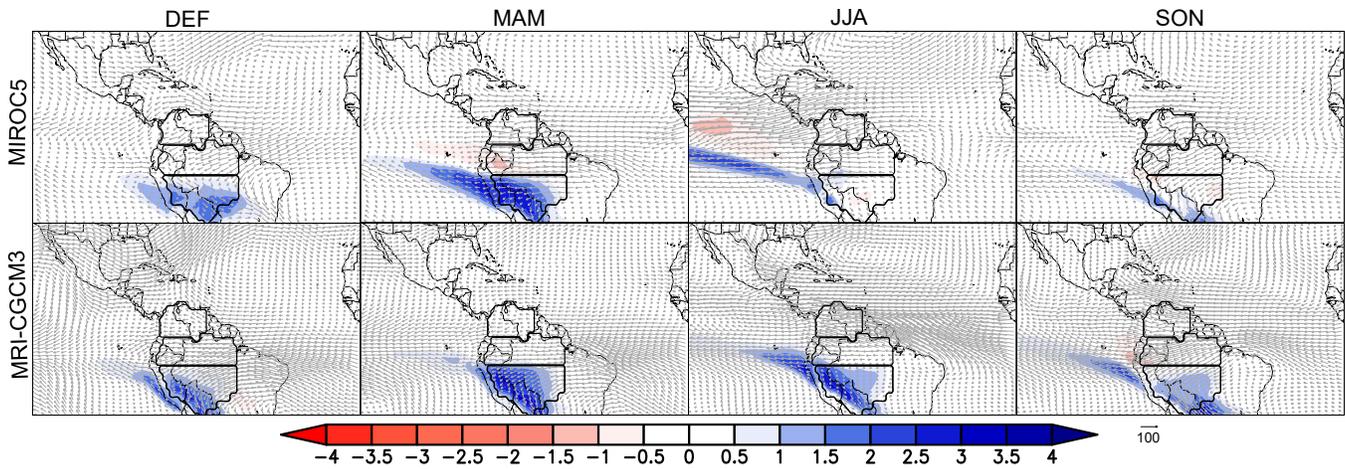


Figura 3.11. Cambios absolutos proyectados de agua precipitable transportada desde el sur del Amazonas (SAMZ) sobre el dominio de estudio para finales del siglo XXI. Los valores presentados corresponden las diferencias entre el periodo futuro (2070-2100) y el periodo histórico (1980-2005). Los colores azules indican aumentos de la variable. Los colores rojos indican disminuciones de la variable. Se resaltan cuatro regiones en el mapa: SAMZ (fuente de agua precipitable y región de interés), NOSA y NAMZ (regiones de interés). Las columnas representan las temporadas del año: Diciembre-Enero-Febrero (DEF), Marzo-Abril-Mayo (MAM, Junio-Julio-Agosto (JJA) y Septiembre-Octubre-Noviembre (SON). En las filas se encuentran los dos modelos con la mejor y peor representación de P-E en las simulaciones históricas (MIROC5 y MRI-CGCM3, respectivamente). Unidades dadas en mm. Los vectores representan la diferencia del flujo de humedad integrado en la vertical entre ambos periodos, en $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$.

3.2.2.2. Patrones espaciales de transporte de precipitación

A continuación, se analizan los cambios proyectados para finales del siglo XXI del transporte de precipitación, según los dos modelos escogidos (MIROC5 y MRI-CGCM3), desde las regiones oceánicas y continentales de interés. Así, la Figura 3.12 representa el cambio proyectado de transporte de precipitación desde el océano Atlántico Tropical Norte (TNA), la Figura 3.13 desde el océano Atlántico Tropical Sur (TSA), la Figura 3.14 desde el norte de Suramérica (NOSA), la Figura 3.15 desde el norte del Amazonas (NAMZ) y la Figura 3.16 desde el sur del Amazonas (SAMZ).

De la Figura 3.12 se puede observar que el modelo MIROC5 sugiere un aumento de transporte de precipitación desde TNA hacia NOSA durante las dos primeras temporadas del año (DEF y MAM), y una disminución durante las dos últimas temporadas (JJA y SON). Para el modelo MRI-CGCM3, estos cambios no son tan notables. Por su parte, para el cambio de la contribución de precipitación desde TNA hacia NAMZ, se notan discrepancias entre lo que proyectado por ambos modelos: mientras que para MIROC5 se proyectan aumentos en DEF y MAM, para MRI-CGCM3 se sugieren disminuciones. De otro lado, el modelo MIROC5 proyecta incrementos del transporte desde TNA hacia SAMZ durante DEF, pero MRI-CGCM3 proyecta reducciones.

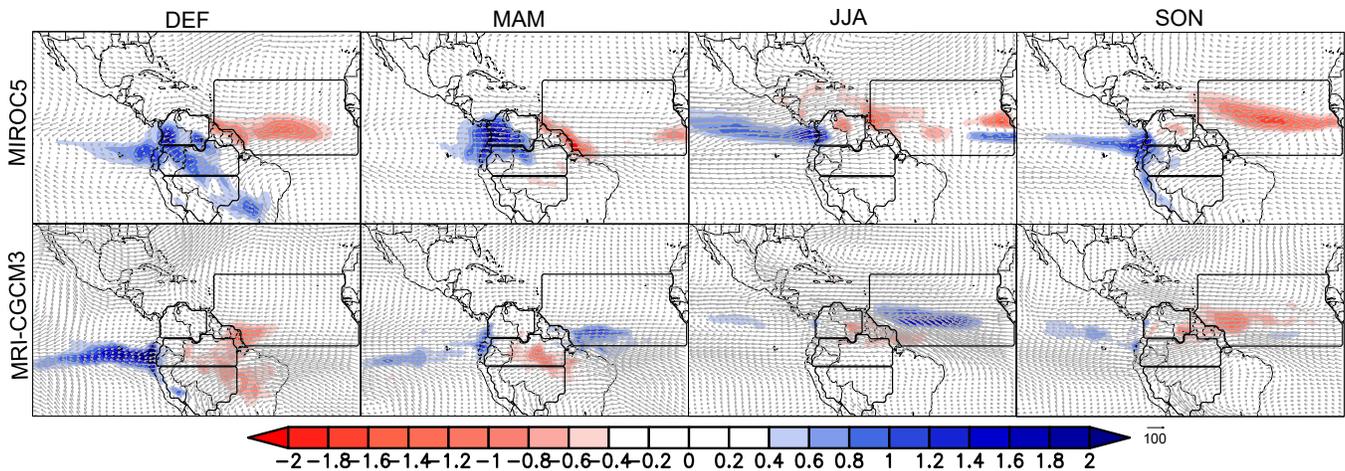


Figura 3.12. Cambios absolutos proyectados de precipitación transportada desde el océano Atlántico Tropical Norte (TNA) sobre el dominio de estudio para finales del siglo XXI. Los valores presentados corresponden las diferencias entre el periodo futuro (2070-2100) y el periodo histórico (1980-2005). Los colores azules indican aumentos de la variable. Los colores rojos indican disminuciones de la variable. Se resaltan cuatro regiones en el mapa: TNA (fuente de precipitación), NOSA, NAMZ y SAMZ (regiones de interés). Las columnas representan las temporadas del año: Diciembre-Enero-Febrero (DEF), Marzo-Abril-Mayo (MAM, Junio-Julio-Agosto (JJA) y Septiembre-Octubre-Noviembre (SON). En las filas se encuentran los dos modelos con la mejor y peor representación de P-E en las simulaciones históricas (MIROC5 y MRI-CGCM3, respectivamente). Unidades dadas en mm/d. Los vectores representan la diferencia del flujo de humedad integrado en la vertical entre ambos periodos, en $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$.

Los cambios proyectados para finales del siglo XXI para el transporte de precipitación desde TSA hacia todo el dominio de estudio se pueden observar en la Figura 3.13. De estos mapas se notan diferencias de transporte hacia NOSA para finales del siglo XXI, principalmente en JJA, aunque los dos modelos considerados presentan discrepancias en sus proyecciones, ya que mientras para MIROC5 se sugieren disminuciones, para MRI-CGCM3 se sugieren aumentos de transporte de precipitación hacia la región. Para el caso del aporte de precipitación hacia NAMZ, se sugieren aumentos durante DEF y MAM, pero disminuciones durante JJA y SON, con mayores magnitudes de cambio para el modelo MRI-CGCM3.

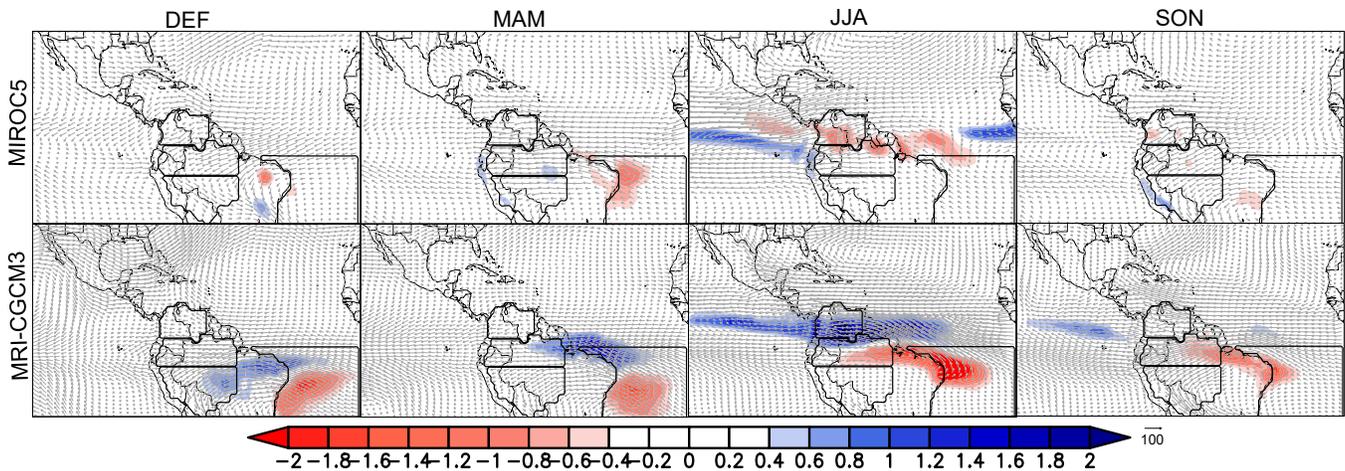


Figura 3.13. Cambios absolutos proyectados de precipitación transportada desde el océano Atlántico Tropical Sur (TSA) sobre el dominio de estudio para finales del siglo XXI. Los valores presentados corresponden las diferencias entre el periodo futuro (2070-2100) y el periodo histórico (1980-2005). Los colores azules indican aumentos de la variable. Los colores rojos indican disminuciones de la variable. Se resaltan cuatro regiones en el mapa: TSA (fuente de precipitación), NOSA, NAMZ y SAMZ (regiones de interés). Las columnas representan las temporadas del año: Diciembre-Enero-Febrero (DEF), Marzo-Abril-Mayo (MAM), Junio-Julio-Agosto (JJA) y Septiembre-October-Noviembre (SON). En las filas se encuentran los dos modelos con la mejor y peor representación de P-E en las simulaciones históricas (MIROC5 y MRI-CGCM3, respectivamente). Unidades dadas en mm/d. Los vectores representan la diferencia del flujo de humedad integrado en la vertical entre ambos periodos, en $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$.

En la Figura 3.14 se muestran los cambios proyectados para finales del siglo XXI para el transporte de precipitación desde NOSA hacia todo el dominio de estudio. En todos los mapas, tanto para el modelo MIROC5 como para el modelo MRI-CGCM3, se puede evidenciar que los cambios proyectados de esta variable no poseen magnitudes tan altas como en el caso de las dos fuentes oceánicas anteriores (nótese que la escala se encuentra entre -1 y 1); sin embargo, se destaca que para ambos modelos se proyectan disminuciones del reciclaje de precipitación sobre NOSA para la mayoría de temporadas, con mayores cambios para MIROC5 en JJA y SON. Lo anterior también se puede ver claramente en los ciclos anuales de las diferencias del transporte de precipitación hacia NOSA entre los periodos futuro e histórico (Figura 3.2 – NOSA a NOSA), para las que las disminuciones de reciclaje de precipitación son más evidentes durante la temporada SON para la mayoría de los modelos.

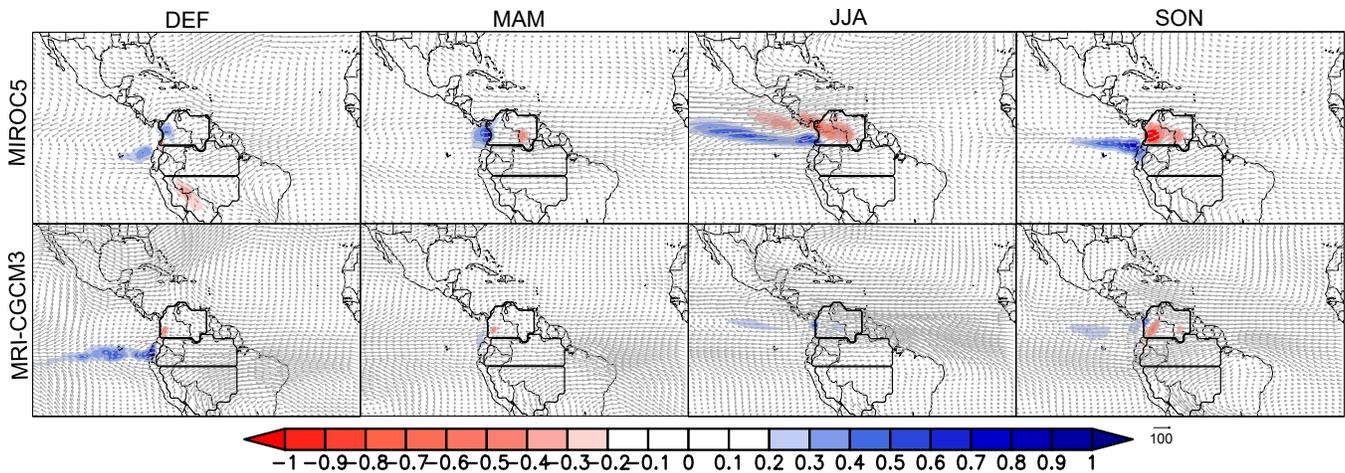


Figura 3.14. Cambios absolutos proyectados de precipitación transportada desde el norte de Suramérica (NOSA) sobre el dominio de estudio para finales del siglo XXI. Los valores presentados corresponden las diferencias entre el periodo futuro (2070-2100) y el periodo histórico (1980-2005). Los colores azules indican aumentos de la variable. Los colores rojos indican disminuciones de la variable. Se resaltan cuatro regiones en el mapa: NOSA (fuente de precipitación y región de interés), NAMZ y SAMZ (regiones de interés). Las columnas representan las temporadas del año: Diciembre-Enero-Febrero (DEF), Marzo-Abril-Mayo (MAM, Junio-Julio-Agosto (JJA) y Septiembre-October-Noviembre (SON). En las filas se encuentran los dos modelos con la mejor y peor representación de P-E en las simulaciones históricas (MIROC5 y MRI-CGCM3, respectivamente). Unidades dadas en mm/d. Los vectores representan la diferencia del flujo de humedad integrado en la vertical entre ambos periodos, en $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$.

La Figura 3.15 muestra los cambios proyectados para finales del siglo XXI del transporte de precipitación desde NAMZ hacia todo el dominio de estudio. Al igual que en la Figura 3.14, los cambios proyectados de transporte de precipitación poseen valores más bajos que en el caso de las fuentes oceánicas. Se proyectan disminuciones del reciclaje de precipitación sobre NAMZ según ambos modelos, especialmente durante JJA y SON, con mayores cambios para MIROC5. Según MIROC5, el transporte de precipitación desde NAMZ hacia SAMZ también presentará algunas reducciones a futuro durante las temporadas DEF, MAM y SON, lo cual concuerda con los ciclos anuales de las diferencias analizados en la sección anterior (ver Figura 3.6 - NAMZ a SAMZ).

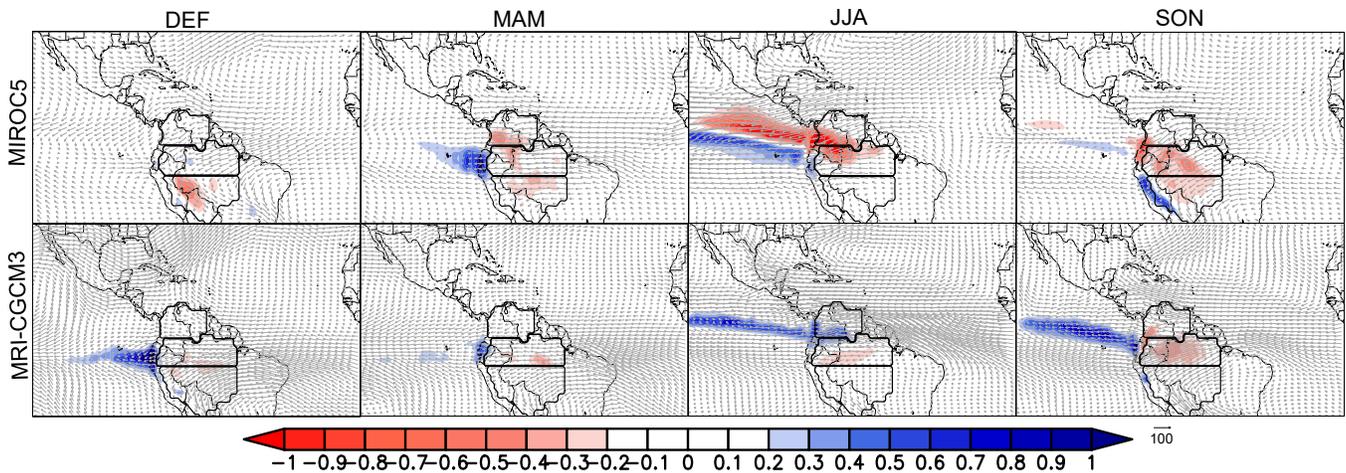


Figura 3.15. Cambios absolutos proyectados de precipitación transportada desde el norte del Amazonas (NAMZ) sobre el dominio de estudio para finales del siglo XXI. Los valores presentados corresponden las diferencias entre el periodo futuro (2070-2100) y el periodo histórico (1980-2005). Los colores azules indican aumentos de la variable. Los colores rojos indican disminuciones de la variable. Se resaltan cuatro regiones en el mapa: NAMZ (fuente de precipitación y región de interés), NOSA y SAMZ (regiones de interés). Las columnas representan las temporadas del año: Diciembre-Enero-Febrero (DEF), Marzo-Abril-Mayo (MAM, Junio-Julio-Agosto (JJA) y Septiembre-Octubre-Noviembre (SON). En las filas se encuentran los dos modelos con la mejor y peor representación de P-E en las simulaciones históricas (MIROC5 y MRI-CGCM3, respectivamente). Unidades dadas en mm/d. Los vectores representan la diferencia del flujo de humedad integrado en la vertical entre ambos periodos, en $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$.

Finalmente, la Figura 3.16 muestra los cambios proyectados para finales del siglo XXI del transporte de precipitación desde SAMZ hacia todo el dominio de estudio. Lo más evidente en estos mapas son las proyecciones de disminución del reciclaje de precipitación sobre el sur del Amazonas para varias de las temporadas del año (DEF y MAM para MIROC5, y SON para ambos modelos). Se resalta que estas proyecciones de reducción del reciclaje de precipitación sobre SAMZ son más fuertes para MIROC5 que para MRI-CGCM3.

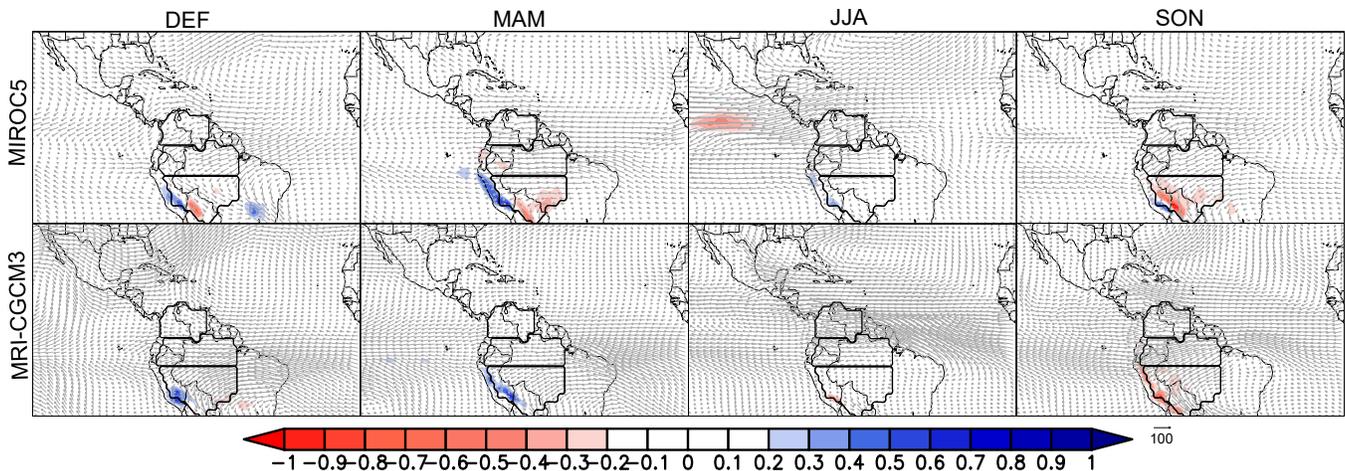


Figura 3.16. Cambios absolutos proyectados de precipitación transportada desde el sur del Amazonas (SAMZ) sobre el dominio de estudio para finales del siglo XXI. Los valores presentados corresponden las diferencias entre el periodo futuro (2070-2100) y el periodo histórico (1980-2005). Los colores azules indican aumentos de la variable. Los colores rojos indican disminuciones de la variable. Se resaltan cuatro regiones en el mapa: SAMZ (fuente de precipitación y región de interés), NOSA y NAMZ (regiones de interés). Las columnas representan las temporadas del año: Diciembre-Enero-Febrero (DEF), Marzo-Abril-Mayo (MAM, Junio-Julio-Agosto (JJA) y Septiembre-Octubre-Noviembre (SON). En las filas se encuentran los dos modelos con la mejor y peor representación de P-E en las simulaciones históricas (MIROC5 y MRI-CGCM3, respectivamente). Unidades dadas en mm/d. Los vectores representan la diferencia del flujo de humedad integrado en la vertical entre ambos periodos, en $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$.

3.2.3. Consenso de cambio entre modelos para finales del siglo XXI

En esta sección se analizan los consensos entre modelos sobre los cambios proyectados del transporte de agua precipitable y del transporte de precipitación para finales del siglo XXI. Las siguientes gráficas de barras presentan los porcentajes de consenso en cuanto al cambio de las dos variables estudiadas para finales del siglo XXI y para las tres regiones continentales de interés (NOSA, NAMZ y SAMZ). Dichos porcentajes consideran los 11 modelos CMIP5 analizados. Así, mayores valores sugieren que la mayoría de los 11 modelos proyectan la señal de cambio respectiva.

3.2.3.1. Consenso de cambio para el norte de Suramérica

La Figura 3.17 presenta de manera resumida el consenso entre modelos respecto al cambio proyectado de transporte de agua precipitable y de transporte de precipitación hacia NOSA para finales del siglo XXI, desde cada una de las fuentes de humedad de mayor importancia para la región: TNA, NOSA (reciclaje), TSA, NATL y NAMZ. El consenso de cambio se estima considerando una población de 11 modelos CMIP5. Así por ejemplo, en Figura 3.17a se observa un 90.9% de consenso entre modelos (10 de 11 modelos) en cuanto a un aumento de transporte de agua precipitable para finales de siglo desde TSA hacia NOSA durante MAM, con un incremento porcentual proyectado de 55% con respecto al promedio del periodo histórico para los 10 modelos que presentan acuerdo en el signo de cambio.

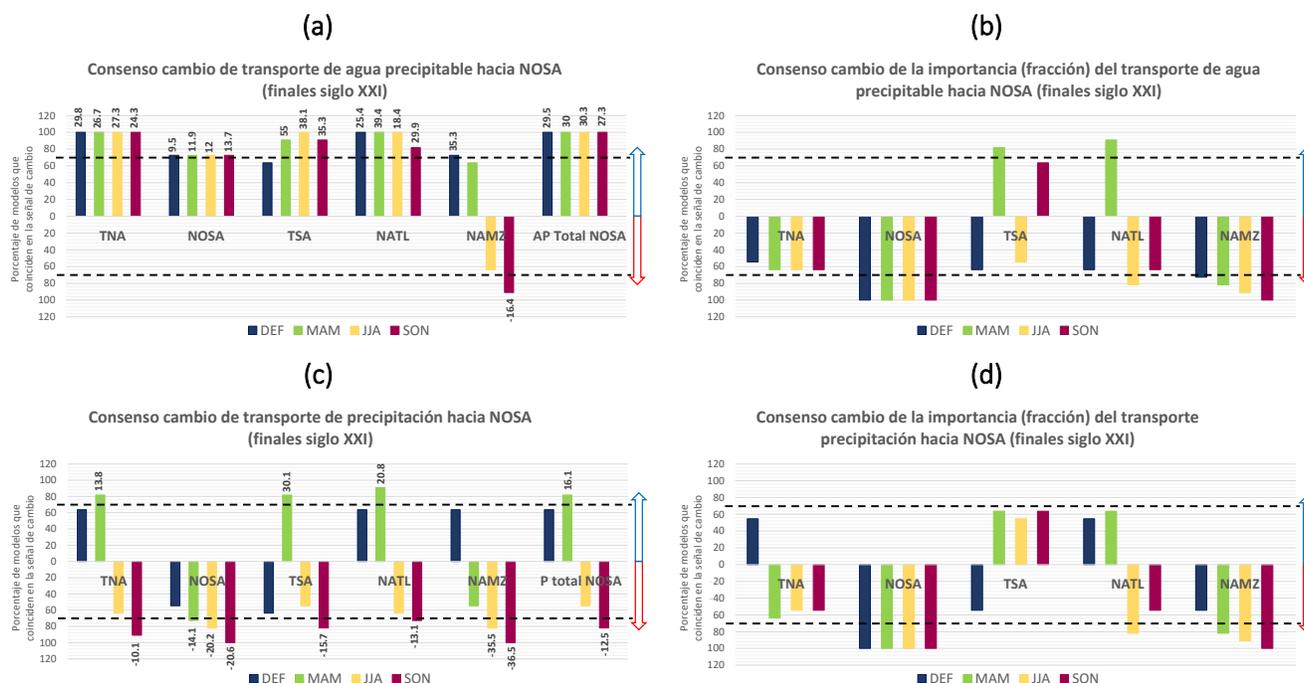


Figura 3.17. Consenso entre los 11 modelos CMIP5 considerados sobre el cambio proyectado para transporte de humedad hacia NOSA para finales del siglo XXI (%). **(a)** Porcentajes de consenso sobre el cambio proyectado en la magnitud del transporte de agua precipitable. **(b)** Porcentajes de consenso sobre el cambio proyectado de la importancia de cada región como fuente de agua precipitable. **(c)** Igual que (a) pero para el transporte de precipitación. **(d)** Igual que (b) pero para el transporte de precipitación. Cada uno de los grupos de barras corresponde a una fuente de humedad hacia NOSA, y se presentan en orden decreciente de importancia en la contribución de humedad hacia NOSA durante el periodo histórico (Capítulo II). Los colores de las barras representan cada una de las temporadas del año. Las líneas punteadas indican un porcentaje de 70% de acuerdo entre modelos (porcentaje a partir del cual se considera un consenso importante entre modelos). Los valores sobre las barras de los paneles (a) y (c) representan el cambio porcentual promedio de la magnitud del transporte respecto al periodo histórico para los modelos que presentan consenso en el signo de cambio (%). Las barras que no muestran este valor en la parte superior corresponden a casos en los que el consenso de cambio entre modelos CMIP5 es menor al 70%. Las últimas cuatro barras de los paneles (a) y (c) representan el consenso de cambio de la variable total ((a) cambio de agua precipitable total y (c) cambio de precipitación total) sobre NOSA para finales del siglo XXI.

La Figura 3.17 muestra claros consensos sobre el cambio proyectado para finales de siglo en la magnitud del transporte de agua precipitable hacia NOSA, sugiriendo aumentos de la variable desde sus primeras cuatro fuentes de mayor contribución. Se proyectan aumentos desde las regiones oceánicas TNA, TSA y NATL durante todas las temporadas, aunque con mayores porcentajes de acuerdo entre modelos para TNA y NATL, e incrementos de magnitud del reciclaje de agua precipitable durante todo el año, con acuerdos entre modelos levemente superiores al 70%. Además, se proyectan aumentos en la magnitud de agua precipitable total sobre NOSA durante el periodo 2070-2100 (del orden del 30% con respecto al periodo histórico para las cuatro temporadas), con valores de consenso elevados. Por su parte, los consensos de cambio en cuanto a la importancia de cada fuente de agua precipitable hacia NOSA (Figura 3.17b) sugieren que TNA, NOSA (reciclaje de agua precipitable) y NAMZ perderán relevancia durante todas las temporadas del año, a pesar de que los valores

totales de la variable aumentarán. Dicha pérdida de importancia significa que la proporción de transporte de agua precipitable desde cada una de ellas respecto al agua precipitable total sobre NOSA será menor para el futuro, lo cual se proyecta para la mayoría de los modelos desde las regiones ya mencionadas. Contrariamente, se sugiere aumento de importancia para las regiones TSA (MAM y SON) y NATL (MAM), lo cual significa, análogamente, que la proporción de transporte de agua precipitable desde estas respecto al agua precipitable total sobre NOSA durante dichas temporadas será mayor para el futuro.

Como se discute en secciones anteriores, la Figura 3.2 y la Figura 3.17 muestran que el comportamiento a futuro de la cantidad de precipitación aportada desde las fuentes de humedad con mayor importancia para NOSA presenta más incertidumbre que para el transporte de agua precipitable. Por ejemplo, se sugieren aumentos de transporte de precipitación desde TNA, la fuente más importante para NOSA, durante las primeras dos temporadas del año (DEF y MAM) y disminuciones para las otras dos (JJA y SON). A pesar de lo anterior, si se toma en cuenta el porcentaje de acuerdo entre modelos, se tiene que los valores dados para DEF y JJA no son significativos, ya que están por debajo del 70% (Figura 3.17c).

El consenso de cambio entre modelos para la precipitación total sobre NOSA para el periodo 2070-2100 sugiere aumentos durante las dos primeras temporadas del año (DEF y MAM) y disminuciones para las dos últimas (JJA y SON) (Figura 3.17c). En particular, estos resultados evidencian que: 1) los aumentos en la magnitud de precipitación total proyectados para DEF y MAM sobre NOSA se deberán, principalmente, a la precipitación aportada por las tres regiones Atlánticas (TNA, TSA y NATL), con mayores aportes desde TSA, ya que se proyecta que el aumento de este aporte durante MAM será del orden del 30% con respecto al periodo histórico; y 2) las reducciones proyectadas en la magnitud de precipitación total sobre NOSA durante JJA y SON se deberán a las disminuciones generalizadas en el aporte de precipitación desde todas sus fuentes de mayor importancia. En proporción, NAMZ será la región que dejará de aportar mayor cantidad de precipitación a NOSA respecto al periodo histórico, alcanzando entre un 35%-36% de reducción. En general, las mayores reducciones en transporte de precipitación se observan durante JJA y SON desde las fuentes continentales (21% para NOSA (reciclaje) y 36% para NAMZ). Por su parte, los consensos de cambio en cuanto a la contribución total del reciclaje de precipitación sobre NOSA (Figura 3.17d) muestran porcentajes del 100% para todas las temporadas, sugiriendo que este perderá importancia para finales del siglo XXI, según las proyecciones de los 11 modelos considerados. Las fuentes oceánicas TNA y TSA perderán y ganarán importancia, respectivamente, durante la mayoría de las temporadas (MAM, JJA y SON).

En conclusión, a pesar de que se sugieren aumentos en la magnitud del reciclaje de agua precipitable sobre NOSA, esto no se verá reflejado en el reciclaje de precipitación, ya que para la mayoría de los modelos se proyectan disminuciones de esta última variable sobre NOSA durante todas las temporadas del año para finales de siglo, teniendo un mayor consenso en JJA y SON (81.1% y 100%, respectivamente). Lo anterior significa que, aunque se tendrán aumentos en la cantidad de agua precipitable reciclada sobre NOSA, ésta no se precipitará, sino que por el contrario, se tendrán valores más bajos de lluvia reciclada, en comparación con el periodo histórico (entre 14% y 21% de reducción).

3.2.3.2. Consenso de cambio para el norte del Amazonas

La Figura 3.18 presenta de manera resumida el consenso entre modelos para el cambio proyectado de transporte de agua precipitable y de transporte de precipitación hacia NAMZ para finales del siglo XXI, desde cada una de sus fuentes de mayor importancia: TNA, TSA, NAMZ (reciclaje), NORD y SAMZ.

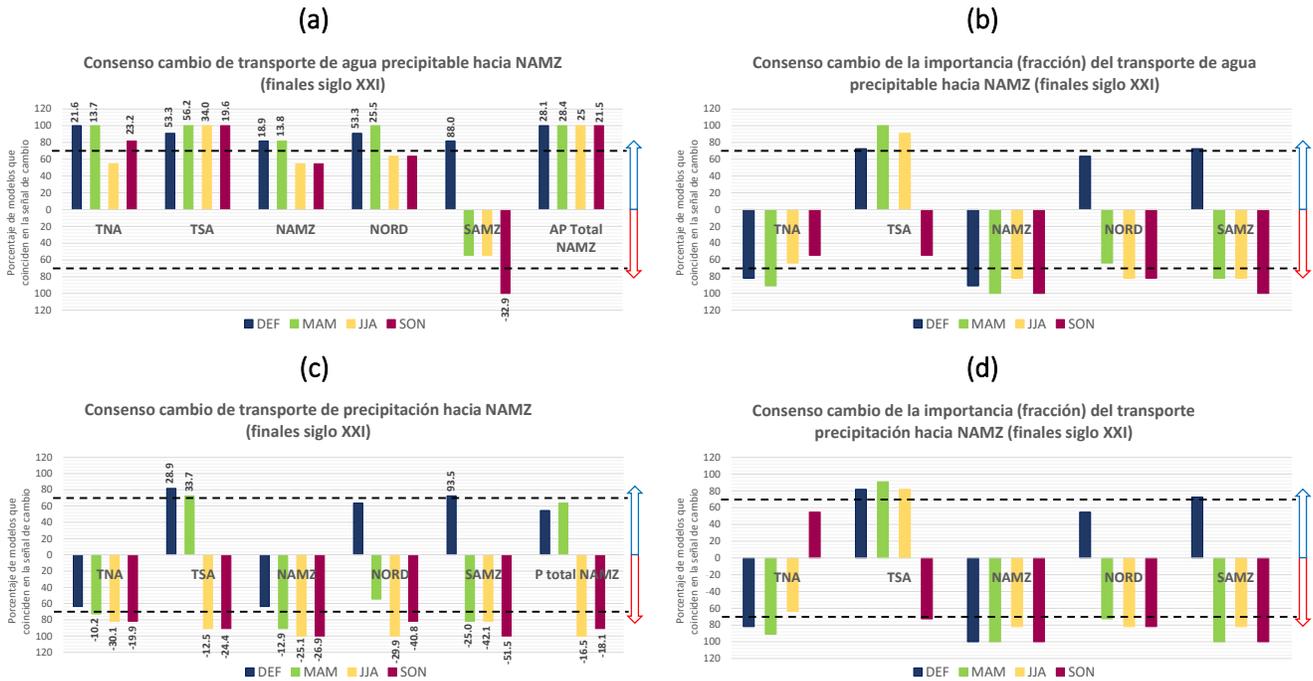


Figura 3.18. Consenso entre los 11 modelos CMIP5 considerados sobre el cambio proyectado para transporte de humedad hacia NAMZ para finales del siglo XXI (%). **(a)** Porcentajes de consenso sobre el cambio proyectado en la magnitud del transporte de agua precipitable. **(b)** Porcentajes de consenso sobre el cambio proyectado de la importancia de cada región como fuente de agua precipitable. **(c)** Igual que (a) pero para el transporte de precipitación. **(d)** Igual que (b) pero para el transporte de precipitación. Cada uno de los grupos de barras corresponde a una fuente de humedad hacia NOSA, y se presentan en orden decreciente de importancia en la contribución de humedad hacia NOSA durante el periodo histórico (Capítulo II). Los colores de las barras representan cada una de las temporadas del año. Las líneas punteadas indican un porcentaje de 70% de acuerdo entre modelos (porcentaje a partir del cual se considera un consenso importante entre modelos). Los valores sobre las barras de los paneles (a) y (c) representan el cambio porcentual promedio de la magnitud del transporte respecto al periodo histórico para los modelos que presentan consenso en el signo de cambio (%). Las barras que no muestran este valor en la parte superior corresponden a casos en los que el consenso de cambio entre modelos CMIP5 es menor al 70%. Las últimas cuatro barras de los paneles (a) y (c) representan el consenso de cambio de la variable total ((a) cambio de agua precipitable total y (c) cambio de precipitación total) sobre NAMZ para finales del siglo XXI.

Los consensos de cambio en la magnitud del transporte de agua precipitable hacia NAMZ se pueden observar en la Figura 3.18a. Al igual que para NOSA, se evidencian, en general, consensos entre modelos que proyectan aumentos del transporte de agua precipitable desde sus fuentes de mayor contribución. Se tienen así proyecciones de aumento en la cantidad agua precipitable transportada desde las dos regiones oceánicas (TNA y

TSA) durante todas las temporadas, aunque con mayores porcentajes de acuerdo entre modelos para TSA; además, se observan aumentos en la magnitud del reciclaje de agua precipitable durante todo el año, con acuerdos entre modelos superiores al 70% durante DEF y MAM. Se sugiere también que la cantidad de agua precipitable total sobre NAMZ aumentará para finales del siglo XXI, con incrementos del orden de 21%-28% respecto al periodo histórico, durante las cuatro temporadas del año. Por su parte, los consensos de cambio en cuanto a la importancia de cada fuente de agua precipitable hacia NAMZ (Figura 3.18b) muestran disminuciones para TNA, NAMZ (reciclaje de agua precipitable), NORD y SAMZ. Lo anterior significa que la proporción de transporte de agua precipitable que se aportará desde cada una de estas fuentes respecto al agua precipitable total sobre NAMZ será menor para el futuro. Contrariamente, se sugiere un aumento de la importancia de transporte de agua precipitable desde TSA durante DEF, MAM y JJA, con valores de consenso entre modelos superiores al 70%.

En la Figura 3.18c y la Figura 3.18d se observan los consensos entre modelos respecto al cambio en magnitud e importancia, respectivamente, del aporte de precipitación desde cada una de las fuentes relevantes para NAMZ. De dichos paneles se puede concluir que el comportamiento del transporte de precipitación hacia NAMZ para finales de siglo posee incertidumbres, aunque en particular se sugieren reducciones en la cantidad de precipitación aportada desde cada una de sus fuentes durante las últimas temporadas del año. Desde TNA, que es la fuente más importante para NAMZ, se tienen altos consensos de acuerdo en que su aporte en la cantidad precipitación disminuirá durante todas las temporadas del año para finales del siglo XXI, con consensos mayores al 70% para MAM, JJA y SON. Para el reciclaje de precipitación sobre NAMZ se tiene un panorama similar que para TNA, con consensos que sugieren que éste se verá disminuido en cantidad durante todas las temporadas para finales de siglo, con acuerdos superiores al 70% en MAM (>90%), JJA (100%) y SON (100%) (Figura 3.18c).

Los modelos exhiben consensos de cambio proyectado en la cantidad de precipitación total sobre NAMZ para el periodo 2070-2100, con aumentos durante las dos primeras temporadas del año (DEF y MAM, con porcentajes menores al 70%) y disminuciones para las dos últimas (JJA (100%) y SON (>90%)). En particular, se evidencia que: 1) los aumentos en la magnitud de precipitación total sobre NAMZ proyectados para DEF y MAM se deberán principalmente a la precipitación aportada por las fuentes TSA (DEF y MAM), NORD (DEF) y SAMZ (DEF); con acuerdos mayores al 70% para TSA y SAMZ. En términos de proporción, SAMZ será la fuente con el mayor aumento en este aporte, con un 93% más de contribución de precipitación respecto al periodo histórico durante DEF. El aporte de precipitación desde TSA hacia NAMZ muestra un incremento del 29%-34% respecto al periodo 1980-2005 durante DEF y MAM; y 2) Las reducciones proyectadas en la magnitud de precipitación total sobre NAMZ durante JJA y SON se deberán a las disminuciones generalizadas en el aporte de precipitación desde todas sus fuentes de importancia. En general, las proyecciones para finales de siglo sugieren que dos de las tres fuentes continentales de mayor importancia para NAMZ (NORD y SAMZ) reducirán su aporte de precipitación durante estas dos últimas temporadas del año, alcanzando hasta un 51% menos en los aportes desde SAMZ durante SON.

Finalmente, se concluye que, aunque se sugieren aumentos en la magnitud del reciclaje de agua precipitable sobre NAMZ, esto no se verá reflejado en el reciclaje de precipitación, ya que la mayoría de los estimados para los modelos CMIP5 proyectan disminuciones en la cantidad de esta última variable sobre NAMZ y durante todas las temporadas del año para finales del siglo XXI, teniendo un mayor consenso durante JJA y SON (100% para ambas temporadas). Lo anterior significa que, aunque se tendrán aumentos en la cantidad de agua precipitable reciclada sobre NAMZ, ésta no se verá reflejada en un aumento de las lluvias pues, por el contrario, se proyectan valores

más bajos de precipitación reciclada en comparación con el periodo histórico. De esta manera, la importancia del reciclaje de precipitación sobre NAMZ disminuirá para finales del siglo XXI (Figura 3.18d). Se puede decir que, en general, la única fuente que aumentará su importancia en el aporte de precipitación hacia NAMZ durante las primeras tres temporadas del año será TSA.

3.2.3.3. Consenso de cambio para el sur del Amazonas

La Figura 3.19 presenta de manera resumida el consenso entre modelos para el cambio proyectado del transporte de agua precipitable y del transporte de precipitación hacia SAMZ para finales del siglo XXI, desde cada una de sus fuentes de mayor importancia: SAMZ (reciclaje), TSA, TNA, NAMZ y NORD.

La Figura 3.19a presenta los consensos de cambio proyectado en la magnitud del transporte de agua precipitable hacia SAMZ. A diferencia de las dos regiones de interés anteriores, para las que en general se proyectan aumentos de la variable, se observa que el cambio de transporte de agua precipitable hacia SAMZ podría variar dependiendo de la fuente y de la temporada del año. Se proyectan aumentos en la cantidad de agua precipitable desde TSA, además de su importancia como fuente para finales del siglo XXI, con consensos mayores al 70% durante casi todas las temporadas (Figura 3.19b). También se observa un alto consenso de aumentos en la magnitud de agua precipitable aportada desde SAMZ (DEF y MAM), TNA (DEF, JJA y SON), NAMZ (DEF y JJA) y NORD (DEF, MAM y JJA). De estos consensos sólo los correspondientes a las fuentes SAMZ, NAMZ (DEF) y NORD (DEF y MAM) superan el 70%. Además, la cantidad de agua precipitable total sobre SAMZ aumentará a lo largo del año para finales del siglo XXI, con incrementos del orden entre 20% y 28% respecto al periodo histórico. Estos aumentos en el agua precipitable total sobre SAMZ para finales del siglo XXI se relacionan con aumentos en el transporte desde TSA, principalmente. Por su parte, los consensos de cambio en la importancia de cada fuente de agua precipitable hacia SAMZ (Figura 3.19b) sugieren aumentos para TSA durante las cuatro temporadas del año (>70% para DEF, MAM y SON), para TNA durante JJA (<70%) y para NORD durante DEF (<70%). Por el contrario, se sugiere que la importancia del reciclaje de agua precipitable sobre SAMZ será menor para el periodo 2070-2100 y durante todas las temporadas, con consensos superiores al 70%.

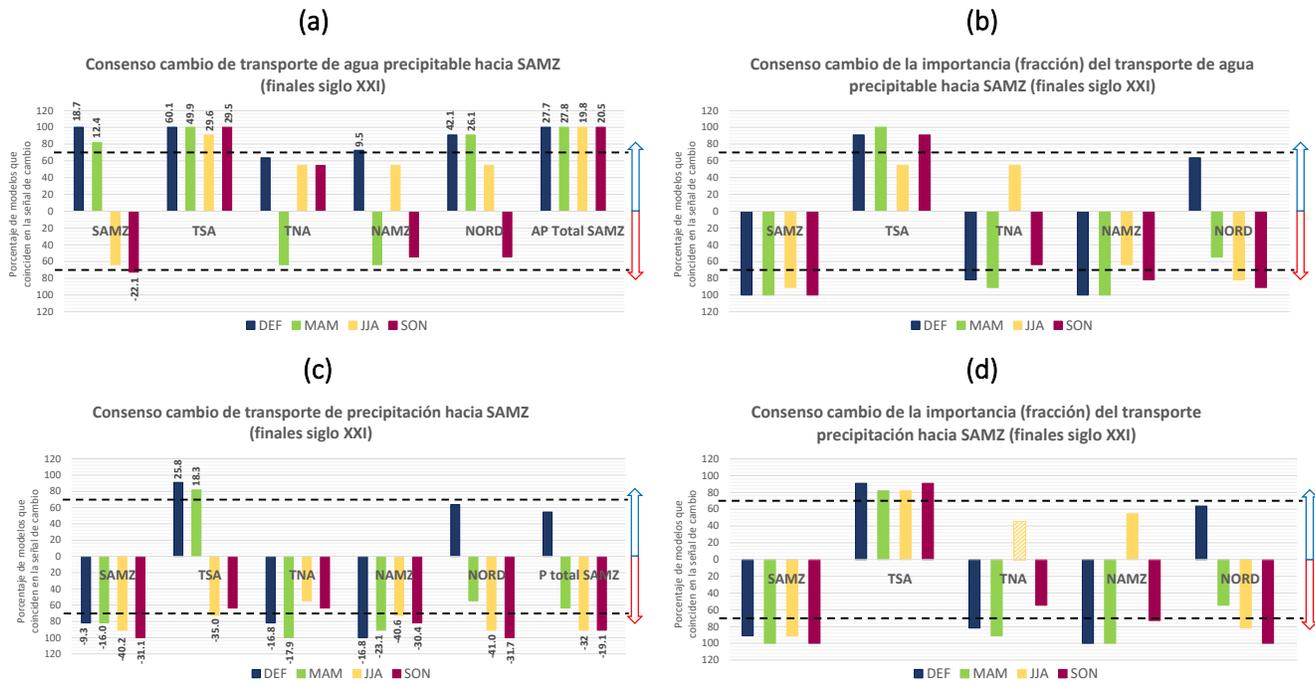


Figura 3.19. Consenso entre los 11 modelos CMIP5 considerados sobre el cambio proyectado para transporte de humedad hacia SAMZ para finales del siglo XXI (%). **(a)** Porcentajes de consenso sobre el cambio proyectado en la magnitud del transporte de agua precipitable. **(b)** Porcentajes de consenso sobre el cambio proyectado de la importancia de cada región como fuente de agua precipitable. **(c)** Igual que (a) pero para el transporte de precipitación. **(d)** Igual que (b) pero para el transporte de precipitación. Cada uno de los grupos de barras corresponde a una fuente de humedad hacia NOSA, y se presentan en orden decreciente de importancia en la contribución de humedad hacia NOSA durante el periodo histórico (Capítulo II). Los colores de las barras representan cada una de las temporadas del año. Las líneas punteadas indican un porcentaje de 70% de acuerdo entre modelos (porcentaje a partir del cual se considera un consenso importante entre modelos). Los valores sobre las barras de los paneles (a) y (c) representan el cambio porcentual promedio de la magnitud del transporte respecto al periodo histórico para los modelos que presentan consenso en el signo de cambio (%). Las barras que no muestran este valor en la parte superior corresponden a casos en los que el consenso de cambio entre modelos CMIP5 es menor al 70%. Las últimas cuatro barras de los paneles (a) y (c) representan el consenso de cambio de la variable total ((a) cambio de agua precipitable total y (c) cambio de precipitación total) sobre SAMZ para finales del siglo XXI. **Nota:** La barra achurada del panel (d) para la fuente TNA durante MAM significa que en este caso, el porcentaje de modelos que sugieren aumento de importancia de esta fuente es igual al porcentaje de modelos que sugieren disminución de importancia.

De la Figura 3.19c y la Figura 3.19d se puede concluir que la mayoría de los modelos CMIP5 considerados en este estudio sugieren que el aporte de precipitación hacia SAMZ se verá reducido para finales del siglo XXI. Así, el consenso entre modelos proyecta disminuciones en la cantidad del reciclaje de precipitación sobre SAMZ durante todas las temporadas para el periodo 2070-2100, con consensos superiores al 70%, disminuciones de transporte desde TSA durante JJA y SON, desde TNA y NAMZ durante todo el año, y desde NORD durante MAM, JJA y SON (Figura 3.19c). Es de resaltar la disminución proyectada por los modelos para el reciclaje de precipitación sobre SAMZ (con consensos mayores al 70% para todas las temporadas), con porcentajes de reducción en su magnitud respecto al periodo histórico, de 9.3% en DEF, 16% en MAM, 40% en JJA y 31% en SON. Nótese que las mayores

reducciones en la cantidad del reciclaje de precipitación sobre la región respecto al periodo histórico se proyectan durante JJA, correspondiente a la temporada seca en esta región.

El consenso entre modelos sobre el cambio en la cantidad total de precipitación sobre SAMZ sugiere que esta será menor durante MAM, JJA y SON para finales del siglo XXI (con consensos superiores al 70% durante JJA y SON) y mayor durante DEF, aunque con un acuerdo menor al 70%. Teniendo en cuenta este comportamiento se puede concluir que: 1) los aumentos en la magnitud de la precipitación total proyectados para DEF sobre SAMZ se deberán, principalmente, a la precipitación aportada desde las fuentes TSA (consenso fuerte y con casi un 26% más de aporte que durante el periodo histórico) y NORD; y 2) las reducciones proyectadas en la magnitud de precipitación total durante MAM, JJA y SON se deberán a las disminuciones generalizadas en el aporte desde todas las fuentes de mayor importancia para SAMZ. A pesar de que las reducciones proyectadas en la cantidad de precipitación aportada son generalizadas desde todas las fuentes, se resalta el papel de las masas continentales, ya que son estas desde donde se tendrán mayores disminuciones, en términos de proporción, del transporte de precipitación con respecto al periodo histórico: para el reciclaje de precipitación sobre SAMZ se proyectan máximas reducciones durante JJA y SON, del 40% y 31%, respectivamente; desde NAMZ también se proyectan las máximas reducciones durante estas mismas temporadas (JJA: 41% y SON: 30%); y se proyectan reducciones de 41% (JJA) y 32% (SON) desde NORD. Finalmente, la Figura 3.19d muestra que la importancia en contribución de precipitación hacia SAMZ se verá afectada para finales del siglo XXI desde la mayoría de sus fuentes, a excepción de TSA, la cual ganará importancia en esta contribución hacia SAMZ durante todas las temporadas del año.

En base a los resultados obtenidos en la Figura 3.17, en la Figura 3.18 y en la Figura 3.19, la Figura 3.20 presenta, a manera de resumen, el consenso del cambio proyectado para finales del siglo XXI del aporte de precipitación desde las principales fuentes de humedad identificadas en este estudio y hacia las tres regiones continentales de interés.

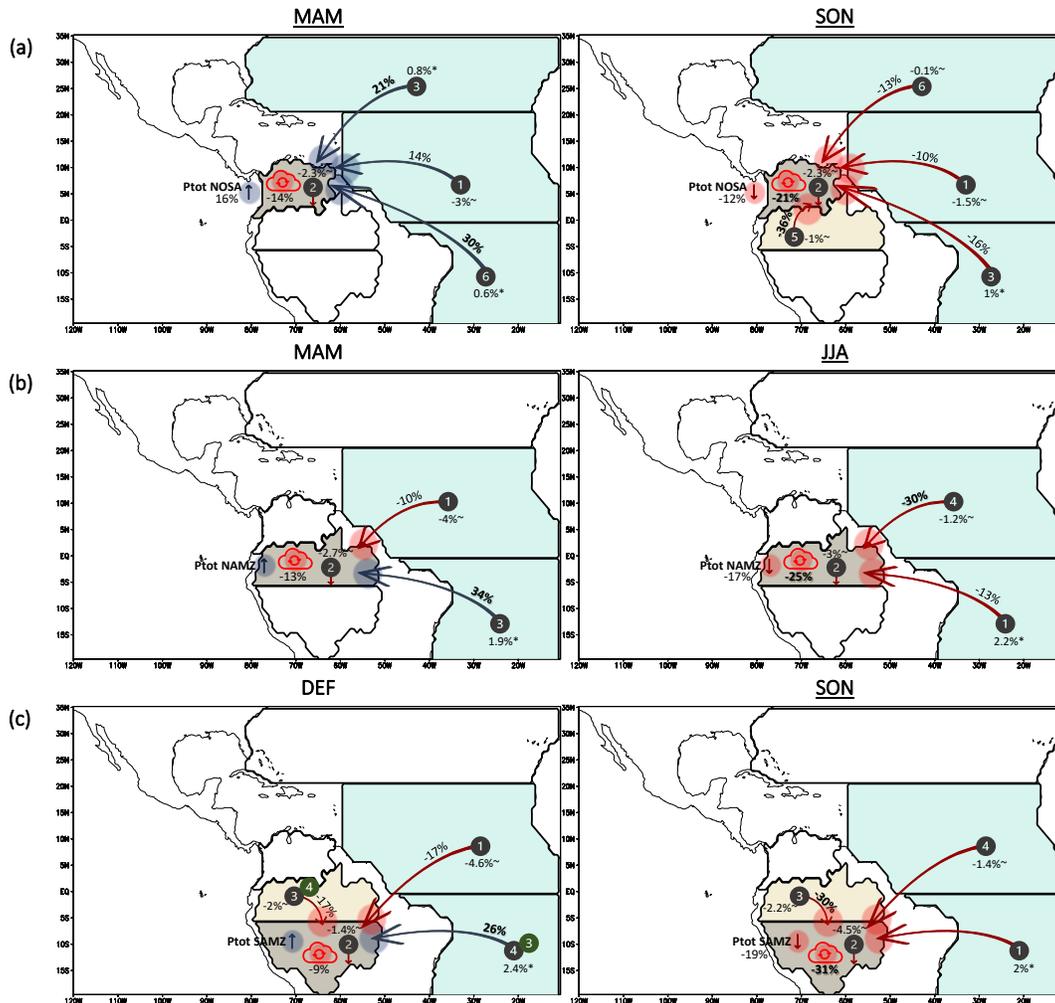


Figura 3.20. Esquema de síntesis de cambios proyectados de precipitación aportada por las fuentes más importantes hacia cada una de las regiones de interés para finales del siglo XXI, según el consenso entre los modelos CMIP5 aquí analizados. Los paneles (a), (b) y (c) representan cada una de las tres regiones continentales de interés en esta investigación (NOSA, NAMZ y SAMZ, respectivamente). Los números sobre las flechas indican el porcentaje de cambio de precipitación aportada desde cada fuente para finales del siglo XXI (2070-2100), con respecto al periodo histórico (1980-2005). Este porcentaje está calculado con base en aquellos modelos CMIP5 que presentan consenso en el signo de cambio proyectado. Los colores de las flechas y de los círculos al final de ellas indican la señal de cambio mostrada por la mayoría de los modelos CMIP5 aquí analizados (azul: aumento; rojo: reducción). En negrita se marcan las regiones para las que se proyecta un mayor cambio respecto a su transporte en el presente. Los círculos grises oscuros y verdes, con números en su interior, indican el orden de importancia de las fuentes de precipitación durante el periodo histórico (grises) y para finales del siglo XXI (verdes) para cada una de las regiones de interés y las diferentes temporadas del año. Si las fuentes sólo tienen círculos grises significa que el orden de su importancia en contribución de precipitación se mantendrá para 2070-2100. Los porcentajes al lado de cada uno de estos círculos indican la diferencia entre la importancia como fuente proyectada para finales del siglo XXI y la simulada durante el periodo histórico (% de contribución de precipitación futuro (2070-2100) - % de contribución de precipitación histórica (1980-2005)). Esta diferencia de importancia en la contribución de precipitación está calculada con base en aquellos modelos CMIP5 que se encuentran de acuerdo en la señal de cambio respectiva. Los asteriscos en estos números (*) indican que dicha fuente ganará importancia durante la temporada correspondiente para finales del siglo XXI. Las virgullitas (~) indican que dicha fuente perderá importancia durante la temporada correspondiente para finales del siglo XXI. Las temporadas subrayadas indican que los modelos CMIP5 aquí analizados poseen un consenso mayor al 70% en cuanto al signo del cambio proyectado de precipitación total para finales del siglo XXI, durante dicha temporada y sobre la región específica.

Las columnas en la Figura 3.20 indican las temporadas para las cuales se realiza el análisis de consenso en cada caso: la primera columna representa una de las temporadas en las cuales los modelos sugieren aumentos de la precipitación total sobre cada región de interés para finales del siglo XXI, mientras que la segunda columna representa una de las temporadas en las cuales los modelos proyectan disminuciones de la precipitación total. Para el caso de las regiones NOSA y NAMZ, se sugieren aumentos de la precipitación total para finales de siglo durante las temporadas DEF y MAM y disminuciones durante JJA y SON. Para el caso de la región SAMZ, se sugieren aumentos de precipitación total durante DEF y disminuciones para MAM, JJA y SON. A continuación se resaltan los principales resultados para cada región continental de interés.

- **Norte de Suramérica**

La Figura 3.20a muestra el resumen de los cambios que se proyectan para finales del siglo XXI en cuanto al aporte de precipitación (transporte de precipitación) hacia NOSA. Las temporadas seleccionadas para dicho análisis son MAM y SON, en las cuales se proyecta aumento y disminución, respectivamente, de la precipitación total sobre la región para finales de siglo.

Para la temporada MAM (Figura 3.20a, izquierda) se observa un consenso entre modelos CMIP5 que sugiere que la precipitación total sobre NOSA aumentará un 16%, aproximadamente, para finales del siglo XXI. En particular, se tiene que:

1. El aumento de la precipitación total sugerido durante MAM para finales del siglo XXI con respecto al periodo histórico también se proyecta para la temporada DEF, pero con consenso menor al 70% entre los modelos CMIP5.
2. Se proyectan aumentos del aporte de precipitación desde TNA (primera fuente de importancia para NOSA), NATL (tercera fuente de importancia) y TSA (sexta fuente de importancia) para finales del siglo XXI, con respecto a la cantidad aportada por estas mismas fuentes durante el periodo histórico. Se resalta que TSA es la fuente de precipitación hacia NOSA desde la que se proyecta un mayor aumento de transporte respecto al presente. Además, las proyecciones sugieren un incremento de la importancia de la contribución de precipitación desde dos de las regiones oceánicas: NATL (0.8%) y TSA (0.6%). Dicha ganancia de importancia de NATL como fuente de precipitación se proyecta para las dos primeras temporadas del año (DEF y MAM).
3. Se proyectan reducciones del reciclaje de precipitación sobre NOSA en un 14% durante MAM, respecto al periodo histórico. Esta disminución de reciclaje también se evidencia para DEF, aunque para dicha temporada no se tiene un consenso mayor al 70%. Además, las proyecciones sugieren reducciones de un 2.3% en la importancia del reciclaje de humedad de NOSA para finales del siglo XXI.

Como se presenta en el Capítulo II, TSA es una de las fuentes de humedad más importantes hacia NOSA a lo largo del año climatológico, tomando mayor o menor importancia dependiendo de la temporada. En particular, esta región oceánica es una fuente de humedad importante hacia NOSA, principalmente durante la segunda mitad del año (JJA y SON) (ver ciclos anuales de aporte de humedad de Figura 2.2 y la Figura 2.4, TSA a NOSA).

De acuerdo con las simulaciones históricas para la temporada MAM, las fuentes que predominan dicho transporte a NOSA son: TNA (fuente de mayor contribución), NOSA (reciclaje; segunda fuente más importante para NOSA) y NATL (tercera fuente más importante). Según las proyecciones analizadas, este orden de importancia no cambiará durante esta temporada para finales del siglo XXI, a pesar de las disminuciones o aumentos de importancia de contribución de precipitación proyectadas. Se resalta además, que a pesar de que TSA no se encuentra dentro de las tres primeras fuentes más importantes hacia NOSA durante DEF y MAM para el periodo histórico (ver Figura 3.20a, izquierda), sí aumentará su contribución y su importancia como fuente de precipitación hacia NOSA durante MAM para finales del siglo XXI. De esta manera, se puede concluir que el aumento de precipitación total sobre NOSA durante DEF y MAM para finales del siglo XXI se deberá, principalmente, a la contribución de humedad desde las regiones oceánicas Atlánticas, siendo TSA la fuente con mayor contribución en cantidad aportada respecto al periodo histórico.

Por otro lado, para la temporada SON (Figura 3.20a, derecha), el consenso entre los modelos CMIP5 sugiere que la precipitación total sobre NOSA disminuirá un 12%, aproximadamente, para finales del siglo XXI. Para esta temporada se tiene que:

1. La disminución de la precipitación total sugerida durante SON con respecto al periodo histórico para finales del siglo XXI también se proyecta para la temporada JJA, pero con un consenso menor al 70% entre los modelos CMIP5 considerados.
2. Para finales del siglo XXI se proyectan disminuciones del aporte de precipitación desde TNA (fuente de mayor importancia en el presente para NOSA), TSA (tercera fuente de mayor importancia), NAMZ (quinta fuente) y NATL (sexta fuente), para las dos últimas temporadas del año (JJA y SON), con respecto a la cantidad aportada por estas mismas fuentes durante el periodo histórico. Además, se sugiere una disminución de la importancia del aporte de precipitación desde dos de las regiones oceánicas: NATL (0.1%) y TNA (1.5%) y de la fuente continental NAMZ (1%). Las proyecciones sugieren que TSA ganará importancia como fuente de humedad hacia NOSA durante las tres últimas temporadas del año (MAM, JJA y SON).
3. Se sugieren reducciones en el reciclaje de precipitación sobre NOSA (segunda fuente de humedad para sí misma) en un 21% durante SON, respecto al periodo histórico. Esta disminución también se evidencia para JJA, con un porcentaje similar (20%). Además, las proyecciones sugieren que la importancia del reciclaje de precipitación sobre NOSA se reducirá en un 2.3% para finales del siglo XXI, al igual que para las dos temporadas anteriores.

TSA es una de las fuentes de precipitación más relevantes para NOSA durante las dos últimas temporadas del año (la segunda durante JJA y la tercera durante SON), y es la única región para la que no se proyecta disminución en su importancia como fuente de precipitación para finales del siglo XXI, a pesar de que sus contribuciones totales sí disminuirán a futuro, con respecto al periodo histórico. Por su parte, TNA y NOSA, siendo también fuentes de humedad bastante relevantes para el norte del Suramérica durante ambas temporadas, disminuirán tanto su aporte total como su importancia para finales del siglo XXI. Tal como se ha discutido, el reciclaje y el aporte desde NAMZ también decaerán para finales del siglo XXI. De lo anterior se puede concluir que la disminución de precipitación total sobre NOSA durante JJA y SON para finales del siglo XXI se deberá a la reducción de la cantidad

total desde cada una de sus fuentes, tanto oceánicas como continentales, con respecto al periodo histórico. Además, dichas fuentes perderán importancia para finales de siglo, a excepción de TSA.

Finalmente se concluye, que de acuerdo con el promedio multianual de contribución total de precipitación hacia NOSA para finales del siglo XXI (Apéndice A, Tabla A-1), las fuentes que aumentarán su importancia serán las oceánicas. El orden de importancia del aporte climatológico multianual de precipitación proyectado para finales del siglo XXI (2070-2100), en comparación con el periodo histórico, se sugiere será: TNA (permanece como la región de mayor contribución total multianual de precipitación), TSA (convirtiéndose en la segunda fuente más importante para NOSA), NOSA (disminuyendo su importancia respecto al periodo histórico al constituirse como tercera fuente de humedad), GUYN, NATL (que aumenta su contribución total multianual, convirtiéndose en la quinta fuente de importancia) y NAMZ (disminuyendo su contribución total multianual, pasando a ser la sexta fuente de importancia) (ver Apéndice A, Tabla A-1). Así, se proyecta que las fuentes que ganarán importancia en su contribución total multianual de precipitación hacia NOSA para finales del siglo XXI serán TSA y NATL (oceánicas), mientras que NOSA y NAMZ (continentales) la perderán.

- **Norte del Amazonas**

La Figura 3.20b muestra el resumen de los cambios proyectados para finales del siglo XXI en cuanto al aporte de precipitación (transporte de precipitación) hacia NAMZ. Para esta región se consideran las temporadas MAM y JJA, en las cuales se proyecta aumento y disminución, respectivamente, de la precipitación total sobre la región para finales de siglo.

El consenso entre modelos CMIP5 sugiere que la precipitación total sobre NAMZ aumentará para finales del siglo XXI durante la temporada MAM (Figura 3.20b, izquierda). En resumen, se tiene que:

1. Las proyecciones sugieren un aumento de la precipitación total sobre NAMZ respecto al periodo histórico para finales del siglo XXI tanto para MAM como para DEF, pero ninguna de las dos temporadas posee un consenso entre modelos mayor al 70%.
2. Se proyectan aumentos del aporte de precipitación desde TSA (tercera fuente de mayor importancia para NAMZ) en un 34% para la temporada MAM, respecto a la cantidad aportada por esta misma fuente durante el periodo histórico. Este aumento de contribución a la precipitación de NAMZ desde TSA para finales de siglo también se proyecta para la temporada DEF, con un porcentaje de aumento similar que en MAM (29%). Así, según el consenso para los modelos CMIP5 aquí analizados, la única fuente que aumenta su cantidad de aporte a la precipitación de NAMZ para finales del siglo XXI será TSA. Además, se sugiere una ganancia en la importancia de TSA como fuente (0.7% para DEF y 1.9% para MAM).
3. Se proyecta una disminución del aporte de precipitación desde TNA durante DEF y MAM, siendo esta la fuente más importante para NAMZ durante estas dos primeras temporadas del año, según los estimados históricos de los modelos considerados.

4. Se sugiere una reducción en la cantidad del reciclaje de precipitación sobre NAMZ (segunda fuente de humedad con mayor importancia) en un 13% durante MAM, respecto al periodo histórico. Esta disminución también se proyecta para DEF, aunque para dicha temporada no se tiene un consenso superior al 70%. Además, la importancia del reciclaje de precipitación en NAMZ disminuirá para finales del siglo XXI, en 1.6% durante DEF y 2.7% durante MAM.

De lo anterior, se resalta que para para las temporadas DEF y MAM las proyecciones sugieren reducción de reciclaje de precipitación sobre NAMZ y aumento de aporte de precipitación desde TSA hacia la región, así como un aumento en la importancia de esta región oceánica como fuente de precipitación para el norte del Amazonas. Se concluye que el aumento de precipitación total sobre NAMZ sugerido por los estimados para los modelos CMIP5 durante estas temporadas para finales del siglo XXI se deberá, casi exclusivamente, al aumento de la humedad proveniente desde TSA, que corresponde a la cuarta y tercera fuente de mayor contribución a NAMZ durante DEF y MAM, respectivamente.

Por otro lado, para la temporada JJA (Figura 3.20b, derecha) se observan consensos entre modelos CMIP5 que sugieren que la precipitación total sobre NAMZ disminuirá un 17%, aproximadamente, para finales del siglo XXI. En particular:

1. La disminución de la precipitación total proyectada durante JJA para finales del siglo XXI con respecto al periodo histórico también se proyecta para la temporada SON, con un porcentaje de reducción similar (18%).
2. Se proyectan disminuciones en el aporte de precipitación para finales del siglo XXI desde TSA (primera fuente de importancia para NAMZ) y TNA (cuarta fuente) durante las dos últimas temporadas del año (JJA y SON), con respecto a la cantidad aportada por estas mismas durante el periodo histórico. La reducción de cantidad proyectada desde TSA es de 13% en JJA y 24% en SON; por su parte, la reducción proyectada para la cantidad aportada desde TNA es de aproximadamente 30% en JJA (siendo una de las más altas) y de 20% en SON. La reducción sugerida para el aporte de precipitación desde TSA es de gran relevancia, ya que esta es la primera fuente de contribución de la variable para NAMZ durante las dos últimas temporadas del año (JJA y SON). Por su parte, el cambio de importancia como fuente de humedad presenta un comportamiento opuesto entre estas dos regiones oceánicas: para TNA se proyecta una pérdida de importancia como fuente de precipitación hacia NAMZ (1.2%) durante JJA, mientras que para TSA se proyecta una ganancia de 2.2% más en su contribución durante la misma temporada. Recordemos que este aumento de importancia para TSA como fuente de precipitación para NAMZ se proyecta para las primeras tres temporadas del año: DEF, MAM y JJA, resaltando la función dominante de esta región oceánica como fuente de precipitación de NAMZ para finales del siglo XXI, ya que, según nuestros resultados, será la única que ganará importancia durante casi todo el año.
3. Se proyectan reducciones en la magnitud del reciclaje de precipitación sobre NAMZ (segunda fuente de humedad de mayor importancia para NAMZ) de un 25% durante JJA. Esta disminución de reciclaje también se proyecta para SON, con un porcentaje similar (27%). Además, se proyecta pérdida, de un 3% durante JJA y de 3.2% durante SON, de la importancia de este reciclaje sobre la región.

Analizando de manera general las proyecciones para finales del siglo XXI, se puede decir que TSA es la fuente con mayores aumentos del aporte de precipitación hacia NAMZ, con incrementos tanto en la cantidad transportada como en su importancia para las dos primeras temporadas del año, además de aumento de su importancia durante JJA. Teniendo en cuenta los resultados proyectados en la contribución total multianual de precipitación desde cada una de las fuentes hacia NAMZ para finales del siglo XXI, la única que se sugiere ganará importancia será TSA (Apéndice A, Tabla A-2). Finalmente, las proyecciones indican que las fuentes de mayor aporte de precipitación hacia NAMZ para finales del siglo XXI serán: TNA (continúa como principal fuente), TSA (convirtiéndose en la segunda más importante, en lugar de la tercera como se observa para las simulaciones históricas) y NAMZ (dejando de ser la segunda, pasando a la tercera posición) (ver Apéndice A, Tabla A-2).

- **Sur del Amazonas**

La Figura 3.20c muestra el resumen de los cambios proyectados para finales del siglo XXI en cuanto al aporte de precipitación (transporte de precipitación) hacia SAMZ. Para esta región se analizan los cambios proyectados durante las temporadas DEF y SON, para las cuales se proyecta aumento y disminución, respectivamente, de la precipitación total sobre la región para finales del siglo XXI.

Para la temporada DEF (Figura 3.20c, izquierda) se tiene que el consenso entre modelos CMIP5 sugiere que la precipitación total sobre SAMZ aumentará para finales del siglo XXI. En particular para esta temporada:

1. Se proyecta un aumento de 26% del aporte de precipitación desde TSA para finales del siglo XXI, con respecto a la cantidad aportada durante el periodo histórico. Además, se proyecta un incremento de la importancia de dicha región oceánica como fuente de precipitación hacia SAMZ (2.4%). Es de resaltar que este aumento de importancia como fuente se proyecta para todas las temporadas del año.
2. Se proyectan disminuciones del aporte de precipitación desde TNA (fuente de mayor importancia para SAMZ) y NAMZ (tercera fuente de importancia) para finales del siglo XXI, ambas con una disminución del 17% respecto al periodo histórico. Además de la disminución de cantidad de precipitación aportada, se tiene que ambas fuentes de precipitación perderán importancia hacia SAMZ durante esta temporada (4.6% para TNA y 2% para NAMZ).
3. Además, se esperan reducciones en la cantidad del reciclaje de precipitación sobre SAMZ (segunda fuente de importancia) en un 9% durante DEF, con respecto la cantidad aportada durante el periodo histórico. Esta disminución también se proyecta para todas las temporadas del año, al igual que su reducción de importancia como fuente de precipitación.

De lo anterior, se concluye que el aumento de precipitación total proyectado sobre SAMZ durante la temporada DEF, para el periodo 2070-2100, se deberá, principalmente, a la humedad proveniente desde TSA, la cual aumentará tanto en cantidad como en importancia de contribución hacia SAMZ durante esta temporada.

Por otro lado, para la temporada SON (Figura 3.20c, derecha) se tiene un consenso entre modelos CMIP5 que sugiere que la precipitación total sobre SAMZ disminuirá un 19%, aproximadamente, para finales del siglo XXI. Para esta temporada se observa que:

1. La disminución de la precipitación total proyectada para finales del siglo XXI con respecto al periodo histórico durante SON también se proyecta para la temporada JJA, con un porcentaje de reducción de 32%.
2. Se proyectan disminuciones en el aporte de precipitación para finales del siglo XXI desde TSA (primera fuente de humedad), NAMZ (tercera fuente) y TNA (cuarta fuente), respecto a la cantidad aportada por estas durante el periodo histórico. Las reducciones proyectadas en la cantidad de precipitación aportada a SAMZ desde estas fuentes de humedad son: 35% en JJA y sin consenso mayor al 70% para SON desde TSA; 23% en MAM, 41% en JJA y 30% en SON desde NAMZ; y 18% en MAM y sin consenso entre modelos CMIP5 mayor al 70% para JJA y SON desde TNA. Por otro lado, se resalta que TSA (primera fuente en importancia) será la única que no perderá importancia como fuente de precipitación hacia SAMZ, por el contrario, las proyecciones indican que la ganará durante todas las temporadas del año (3.1%, 4.4% y 2% más para MAM, JJA y SON, respectivamente).
3. Se proyectan reducciones en la cantidad de reciclaje de precipitación sobre SAMZ (segunda fuente de importancia) de un 31% durante SON, respecto al periodo histórico. Esta disminución de reciclaje también se proyecta para MAM (16%) y JJA (40%). La importancia del reciclaje de precipitación también tendrá una disminución durante estas mismas temporadas, según las proyecciones analizadas: 2.4% (MAM), 4.5% (JJA) y 4.5% (SON).

Es fundamental resaltar que las proyecciones de cambio de transporte y reciclaje de precipitación para SAMZ sugieren disminuciones marcadas para finales del siglo XXI, en especial durante JJA (temporada seca) y SON (transición entre temporada seca y temporada lluviosa). Son muchos los estudios que reconocen que el Amazonas tiene gran relevancia en la regulación del clima a nivel local y regional (Arraut et al., 2012; A. Drumond et al., 2014; IPCC, 2013; Marengo et al., 2004; Nobre et al., 2016; Sampaio et al., 2018; Spracklen & Garcia-Carreras, 2015; Zemp et al., 2014). Agudelo et al. (2019) concluyen que durante las últimas décadas se han evidenciado cambios en la circulación regional y en la cobertura vegetal de la Amazonía, los cuales generan modificaciones en el transporte de humedad atmosférica hacia el norte de Suramérica. Esto indica que los cambios que ocurren sobre esta cuenca Amazónica no sólo afectarían localmente, sino que generarían cambios en el transporte de humedad atmosférica a escala regional. Específicamente, Ruiz-Vásquez et al. (2019) encuentran que la disminución de la cobertura boscosa en esta región tiene relación con un menor reciclaje de humedad sobre la cuenca, además de generar cambios en circulaciones regionales como la celda de Hadley, favoreciendo el transporte de humedad desde el Atlántico y el Mar Caribe hacia el norte de Suramérica (Agudelo et al., 2019; Arias, Martínez, et al., 2015), además, dicho patrón se fortalece mucho más durante aquellos años en los que la temporada seca en el sur de Amazonas ha tenido una mayor duración (Agudelo et al., 2019), comportamiento evidenciado con mayor frecuencia en los últimos años (Arias, Fu, et al., 2015; Debortoli et al., 2015; Espinoza et al., 2019; Fu et al., 2013; Pabón-Caicedo et al., 2020).

3.2.4. Proyecciones de transporte de humedad atmosférica para los modelos MIROC5, MRI-CGCM3 y GFDL-ESM2G

El análisis anterior nos muestra el consenso de todos los modelos sobre las proyecciones de cambio en el transporte de humedad hacia las tres regiones de interés (NOSA, NAMZ y SAMZ), para finales del siglo XXI. Sin embargo, también es interesante observar, por separado, qué proyectan algunos modelos en particular, en especial aquel identificado como el mejor de todos los modelos aquí evaluados, tanto en las variables de entrada al DRM como en los estimados históricos de transporte de humedad, respecto a la línea base ERA5. MIROC5 es sin duda uno de modelos identificados con mejor desempeño a lo largo de todo el análisis de este trabajo, demostrando que aunque presenta sesgos importantes respecto a ERA5, posee una buena representación de las variables de entrada al DRM (ver Figura 1.4, Figura 1.8, Figura 1.12, Figura 1.14) y que esto, a su vez, genera los mejores estimados de transporte de humedad durante el periodo histórico, especialmente en términos de la estacionalidad de su ciclo anual (ver Tabla 2.1, Figura 2.23 y Figura 2.24).

En la Figura 3.21, la Figura 3.22 y la Figura 3.23, se presentan los resultados de las proyecciones para finales del siglo XXI dados por el modelo MIROC5, en cuanto al transporte de agua precipitable y de precipitación, desde cada una de las fuentes de mayor contribución y hacia las tres regiones de interés (NOSA, NAMZ y SAMZ, respectivamente).

El modelo MIROC5 proyecta aumentos en la cantidad de agua precipitable sobre NOSA para finales de siglo, además de aumentos en el transporte atmosférico de esta variable desde la mayoría de sus fuentes, principalmente desde TNA (Figura 3.21a). Dichos resultados coinciden con el consenso entre modelos visto en la Figura 3.17a. Además, las proyecciones de MIROC5 muestran disminución de importancia en la contribución de agua precipitable desde fuentes como TSA (principalmente en JJA y SON) y NAMZ (principalmente en MAM y JJA), además de su reciclaje. Se destaca que, contrariamente a lo que proyectan la mayoría de los modelos, MIROC5 sugiere aumentos de la importancia de contribución de agua precipitable de TNA a NOSA, durante todas las temporadas del año para finales del siglo XXI (comparar Figura 3.17b y Figura 3.21b - TNA). Además, los consensos y las proyecciones de MIROC5 coinciden en una pérdida de importancia del reciclaje de agua precipitable sobre NOSA durante todas las temporadas (comparar Figura 3.17b y Figura 3.21b - NOSA).

El modelo MIROC5 proyecta aumentos en la cantidad de precipitación total sobre NOSA para finales del siglo XXI, durante las temporadas DEF y MAM y disminuciones durante JJA y SON, lo cual coincide con el consenso de los 11 modelos presentado en la Figura 3.17c. Además, las proyecciones de MIROC5 se encuentran de acuerdo con las de la mayoría de modelos aquí estudiados, en cuanto al aumento de la cantidad de precipitación aportada a NOSA por parte de TNA durante las dos primeras temporadas del año (comparar Figura 3.17c y Figura 3.21c - TNA). Se observa que TNA aumentará y TSA disminuirá su importancia como fuentes de humedad hacia NOSA, las cuales son señales de cambio contrarias a las del consenso por parte de los 11 modelos CMIP5 (comparar Figura 3.17d y Figura 3.21d - TNA y TSA). Sin embargo, se resalta que tanto los resultados de MIROC5 como los del consenso de todos los modelos proyectan pérdida de importancia del reciclaje de precipitación de NOSA para finales del siglo XXI, durante todas las temporadas del año (comparar Figura 3.17d y Figura 3.21d - NOSA).

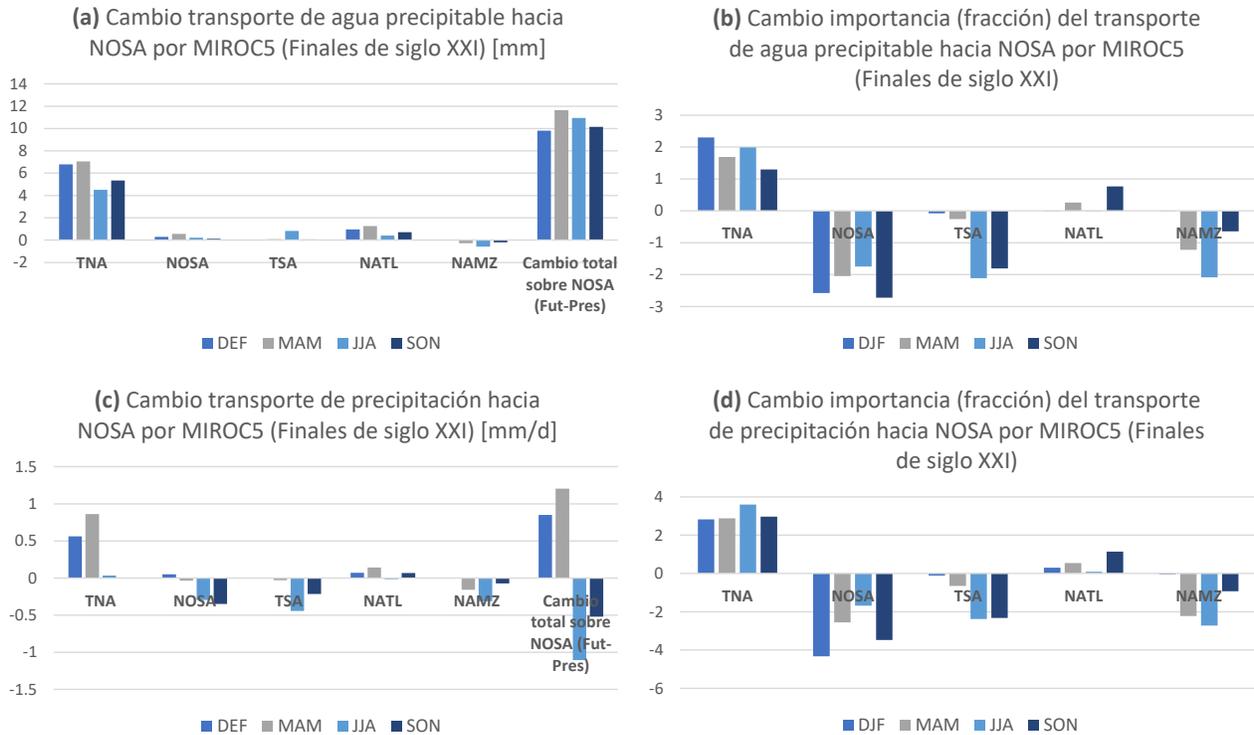


Figura 3.21. Estimados del modelo MIROC5 sobre el cambio proyectado para transporte de humedad hacia NOSA para finales del siglo XXI. (a) Cambio proyectado en la magnitud del transporte de agua precipitable (mm). (b) Cambio proyectado de la importancia de cada región como fuente de agua precipitable (%). (c) Igual que (a) pero para el transporte de precipitación (mm/d). (d) Igual que (b) pero para el transporte de precipitación (%). Cada uno de los grupos de barras corresponde a una fuente de humedad hacia NOSA, las cuales se presentan en orden decreciente de importancia en la contribución de humedad hacia NOSA durante el periodo histórico (Capítulo II). Los colores de las barras representan cada una de las temporadas del año. Las últimas cuatro barras de los paneles (a) y (c) representan el cambio de la variable total ((a) cambio de agua precipitable total y (c) cambio de precipitación total) sobre NOSA para finales del siglo XXI.

La Figura 3.22 presenta los estimados del modelo MIROC5 sobre el cambio proyectado en el transporte de humedad hacia NAMZ para finales del siglo XXI. Tal y como se observa en el consenso para los 11 modelos, MIROC5 sugiere aumento generalizado del agua precipitable total sobre NAMZ durante todas las temporadas del año, además de aumentos en la contribución de la variable desde la mayoría de sus fuentes de importancia, principalmente desde TNA (Figura 3.22a). Se proyectan aumentos de importancia como fuentes de agua precipitable para TNA (DEF, JJA y SON) y TSA (MAM y JJA), pero disminuciones para el reciclaje. Esta reducción de importancia de contribución para el reciclaje de agua precipitable sobre NAMZ también es proyectada por la mayoría de los 11 modelos CMIP5 (comparar Figura 3.22b y Figura 3.18b).

En cuanto a la contribución de precipitación a NAMZ, el modelo MIROC5 proyecta mayores aumentos netos desde TNA (durante todas las temporadas) y desde TSA (durante MAM). Además, al igual que el consenso de los 11 modelos, MIROC5 proyecta incrementos de la precipitación total sobre la región para las temporadas DEF y MAM, y reducciones durante JJA (comparar Figura 3.22c y Figura 3.18c). Finalmente, MIROC5 coincide con el consenso de los 11 modelos en cuanto a la reducción de la importancia de contribución del reciclaje de

precipitación sobre NAMZ durante todas las temporadas del año, y sobre el aumento de esta importancia desde TSA para algunas de las temporadas (comparar Figura 3.22d y Figura 3.18d).

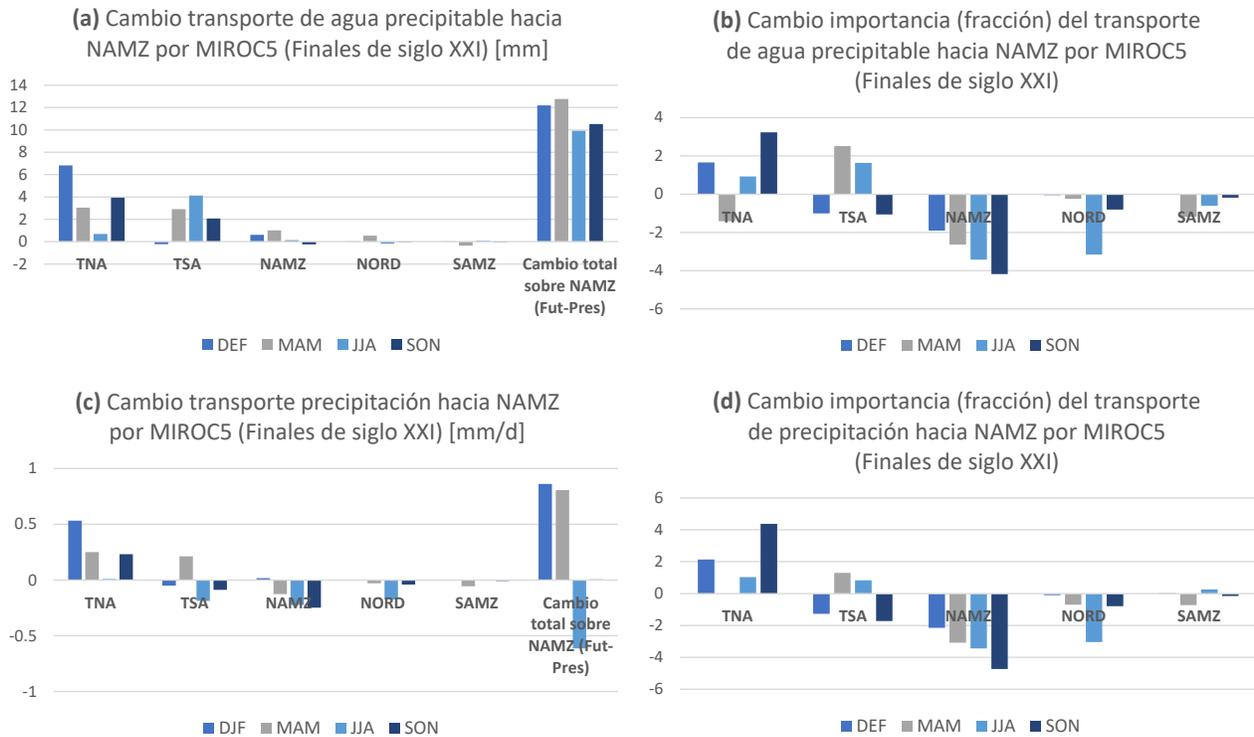


Figura 3.22. Estimados del modelo MIROC5 sobre el cambio proyectado para transporte de humedad hacia NAMZ para finales del siglo XXI. (a) Cambio proyectado en la magnitud del transporte de agua precipitable (mm). (b) Cambio proyectado de la importancia de cada región como fuente de agua precipitable (%). (c) Igual que (a) pero para el transporte de precipitación (mm/d). (d) Igual que (b) pero para el transporte de precipitación (%). Cada uno de los grupos de barras corresponde a una fuente de humedad hacia NAMZ, las cuales se presentan en orden decreciente de importancia en la contribución de humedad hacia NAMZ durante el periodo histórico (Capítulo II). Los colores de las barras representan cada una de las temporadas del año. Las últimas cuatro barras de los paneles (a) y (c) representan el cambio de la variable total ((a) cambio de agua precipitable total y (c) cambio de precipitación total) sobre NAMZ para finales del siglo XXI.

En la Figura 3.23 se presentan los estimados de MIROC5 sobre el cambio proyectado del transporte de humedad hacia SAMZ para finales del siglo XXI. Dicho modelo proyecta aumentos generalizados en la cantidad de agua precipitable total sobre SAMZ durante las cuatro temporadas del año (Figura 3.23a), coincidiendo con el análisis de consensos (Figura 3.19a). Según este modelo de circulación general, los aumentos en el agua precipitable total sobre SAMZ se deberán al aumento de transporte de esta variable desde algunas de sus fuentes de mayor contribución, pero especialmente desde TSA, lo cual también coincide con el análisis de consensos (comparar Figura 3.23a y Figura 3.19a). El modelo MIROC5 proyecta para finales del siglo XXI una reducción de importancia en la contribución del reciclaje de agua precipitable sobre SAMZ, pero un aumento de importancia desde TSA, resultados que coinciden con el análisis de consensos para los 11 modelos CMIP5 (comparar Figura 3.23b y Figura 3.19b).

Finalmente, las proyecciones para finales del siglo XXI del modelo MIROC5 sugieren pérdida de importancia del reciclaje de precipitación sobre SAMZ, pero aumentos en la importancia de contribución a su precipitación desde la fuente oceánica TSA, resultados que también fueron encontrados en el análisis de consensos de la sección anterior (comparar Figura 3.23d y Figura 3.19d).

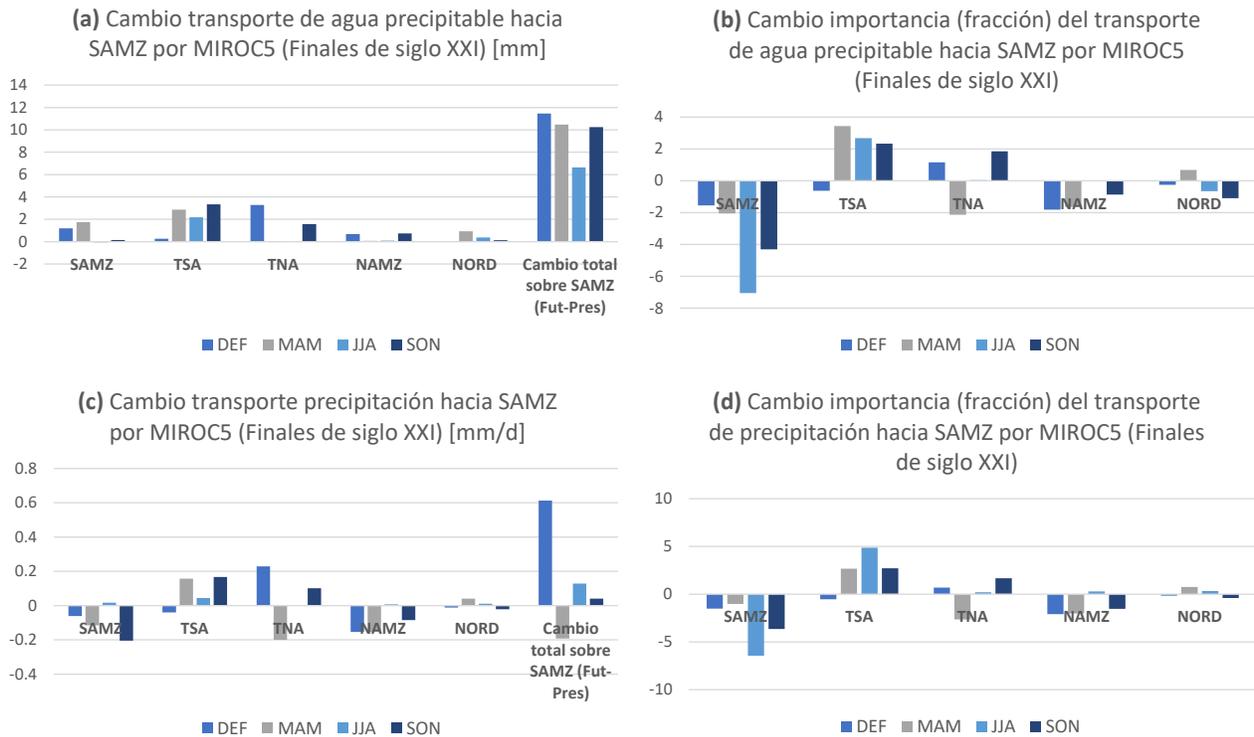


Figura 3.23. Estimados del modelo MIROC5 sobre el cambio proyectado para transporte de humedad hacia SAMZ para finales del siglo XXI. (a) Cambio proyectado en la magnitud del transporte de agua precipitable (mm). (b) Cambio proyectado de la importancia de cada región como fuente de agua precipitable (%). (c) Igual que (a) pero para el transporte de precipitación (mm/d). (d) Igual que (b) pero para el transporte de precipitación (%). Cada uno de los grupos de barras corresponde a una fuente de humedad hacia SAMZ, las cuales se presentan en orden decreciente de importancia en la contribución de humedad hacia SAMZ durante el periodo histórico (Capítulo II). Los colores de las barras representan cada una de las temporadas del año. Las últimas cuatro barras de los paneles (a) y (c) representan el cambio de la variable total ((a) cambio de agua precipitable total y (c) cambio de precipitación total) sobre SAMZ para finales del siglo XXI.

En el Apéndice B se pueden observar las proyecciones de cambio para el transporte de humedad hacia las tres regiones de interés para finales del siglo XXI por los modelos MRI-CGCM3 (Figura B-1 (NOSA), Figura B-2 (NAMZ), Figura B-3 (SAMZ)) y GFDL-ESM2G (Figura B-4 (NOSA), Figura B-5 (NAMZ), Figura B-6 (SAMZ)). Estos dos modelos se seleccionaron y se agregaron a este análisis debido a que fueron identificados con inconvenientes en algunos de los aspectos analizados a lo largo del presente estudio. Recordemos que MRI-CGCM3 fue seleccionado en el Capítulo I como uno de los modelos con una de las peores representaciones de la variable P-E, según los diagramas de Taylor (Figura 1.14). Por su parte, GFDL-ESM2G fue identificado en el Capítulo II como uno de los modelos que presentan mayores inconvenientes en la representación de la estacionalidad del ciclo anual del

transporte de humedad hacia las tres regiones de interés, respecto a ERA5 (Figura 2.23 y Figura 2.24). De esta manera y teniendo en cuenta que MIROC5 es identificado en este trabajo como el mejor modelo para representar el transporte de humedad atmosférica en la región, y que MRI-CGCM3 y GFDL-ESM2G son modelos con mayores dificultades, se pretende mostrar un contraste entre sus proyecciones para finales del siglo XXI.

En particular, los tres modelos proyectan reducción de la importancia de contribución del reciclaje de humedad en NOSA, tanto para el agua precipitable como para la precipitación, durante todas las temporadas del año (Figura 3.21, Figura B-1 y Figura B-4). Sin embargo, los resultados dados para el cambio de importancia desde TNA difieren entre MIROC5 y los modelos MRI-CGCM3 y GFDL-ESM2G, ya que mientras el primero sugiere que para finales del siglo XXI su importancia de contribución a NOSA aumentará, tanto para el transporte de agua precipitable como para el de precipitación (Figura 3.21 b y d), los otros dos modelos sugieren pérdida en ambas importancias (Figura B-1 b y d (MRI-GCCM3) y Figura B-4 b y d (GFDL-ESM2G)).

Por su parte, las proyecciones para NAMZ dadas por los tres modelos sugieren, en general, pérdida de la importancia de contribución del reciclaje de humedad, tanto para el agua precipitable como para la precipitación, a excepción de la temporada JJA para el modelo MRI-CGCM3 (ver Figura B-2 b y d). Al igual que para el caso de NOSA, los resultados dados para el cambio de importancia desde TNA difieren entre MIROC5 y los otros dos modelos, ya que mientras el primero sugiere que para finales del siglo XXI su importancia de contribución a NAMZ aumentará, tanto para el transporte de agua precipitable como para el de precipitación durante DEF, JJA y SON (Figura 3.22 b y d), los otros dos modelos proyectan disminución en ambas importancias (para MRI-CGCM3 durante DEF, MAM y JJA y para GFDL-ESM2G durante todas las temporadas) (Figura B-2 b y d (MRI-GCCM3) y Figura B-5 b y d (GFDL-ESM2G)).

Las proyecciones para SAMZ dadas por los tres modelos también sugieren reducciones en la importancia de contribución del reciclaje de agua precipitable y de precipitación, a excepción de la temporada JJA para MRI-CGCM3 (ver Figura B-3 b y d). En este caso, los tres modelos coinciden en el aumento de importancia de contribución de agua precipitable y de precipitación desde TSA a SAMZ, para la mayoría de las temporadas del año (ver Figura 3.23b y d, Figura B-3 b y d, Figura B-6 b y d).

Finalmente, se concluye de manera general, que las mayores diferencias entre las proyecciones del modelo con la mejor representación del transporte en la región (MIROC5) y las de los dos modelos con mayores sesgos (MRI-CGCM3 y GFDL-ESM2G) están dadas, principalmente, en el transporte de humedad desde TNA, ya que en la mayoría de los casos no existe acuerdo en la señal de cambio proyectada por estos para finales del siglo XXI. Sin embargo, se destaca que tanto MIROC5 como MRI-CGCM3 y GFDL-ESM2, sugieren señales de cambio similares en cuanto a la pérdida de importancia de la contribución del reciclaje de humedad, tanto de agua precipitable como de precipitación, sobre las tres regiones de interés (NOSA, NAMZ y SAMZ). Además, de que los tres modelos proyectan aumentos del agua precipitable total sobre ellas para finales del siglo XXI.

3.3. Discusión y conclusiones

En este capítulo se analizaron las proyecciones de transporte de humedad sobre la región de estudio para finales del siglo XXI, bajo el escenario RCP8.5. En particular, se analizaron los consensos entre modelos para las proyecciones de tres de las regiones continentales de mayor relevancia en el área de interés (norte de Suramérica, norte del Amazonas y sur del Amazonas). El transporte de humedad se estimó mediante el modelo analítico semi-lagrangiano DRM, desarrollado por Domínguez et al. (2006) y modificado por Martínez & Domínguez (2014), considerando las proyecciones presentadas por 11 modelos CMIP5 para finales de siglo (2070-2100) (Capítulo I).

Muchos estudios han identificado que una de las principales consecuencias del cambio climático es la intensificación del ciclo hidrológico (Allan & Soden, 2008; Held & Soden, 2006; O’Gorman & Schneider, 2009), ocasionando una posible modificación en el comportamiento y movimiento del agua a través de la atmósfera. Actualmente, tenemos la posibilidad de acceder a proyecciones de diferentes variables climáticas obtenidas mediante simulaciones con modelos de circulación general, las cuales pueden dar una pista de cómo el ciclo hidrológico, y en general, el sistema climático terrestre, se podría comportar a futuro bajo diferentes escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero (Palomino-Lemus et al., 2017; Samanta et al., 2019; Zubler et al., 2016). Así, en esta sección presentamos una discusión y las principales conclusiones sobre las proyecciones obtenidas para transporte de agua precipitable y el transporte de precipitación hacia NOSA, NAMZ y SAMZ, para finales del siglo XXI.

Uno de los resultados más destacados en las proyecciones de transporte de humedad es la reducción de la cantidad y de la importancia del reciclaje de precipitación sobre las tres regiones de interés para la mayoría de los modelos CMIP5 analizados. Esta reducción de cantidad y de importancia de reciclaje de precipitación sobre dichas regiones se proyecta, sin excepción, para todas las temporadas del año.

Si comparamos el reciclaje de precipitación con el reciclaje de agua precipitable sobre cada una de las tres regiones de interés, se tiene que:

1. Para el caso de NOSA, mientras se proyectan aumentos de reciclaje de agua precipitable durante todas las temporadas para finales del siglo XXI, para el reciclaje de precipitación se proyectan disminuciones, también para todas las temporadas. Los consensos de reducción mayores al 70% se tienen para las temporadas MAM, JJA y SON. Lo anterior sugiere que, aunque se proyecta mayor cantidad de agua precipitable en la atmósfera proveniente del reciclaje de NOSA para finales del siglo XXI, esta no representará mayor precipitación sobre la región (ver Figura 3.17).
2. Para el caso de NAMZ sucede algo similar que para NOSA, ya que se proyecta que su reciclaje de agua precipitable aumentará para todas las temporadas (con acuerdo entre modelos CMIP5 mayor al 70%, para DEF y MAM), pero que por el contrario, el reciclaje de precipitación disminuirá durante todas las temporadas (con acuerdos entre modelos superiores al 70% para MAM, JJA y SON; ver Figura 3.18).
3. Finalmente, para el caso de SAMZ se proyecta un aumento de reciclaje de agua precipitable durante DEF y MAM y una disminución durante JJA y SON. Sin embargo, para el reciclaje de precipitación se proyecta

disminución durante todas las temporadas, con consensos entre modelos superiores al 70% en todos los casos. Lo anterior sugiere, de nuevo, que aunque para las temporadas DEF y MAM se proyecta mayores cantidades de agua precipitable reciclada, esta no se asocia a mayor precipitación sobre SAMZ. Es interesante este aporte en cuanto al cambio en el reciclaje de humedad sobre el Amazonas para finales del siglo XXI, ya que las reducciones más marcadas, tanto de reciclaje de agua precipitable (al igual que en otras temporadas) como de reciclaje de precipitación (a diferencia de otras temporadas y regiones), se sugieren justo para las épocas seca (JJA) y de transición a lluvias (SON) de esta región selvática (ver Figura 3.19).

Estos resultados ponen en evidencia que el reciclaje de precipitación, siendo una fuente importante de humedad para estas tres regiones, podría disminuir para finales del siglo XXI, según las proyecciones analizadas, lo cual es relevante en todos los casos, pero en especial sobre la cuenca del Amazonas. Nuestros análisis son consistentes con estudios que se han realizado en los últimos años respecto a las tendencias climáticas sobre esta cuenca. Con el 40% del área de bosque tropical global (Aragão et al., 2014; Laurance et al., 2001; Marengo et al., 2018; Carlos A. Nobre et al., 2016; Weng et al., 2018), la cuenca del Amazonas cumple un rol fundamental en el sistema climático terrestre, por medio de su reciclaje de humedad local y de la contribución a la circulación atmosférica regional y global (Marengo et al., 2018; Nobre et al., 2009). Diversos estudios han evidenciado que la temporada seca del sur del Amazonas ha venido alargándose desde mediados de la década los 70's (Agudelo et al., 2019; Fu et al., 2013; Longo et al., 2018; Malhi et al., 2008), aumentando su duración en cerca de un mes durante este periodo (Marengo et al., 2018). La disminución de la cobertura boscosa sobre la región parece ser una de las causas del alargamiento, generando reducciones en sus tasas de reciclaje de humedad (Agudelo et al., 2019; Alves et al., 2017; Costa & Pires, 2010; Ruiz-Vásquez et al., 2020). La pérdida acelerada de la cobertura boscosa del Amazonas debido a cambios en el uso del suelo genera, entre muchas otras consecuencias, la reducción del reciclaje de humedad y de aporte a nivel regional y global al ciclo hidrológico (Ruiz-Vásquez et al., 2020). Nuestros resultados indican que justo para dichas temporadas del año (JJA: temporada seca y SON: temporada de transición a las lluvias) los consensos entre los modelos CMIP5 aquí analizados son los más elevados, proyectando las mayores reducciones de la cantidad de reciclaje sobre el sur del Amazonas para finales del siglo XXI. Lo anterior sugiere que si las tendencias de cambio climático se siguen dando como hasta al momento, y teniendo en cuenta que el escenario RCP8.5 aquí analizado es el más probable y el que está siguiendo con mayor fidelidad las tendencias de emisiones de GEI actuales (Schwalm et al., 2020), es posible que la temporada seca sobre el sur del Amazonas continúe presentando una mayor duración. En este sentido, estudios de proyecciones hidrológicas sobre el sur del Amazonas, como el desarrollado por Boisier et al. (2015), concluyen que, según las tendencias de precipitación actuales sobre la región, se espera un alargamiento mayor de la temporada seca sobre la región para finales del siglo XXI (Boisier et al., 2015).

Además de los resultados obtenidos en cuanto a la reducción del reciclaje de precipitación sobre las tres regiones de interés para finales del siglo XXI, también se resaltan las proyecciones del aumento de importancia del océano Atlántico Tropical Sur (TSA) como fuente de humedad para toda la región, durante 2070-2100. De acuerdo con nuestros resultados de consenso entre modelos CMIP5, el aumento de la importancia de TSA como fuente de humedad para NOSA se proyecta para las temporadas MAM, JJA y SON; para NAMZ se proyecta durante las temporadas DEF, MAM y JJA; y para SAMZ se proyecta para la totalidad de temporadas del año. Esta ganancia de importancia en el transporte de precipitación desde TSA se evidencia más claramente para las regiones NOSA y NAMZ, para las que la clasificación general multianual de contribuyentes de humedad proyectada para finales del

siglo XXI, sugiere que aumentará su importancia en contribución para ambas regiones: para NOSA pasará a ser la segunda fuente de precipitación más importante, desplazando al reciclaje de NOSA al tercer lugar; para NAMZ también pasará a ser la segunda fuente de precipitación más importante, desplazando el reciclaje de NAMZ al tercer lugar. Es de aclarar que dichos cambios de importancia no se reflejan en los mapas de la Figura 3.20 debido a que los datos que allí se presentan corresponden al cambio de importancia durante la temporada específica; en contraste, el total de la contribución multianual para finales del siglo XXI sí refleja dichos cambios de importancia (ver Apéndice A).

Estas proyecciones de aumento de importancia en la contribución de precipitación desde la fuente oceánica TSA hacia las tres regiones consideradas, podrían tener relación con la expansión de la celda de Hadley observada durante las últimas décadas, y que ha generado un desplazamiento hacia los polos de sus ramas subsidentes y, por tanto, de las regiones secas subtropicales, ampliando la zona de movimiento ascendente en las regiones tropicales donde ocurre convección profunda (Birner et al., 2014; Davis & Rosenlof, 2012; Grise et al., 2019; Seidel & Randel, 2007; Staten et al., 2018), pudiendo generar de esta manera un fortalecimiento del transporte de humedad desde regiones oceánicas con comportamientos más subtropicales durante el periodo histórico, en comparación con lo proyectado para finales del siglo XXI. Aunque las causas exactas de esta expansión aún están en discusión, ya que incluso pueden cambiar dependiendo del hemisferio (Grise et al., 2019), existe consenso en que se viene observando desde 1979, aproximadamente (Grise et al., 2019; Y Hu & Fu, 2007), de acuerdo con estudios observacionales y de análisis de simulaciones mediante modelos climáticos, aunque existen discrepancias en cuanto a qué tanto se ha expandido esta celda (Grise et al., 2019). Schwendike et al. (2015) estudiaron las circulaciones de Hadley y Walker entre los años 1979 y 2009, concluyendo que sobre América y el Atlántico, la circulación de Hadley se ha expandido en aproximadamente 1% y 5% a lo largo de los 31 años analizados (Schwendike et al., 2015). Las causas de esta expansión, además del debilitamiento de la celda de Hadley, se pueden clasificar dentro de dos grandes grupos: variabilidad natural, por medio de fenómenos como el ENSO (Nguyen et al., 2013), y forzamiento antropogénico (aumento de GEI) (Grise et al., 2019; Lu et al., 2007; Nguyen et al., 2013, 2015; Shaw & Tan, 2018). Tanto los reanálisis (D'Agostino & Lionello, 2017; Nguyen et al., 2013; Seidel & Randel, 2007) como los modelos climáticos globales (Yongyun Hu et al., 2013; Previdi & Liepert, 2007; Sobel & Camargo, 2011; Vallis et al., 2015) detectan dicha expansión (Grise et al., 2019). Estudios específicos, en los cuales se utilizan reanálisis y modelos climáticos CMIP5, revelan una expansión estadísticamente significativa de la celda de Hadley forzada por el calentamiento global (Nguyen et al., 2015). Se han notado, además, cambios tanto en la fuerza como en la posición de las corrientes subtropicales de chorro y los ciclones tropicales, específicamente hacia los polos (Archer & Caldeira, 2008; Studholme & Gulev, 2018), lo cual podría tener una relación directa con esta expansión, ya que existen evidencias de que las latitudes de estos chorros y el borde de la celda de Hadley están fuertemente correlacionados (Davis & Rosenlof, 2012; Kang & Polvani, 2011). Las proyecciones de los modelos de circulación general, tanto en CMIP3 (Previdi & Liepert, 2007; Sobel & Camargo, 2011) como en CMIP5 (Yongyun Hu et al., 2013; Vallis et al., 2015), apuntan a que esta expansión se seguirá evidenciando en respuesta al forzamiento radiativo y a los incrementos en la concentración de GEI en la atmósfera para finales de siglo (Yongyun Hu et al., 2013; Previdi & Liepert, 2007; Sobel & Camargo, 2011) y que, además, los cambios a futuro en el ciclo hidrológico estarán fuertemente influenciados por la dinámica atmosférica que está siendo modificada por esta expansión tropical (Previdi & Liepert, 2007). Teniendo en cuenta estos cambios en la circulación de la celda de Hadley, las proyecciones dadas por los modelos de circulación general y que existe una influencia directa de las interacciones atmósfera-océano en el

comportamiento del clima y de su variabilidad (Previdi & Liepert, 2007; Vizzy & Cook, 2016), se puede pensar que las proyecciones aquí reportadas de un aumento de contribución de precipitación desde TSA hacia las tres regiones de interés, están probablemente asociadas a la expansión hacia los polos de la región tropical y de la capacidad que poseen los modelos climáticos para detectarla y proyectarla. Sin embargo, es necesario seguir avanzando en la comprensión de la variabilidad climática regional, del fenómeno de expansión sobre la franja tropical en el presente y el futuro, y de qué influencia puede tener este sobre el transporte de humedad atmosférica desde regiones oceánicas hacia masas continentales tropicales, como es el caso del norte de Suramérica y la cuenca del Amazonas.

Capítulo IV

Discusión y conclusiones generales

Los modelos climáticos son una de las mejores herramientas disponibles en la actualidad para el análisis y el estudio del cambio climático y sus efectos sobre el clima global actual y futuro (Palomino-Lemus et al., 2017; Samanta et al., 2019). Este Trabajo de Investigación hace uso de estas herramientas para analizar el transporte de humedad atmosférica sobre tres zonas estratégicas en Suramérica: norte de Suramérica, norte del Amazonas y sur del Amazonas. En particular, este trabajo analiza posibles cambios en el transporte de humedad atmosférica sobre la región para finales del siglo XXI bajo un escenario extremo de emisiones de GEI. Los estimados de transporte de humedad atmosférica se obtuvieron a partir de simulaciones históricas y proyecciones bajo el escenario RCP8.5 de 11 modelos de circulación general incluidos en el proyecto CMIP5, y a través de la implementación del modelo analítico semi-lagrangiano DRM. Para esta evaluación, se consideró el análisis de: (i) las variables de entrada al modelo DRM (Capítulo I), (ii) los estimados de transporte de humedad atmosférica durante el periodo histórico (1980-2005) (Capítulo II) y (iii) los estimados proyectados de transporte de humedad para finales del siglo XXI (2070-2100) bajo el escenario RCP8.5 (Capítulo III).

Nuestros análisis de cómo los modelos CMIP5 simulan las variables de entrada a DRM (precipitación, evaporación, agua precipitable y P-E - Capítulo I) durante el periodo histórico (1980-2005) confirman la existencia de sesgos en los modelos considerados, en cuanto a su representación de estas variables sobre el dominio de estudio (ver por ejemplo Figura 1.8). En particular, nuestros resultados confirman que los modelos CMIP5 continúan presentando sesgos sistemáticos como la simulación de una doble ZCIT (Figura 1.1), especialmente durante las temporadas DEF y MAM, lo cual también coincide con análisis presentados por otros estudios (Ortega & Arias, 2018; Rincón et al., 2018; Sierra et al., 2015). La evaporación también exhibe sesgos en las simulaciones de los modelos considerados, especialmente sobre las masas continentales (Figura 1.8). Los sesgos identificados en evaporación continental podrían estar relacionados con las parametrizaciones de las interacciones suelo-atmósfera incorporadas en los modelos climáticos de escala global (Dirmeyer et al., 2013b, 2013a; Koster et al., 2002; Lorenz et al., 2016). En particular, ha sido previamente documentado que el cálculo y la simulación de la evaporación presenta grandes retos, a lo que se suma la escasez de observaciones de esta variable sobre nuestra región (Sörensson & Ruscica, 2018). Es por esto que la estimación y simulación de la evaporación en zonas boscosas, como el Amazonas, representa grandes retos. Además, dado que los mecanismos que controlan la evaporación durante la temporada seca del Amazonas no son bien conocidos aún, los productos como modelos o reanálisis producen resultados diferentes sobre la región (Sörensson & Ruscica, 2018). Por su parte, el agua precipitable es la variable mejor representada por los modelos considerados (Figura 1.12), aunque presenta subestimaciones marcadas sobre las regiones continentales (Figura 1.11). Los análisis presentados en el Capítulo I muestran que los modelos con una mejor representación de las diferentes variables de entrada al DRM para el clima presente corresponden a la familia MIROC (MIROC-ESM, MIROC-ESM-CHEM y MIROC5), especialmente para el dominio oceánico, durante las temporadas DEF y MAM. En especial, el modelo MIROC5 ha sido identificado en estudios anteriores por su buen desempeño sobre la región (Bonilla-Ovallos & Mesa Sánchez, 2017; Ortega et al., 2020; Ortega & Arias, 2018; Palomino-Lemus et al., 2015; Rincón et al., 2018; Sierra et al., 2018).

Por otro lado, los análisis de las proyecciones de las variables de entrada a DRM presentados en el Capítulo I coinciden con lo reportado en estudios anteriores, principalmente sobre la región Amazónica, en los cuales se sugieren reducciones de precipitación para finales del siglo XXI, especialmente durante las estaciones seca y de transición a las lluvias (JJA y SON, respectivamente). Aunque para las otras regiones se presentan, en general, desacuerdos sobre los cambios proyectados (Reyer et al., 2017), los modelos aquí analizados exhiben consensos altos en cuanto a sus proyecciones de disminución de precipitación sobre el sur del Amazonas durante JJA y SON, con reducciones del 32% y 19% con respecto al periodo histórico, respectivamente, para el periodo 2070-2100 (Figura 1.18). Para las proyecciones de evaporación, se tiene un alto consenso entre modelos en cuanto al aumento generalizado sobre los océanos (Figura 1.18), lo cual también ha sido reportado en otros estudios (Levang & Schmitt, 2015). Lo anterior está asociado al aumento de vapor de agua en un mundo más cálido, que permite mayores tasas de evaporación y mayor capacidad de la atmósfera para retener humedad, respondiendo directamente a la relación de Clausius-Clapeyron (Trenberth, 2011). La evaporación es un componente clave del ciclo hidrológico y energético, ya que es un indicador fundamental de la aceleración del ciclo del agua debido al aumento de las concentraciones atmosféricas de GEI y de las temperaturas sobre el globo (Eicker et al., 2016; Huntington, 2006; Wild et al., 2008; Zhang et al., 2017). Sin embargo, esta variable es mucho más compleja sobre las masas continentales, ya que, debido a que la superficie modula su comportamiento y a que existe un vínculo ecohidrológico entre esta y el suelo, cambios en la cobertura producen variaciones importantes en el acoplamiento entre la atmósfera y la superficie (Zhang et al., 2017; Zhou et al., 2016), generando retos y dificultades en su observación y modelación (Lainé et al., 2014). A pesar de lo anterior, nuestros resultados exhiben consensos altos en cuanto a las proyecciones de disminución de evaporación sobre el sur del Amazonas durante las temporadas JJA y SON para finales de siglo, como también se proyecta para la precipitación (Figura 1.18). Con respecto al agua precipitable, las proyecciones de los modelos considerados en este trabajo muestran altos porcentajes de acuerdo respecto a un aumento de la variable sobre la totalidad de regiones del dominio de estudio para finales del siglo XXI.

A partir de las variables mencionadas anteriormente fue posible estimar el transporte de humedad atmosférica mediante el modelo DRM. En particular, este trabajo evaluó las simulaciones históricas de los modelos CMIP5 considerados para transporte de agua precipitable y transporte de precipitación (Capítulo II), así como los cambios proyectados en este transporte para finales del siglo XXI (2070-2100), bajo un escenario extremo de emisiones de GEI -RCP8.5- (Capítulo III). Cuando hablamos de transporte de humedad atmosférica, nos referimos a una componente compleja del sistema climático terrestre, específicamente, al ciclo del agua (Levang & Schmitt, 2015). Las conexiones entre evaporación y precipitación afectan el clima alrededor del globo, al distribuir el agua y el calor latente (Tuinenburg et al., 2020). La mayor parte del agua se evapora y precipita sobre las masas oceánicas (Durack, 2015; Schanze et al., 2010; Trenberth et al., 2007, 2011), sin embargo, una proporción de esta humedad es transportada por medio de los vientos hacia el interior de los continentes (Gimeno et al., 2012; Trenberth et al., 2007). Zonas estratégicas como las áreas boscosas también desempeñan un papel fundamental como fuentes de humedad atmosférica. Tal es el caso de la selva Amazónica (Arraut et al., 2012; A. Drumond et al., 2014; IPCC, 2013; Marengo et al., 2004; Nobre et al., 2016; Sampaio et al., 2018; Spracklen & Garcia-Carreras, 2015; Zemp et al., 2014), la cual es aportante de humedad y reguladora del clima a nivel local, regional y global (Aragão et al., 2014; IPCC, 2013; Nobre, 2014; Weng et al., 2018). Por tal razón, nuestro análisis se enfocó en el transporte de humedad atmosférica hacia el norte de Suramérica, el norte del Amazonas y el sur del Amazonas.

Los análisis presentados en el Capítulo II sugieren que, en general, los modelos CMIP5 considerados identifican las principales fuentes de humedad atmosférica para las tres regiones continentales de interés, así como la estacionalidad observada en estas contribuciones, según lo identificado por el reanálisis ERA5 y por estudios anteriores (Arias, Martínez, et al., 2015; Hoyos et al., 2018; Poveda et al., 2014; Sakamoto et al., 2011). Nuevamente, el modelo MIROC5 se destaca, presentando las mejores simulaciones históricas de transporte de agua precipitable y de transporte de precipitación, lo que sugiere que una mejor simulación de las variables de entrada a DRM se relaciona con una mejor simulación del transporte de humedad atmosférica (Figura 2.23 y Figura 2.24). Además de lo anterior y realizando un análisis más detallado entre los ciclos anuales estimados desde las regiones oceánicas y desde las regiones continentales, se encuentra que para las regiones Amazónicas (NAMZ y SAMZ) existen sesgos importantes por parte de los modelos en la representación de la estacionalidad del transporte de agua precipitable desde de sus principales fuentes (Figura 2.24), y que este tiene que ver, casi exclusivamente, con los inconvenientes que existen en la estimación del reciclaje de agua precipitable sobre ellas (Figura 2.6 y Figura 2.10). En general, se tienen mayores sesgos en los estimados de transporte de humedad sobre las regiones continentales que en el transporte atmosférico desde el océano, lo cual tiene una relación directa con la dificultad que poseen los modelos CMIP5 en la simulación de la evaporación sobre las masas continentales, evidenciada en el Capítulo I (Figura 1.7).

En cuanto a las proyecciones de transporte de humedad para finales del siglo XXI (Capítulo III), nuestros análisis sugieren aumentos de vapor de agua que es transportado desde los océanos, lo cual es consistente con las proyecciones de aumento de evaporación desde las masas oceánicas (Capítulo I). Realizando una comparación entre las proyecciones para finales del siglo XXI del transporte de humedad desde el enfoque utilizado en el Capítulo I (Eureliano: P-E) y el enfoque utilizado en el Capítulo III (Lagrangiano: DRM), se llega a la conclusión de que para algunos casos específicos, como para TSA, los resultados son consistentes. Así, en el Capítulo I se identifican proyecciones de aumentos de la capacidad como fuente de la región oceánica TSA durante todas las temporadas del año (Figura 1.18), mientras que los resultados del Capítulo III sugieren aumentos en su contribución de precipitación hacia las tres regiones de interés (ver Figura 3.17, Figura 3.18 y Figura 3.19). Es decir, el aumento de la capacidad como fuente de TSA para finales del siglo XXI detectado en el análisis Eureliano del Capítulo I, se ve reflejado en el aumento de su contribución a la precipitación, sugerido por el enfoque Lagrangiano del Capítulo III, hacia las tres regiones de interés (NOSA, NAMZ y SAMZ). No obstante, se resalta que no todas las proyecciones de aumento de capacidad como fuente de humedad concluidas en el Capítulo I para algunas regiones, proyectan un aumento en la contribución o importancia hacia las tres regiones continentales de interés para finales de siglo. Tal es el caso de la fuente oceánica TNA, la cual, según el análisis Eureliano del Capítulo I, aumentará su capacidad como fuente durante las temporadas DEF y SON para finales del siglo XXI (Figura 1.18); sin embargo, el consenso de modelos sugiere que esto no se verá reflejado en su contribución de precipitación hacia las regiones aquí estudiadas, desde el enfoque Lagrangiano (ver Figura 3.17, Figura 3.18 y Figura 3.19). Lo anterior puede deberse a que el aumento de su capacidad como fuente proyectado durante estas temporadas podría favorecer el transporte hacia otras regiones, o que a pesar de tener una mayor humedad disponible en la atmósfera desde dicha fuente oceánica, esta no se precipitará.

A pesar de lo expuesto previamente, es interesante ver que, pese a una mayor disponibilidad de agua precipitable proveniente de los océanos para finales del siglo XXI, no necesariamente se proyecta más vapor de agua disponible para la precipitación desde la evaporación terrestre. Específicamente, nuestros resultados proyectan

una disminución generalizada del reciclaje de precipitación sobre las tres regiones aquí estudiadas (Figura 3.17 (NOSA), Figura 3.18 (NAMZ), Figura 3.19 (SAMZ)). Para el caso de SAMZ se puede notar que dichos cambios en el reciclaje de precipitación poseen una relación directa con las proyecciones de evaporación sobre la cuenca durante las temporadas JJA y SON, en las cuales se presentan los mayores consensos entre modelos en cuanto a una reducción de reciclaje de precipitación sobre la región, con respecto al periodo histórico (Figura 3.19c).

En la literatura, son escasos los estudios que se enfocan en las proyecciones del transporte y el reciclaje de humedad atmosférica. Lavers et al. (2013), Laîné et al. (2014), Warner et al. (2015), y Lavers et al. (2015) son algunos de los pocos trabajos que han investigado el comportamiento del transporte de humedad atmosférica bajo escenarios de cambio climático. En general, los resultados de dichos estudios sugieren que los cambios de transporte a futuro obedecerán, principalmente, a la respuesta del forzamiento radiativo generado por los GEI. Tanto estudios locales y regionales (Lavers et al., 2013; Warner et al., 2015) como globales (Laîné et al., 2014; Lavers et al., 2015), proyectan aumentos del transporte de humedad atmosférica bajo forzamientos de cambio climático, principalmente como consecuencia del aumento del nivel de saturación de la atmósfera en un mundo más cálido. Además, según Laîné et al. (2014), se proyecta un aumento de reciclaje de humedad local en la mayoría de las regiones continentales subtropicales y de latitudes medias, pero una disminución sobre las regiones más ecuatoriales (Laîné et al., 2014), coincidiendo con los resultados de nuestra investigación.

Algunos estudios indican que los cambios proyectados sobre la mayoría de los océanos en cuanto al aumento de humedad atmosférica responden directamente al efecto del calentamiento de la atmósfera (Clausius-Clapeyron), mientras que para las regiones continentales, los cambios de la humedad relativa de la atmósfera no impulsan los cambios en evaporación de forma directa, sino que estos ocurren sobre la humedad del suelo, generando una retroalimentación negativa sobre los procesos de evaporación (Laîné et al., 2014). Es decir, que aunque una superficie terrestre más seca actúa para reducir la humedad relativa del aire en muchas de las regiones continentales, favoreciendo procesos de evaporación, no se puede dejar de lado la posibilidad de una compensación en el intercambio de humedad relacionada con una menor disponibilidad de humedad en el suelo (Laîné et al., 2014). Así, el aumento de las temperaturas globales puede inducir la presencia de suelos más secos, y a su vez esto puede generar retroalimentaciones negativas en las tasas de evaporación, lo que se relaciona directamente con las proyecciones de reducción de reciclaje de precipitación sobre las regiones continentales aquí encontradas (Figura 3.17, Figura 3.18 y Figura 3.19).

Así, las proyecciones de transporte y reciclaje de humedad para finales del siglo XXI (2070-2100) identificadas en este trabajo se pueden resumir en términos de: (i) reducciones de reciclaje de precipitación sobre las tres regiones continentales de interés (NOSA, NAMZ, SAMZ), relacionadas directamente con el forzamiento radiativo generado por el cambio climático y a los cambios y retroalimentaciones negativas de la evaporación sobre las regiones continentales; y (ii) aumentos de aporte de humedad desde las regiones oceánicas Atlánticas hacia NOSA, NAMZ y SAMZ, especialmente desde TSA, lo cual se relaciona con un mundo más cálido con mayores tasas de evaporación oceánica y mayor capacidad de la atmósfera para almacenar vapor de agua, lo que promueve una intensificación del ciclo hidrológico favoreciendo un mayor transporte de humedad desde las zonas oceánicas hacia otras regiones. Además, nuestros resultados sugieren que las proyecciones de fortalecimiento del transporte de humedad atmosférica desde TSA también podrían tener relación con la expansión de la celda de Hadley, detectada desde 1979 (Grise et al., 2019; Y Hu & Fu, 2007) por observaciones, reanálisis y modelos (D'Agostino & Lionello, 2017; Grise et al., 2019; Nguyen et al., 2013; Seidel & Randel, 2007); además de ser

proyectada por estos últimos en cuanto a que su ensanchamiento se observará a lo largo de todo el siglo XXI, con diferencias entre modelos (Yongyun Hu et al., 2013; Previdi & Liepert, 2007; Sobel & Camargo, 2011; Vallis et al., 2015). Dicho fenómeno se caracteriza por una ampliación de la región de ascenso de masas atmosféricas en las regiones de convección profunda en los trópicos, logrando fortalecer así el transporte de humedad desde zonas oceánicas que antes eran más subtropicales (Birner et al., 2014; Davis & Rosenlof, 2012; Grise et al., 2019; Staten et al., 2018). Sin embargo, es necesario seguir avanzando en la comprensión de este fenómeno y de sus posibles consecuencias a futuro sobre la circulación atmosférica de las regiones tropicales y subtropicales.

Las diferencias entre los consensos para el transporte de agua precipitable y de precipitación pueden tener varias explicaciones. Una de ellas son los mecanismos que controlan los cambios debidos al aumento de las temperaturas en ambas variables. Se debe tener claro que el aumento de agua precipitable en la atmósfera depende directamente de la relación de Clausius Clapeyron, en donde la termodinámica explica un aumento de 7% en el vapor de agua atmosférico por cada 1°C de calentamiento superficial y la cual está muy bien representada e integrada en los modelos de circulación general. Los consensos de aumento de agua precipitable sobre todo el dominio de estudio son claros, además de los aumentos de su transporte atmosférico. Por el contrario, tanto los cambios de la precipitación como de la evaporación no se explican por la termodinámica como tal, sino que globalmente dependen del balance energético (Allan et al., 2020). Sin embargo, estos cambios pueden ser “contrarrestados” por ajustes atmosféricos en respuesta otros factores, como aerosoles y gases de efecto invernadero que alteran directamente el balance energético atmosférico (Allan et al., 2020). Además, los cambios de precipitación media global están determinados por el balance energético de la Tierra, pero los cambios regionales pueden ser mucho más complejos y están determinados principalmente por el transporte de vapor de agua y por procesos dinámicos (Allan et al., 2020).

La precipitación promedio sobre las regiones tropicales aumenta con el incremento de las temperaturas a nivel global, así como también la irregularidad en su distribución. Con la misma cantidad de calentamiento, las regiones húmedas experimentan un mayor aumento de humedad que las regiones más secas, volviéndose más competitivas para la convección en un mundo más cálido (Zhang & Fueglistaler, 2019). Este concepto de competencia por convección fue descrito recientemente por Zhang & Fueglistaler (2019), quienes muestran cómo la señal asociada al aumento de temperaturas globales en la distribución espacial de las precipitaciones tropicales ya está emergiendo, incluso en registros observacionales (Liu & Allan, 2013; Polson & Hegerl, 2017; Zhang & Fueglistaler, 2019). En general, son abundantes los estudios que apoyan los mecanismos debidos al calentamiento tipo “lo húmedo se vuelve más húmedo” y “lo seco se vuelve más seco”, pero ninguno analiza directamente el cambio en la desigualdad de las lluvias tropicales (Zhang & Fueglistaler, 2019). Es así como Zhang & Fueglistaler (2019) demuestran que la irregularidad de las lluvias en los trópicos puede explicarse por un aumento en la competencia por convección bajo efectos de calentamiento, lo cual induce a una disminución en el área de convección activa, incluso con un aumento uniforme en las temperaturas (Zhang & Fueglistaler, 2019). Los resultados presentados en la Figura 3.20 son un claro ejemplo de las inconsistencias de las lluvias en el trópico bajo efectos de calentamiento, donde justamente el cambio en las fuentes puede estar relacionado con aumentos en la humedad desde regiones donde existe actividad convectiva importante.

Se puede concluir, de manera general, que las proyecciones del transporte de humedad identificadas en esta investigación coinciden con lo que se ha reportado en una gran variedad de estudios en cuanto a la intensificación del ciclo hidrológico bajo efectos de calentamiento (Allen & Ingram, 2002; Donat et al., 2016; Dong et al., 2019; Kunkel et al., 2013; Trenberth, 2011). Los aumentos en la humedad atmosférica en un mundo más cálido generan

incrementos termodinámicos en los flujos de humedad atmosférica que amplifican los eventos húmedos y secos, intensificando las precipitaciones extremas (Allan et al., 2020).

A pesar de esta relación aparentemente sencilla y de que las observaciones y las simulaciones con modelos climáticos muestran que las lluvias se intensifican bajo calentamiento, la sensibilidad de las precipitaciones extremas a aumentos de temperatura sigue siendo incierta cuando la convección es importante, es decir que la organización convectiva de mesoescala es determinante en la dinámica de las precipitaciones extremas sobre los trópicos (O’Gorman, 2015), particularmente cuando las lluvias se encuentran dominadas por el forzamiento local de la superficie. Por tanto el contenido de humedad atmosférica como las propiedades convectivas deben tenerse en cuenta en el estudio de la respuesta de la precipitación a los cambios en la temperatura (Dong et al., 2019). Aunque la teoría termodinámica es sólida y bien entendida, aún se encuentran bajo comprensión las contribuciones microfísicas y dinámicas que pueden influenciar también la ocurrencia de eventos extremos (O’Gorman, 2015). Debido a esto, aún no existe consenso al respecto, e incluso algunos resultados siguen siendo controversiales debido en parte a las numerosas variaciones estacionales y regionales en la dependencia de la precipitación a la temperatura (Berg et al., 2009; Dong et al., 2019; Hardwick Jones et al., 2010; Lenderink & Van Meijgaard, 2008; Utsumi et al., 2011). Este último punto es evidente en nuestros resultados, que sugieren una proyección de aumentos generalizados del transporte de agua precipitable sobre la región de estudio, pero un menor consenso para finales de siglo en el aporte de precipitación desde diferentes fuentes de humedad a las regiones de interés. Es decir, nuestros resultados apuntan directamente a cambios termodinámicos que provocan aumentos del contenido de humedad atmosférica bajo efecto de calentamiento; sin embargo, se hace necesario seguir avanzando en la comprensión de cómo otros factores dinámicos que tienen lugar en los trópicos pueden aportar en la ocurrencia de eventos extremos de precipitación en un mundo más cálido, especialmente sobre aquellas regiones estratégicas que son importantes en la regulación del clima regional y global, como es el caso de la Amazonía.

Y es que como ha sido ampliamente reportado aquí y en otros estudios, el Amazonas es una de las regiones con mayor importancia por su papel en la regulación del clima local, regional y global (Marengo et al., 2018; Nobre et al., 2009), por lo que los resultados acá encontrados toman bastante relevancia, especialmente en cuanto a la reducción proyectada de su reciclaje de precipitación durante las temporadas seca y de transición a las lluvias al sur de la cuenca (JJA y SON, respectivamente). Lo anterior se relaciona directamente con las evidencias observacionales y proyecciones futuras de alargamiento de la temporada seca en esta región, reportadas por diferentes estudios (Agudelo et al., 2019; Debortoli et al., 2015; Fu et al., 2013; Longo et al., 2018; Malhi et al., 2008). Así, de acuerdo con las proyecciones correspondientes al escenario RCP8.5, el aumento de emisiones de GEI a la atmósfera conllevará a una reducción del reciclaje de humedad en la cuenca Amazónica, lo que podría relacionarse con las tendencias proyectadas de este alargamiento durante la temporada seca sobre la región (Boisier et al., 2015; Fu et al., 2013), y posiblemente a una disminución de su capacidad regulatoria del clima a nivel regional y global (Magrin et al., 2014). En este sentido, es necesario seguir avanzando en la comprensión, tanto del papel del reciclaje de humedad de regiones estratégicas en el clima a escala global, como en el del papel que desempeñan las diferentes fuentes de humedad atmosférica y sus posibles cambios a futuro bajo escenarios de cambio climático.

Apéndice A

Tabla A-1. Clasificación general de las diferentes fuentes considerando su contribución total multianual en el transporte de precipitación hacia NOSA. Los valores de la primera columna indican el orden de contribución de la fuente, siendo 1 la fuente de mayor contribución y 20 la fuente de menor contribución. Los valores mostrados en la tercera columna corresponden a los porcentajes de contribución total multianual desde cada una de las fuentes hacia NOSA, calculados como la proporción de precipitación aportada con respecto de precipitación total sobre NOSA para el periodo respectivo: periodo histórico (1980-2005) y futuro (2070-2100). Los colores para las proyecciones indican el cambio en la posición de importancia de la fuente con respecto al periodo histórico: los colores rojos indican que la región disminuye su rango como fuente para NOSA, mientras que los colores azules indican aumento de rango.

Clasificación 1980-2005			Clasificación 2070-2100		
Promedio de todos los modelos CMIP5 estudiados			Promedio de todos los modelos CMIP5 estudiados		
P (%) a NOSA			P (%) a NOSA		
1	TNA	35.16	1	TNA	35.46
2	NOSA	14.01	2	TSA	11.51
3	TSA	11.20	3	NOSA	11.48
4	GUYN	5.55	4	GUYN	4.50
5	NAMZ	4.09	5	NATL	3.43
6	NATL	3.26	6	NAMZ	3.00
7	NORD	1.26	7	NORD	1.01
8	AFRC	0.75	8	AFRC	0.77
9	CABN	0.62	9	CABN	0.58
10	TNP	0.31	10	TOCA	0.25
11	TOCA	0.30	11	TNP	0.20
12	TSP	0.10	12	TSP	0.06
13	SAMZ	0.08	13	SAMZ	0.05
14	PECH	0.04	14	PECH	0.03
15	CAM	0.02	15	CAM	0.02
16	GOM	0.00	16	GOM	0.01
17	SEUS	0.00	17	SEUS	0.00
18	LPRB	0.00	18	NPAC	0.00
19	NPAC	0.00	19	LPRB	0.00
20	SWUS	0.00	20	SWUS	0.00

Tabla A-2. Clasificación general de las diferentes fuentes considerando su contribución total multianual en el transporte de precipitación hacia NAMZ. Los valores de la primera columna indican el orden de contribución de la fuente, siendo 1 la fuente de mayor contribución y 20 la fuente de menor contribución. Los valores mostrados en la tercera columna corresponden a los porcentajes de contribución total multianual desde cada una de las fuentes hacia NAMZ, calculados como la proporción de precipitación aportada con respecto de precipitación total sobre NAMZ para el periodo respectivo: periodo histórico (1980-2005) y futuro (2070-2100). Los colores para las proyecciones indican el cambio en la posición de importancia de la fuente con respecto al periodo histórico: los colores rojos indican que la región disminuye su rango como fuente para NAMZ, mientras que los colores azules indican aumento de rango.

Clasificación 1980-2005			Clasificación 2070-2100		
Promedio de todos los modelos CMIP5 estudiados			Promedio de todos los modelos CMIP5 estudiados		
P (%) a NAMZ			P (%) a NAMZ		
1	TNA	31.38	1	TNA	30.91
2	NAMZ	15.96	2	TSA	14.66
3	TSA	14.94	3	NAMZ	13.43
4	NORD	3.53	4	NORD	2.99
5	GUYN	2.69	5	GUYN	2.20
6	NOSA	1.80	6	NATL	1.67
7	NATL	1.67	7	NOSA	1.46
8	TOCA	1.45	8	TOCA	1.21
9	AFRC	0.79	9	AFRC	0.83
10	SAMZ	0.72	10	SAMZ	0.56
11	PECH	0.17	11	PECH	0.12
12	TSP	0.15	12	TSP	0.11
13	TNP	0.11	13	TNP	0.08
14	CABN	0.09	14	CABN	0.08
15	LPRB	0.01	15	LPRB	0.01
16	CAM	0.00	16	CAM	0.00
17	GOM	0.00	17	GOM	0.00
18	SEUS	0.00	18	SEUS	0.00
19	NPAC	0.00	19	NPAC	0.00
20	SWUS	0.00	20	SWUS	0.00

Tabla A-3. Clasificación general de las diferentes fuentes considerando su contribución total multianual en el transporte de precipitación hacia SAMZ. Los valores de la primera columna indican el orden de contribución de la fuente, siendo 1 la fuente de mayor contribución y 20 la fuente de menor contribución. Los valores mostrados en la tercera columna corresponden a los porcentajes de contribución total multianual desde cada una de las fuentes hacia SAMZ, calculados como la proporción de precipitación aportada con respecto de precipitación total sobre SAMZ para el periodo respectivo: periodo histórico (1980-2005) y futuro (2070-2100).

Clasificación 1980-2005			Clasificación 2070-2100		
Promedio de todos los modelos CMIP5 estudiados			Promedio de todos los modelos CMIP5 estudiados		
P (%) a SAMZ			P (%) a SAMZ		
1	SAMZ	20.16	1	SAMZ	17.93
2	TNA	18.21	2	TNA	16.19
3	TSA	13.08	3	TSA	14.69
4	NAMZ	9.50	4	NAMZ	7.83
5	NORD	3.97	5	NORD	3.92
6	TOCA	2.87	6	TOCA	2.78
7	PECH	2.10	7	PECH	1.65
8	TSP	1.31	8	TSP	1.14
9	GUYN	0.90	9	NATL	0.66
10	NOSA	0.78	10	GUYN	0.66
11	NATL	0.74	11	LPRB	0.57
12	LPRB	0.67	12	NOSA	0.56
13	AFRC	0.46	13	AFRC	0.41
14	TNP	0.11	14	TNP	0.10
15	CABN	0.08	15	CABN	0.07
16	CAM	0.00	16	CAM	0.00
17	GOM	0.00	17	GOM	0.00
18	SEUS	0.00	18	SEUS	0.00
19	NPAC	0.00	19	NPAC	0.00
20	SWUS	0.00	20	SWUS	0.00

Apéndice B

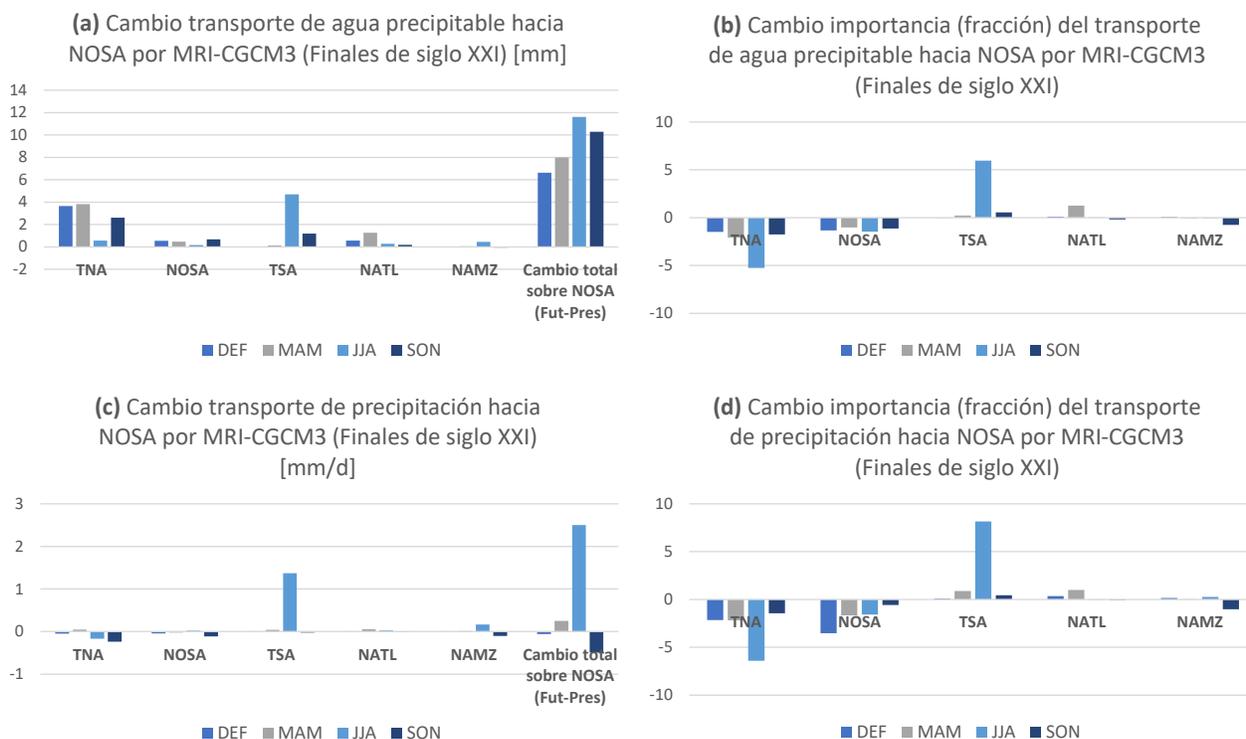


Figura B-1. Estimados del modelo MRI-CGCM3 sobre el cambio proyectado para transporte de humedad hacia NOSA para finales del siglo XXI. (a) Cambio proyectado en la magnitud del transporte de agua precipitable (mm). (b) Cambio proyectado de la importancia de cada región como fuente de agua precipitable (%). (c) Igual que (a) pero para el transporte de precipitación (mm/d). (d) Igual que (b) pero para el transporte de precipitación (%). Cada uno de los grupos de barras corresponde a una fuente de humedad hacia NOSA, las cuales se presentan en orden decreciente de importancia en la contribución de humedad hacia NOSA durante el periodo histórico (Capítulo II). Los colores de las barras representan cada una de las temporadas del año. Las últimas cuatro barras de los paneles (a) y (c) representan el cambio de la variable total ((a) cambio de agua precipitable total y (c) cambio de precipitación total) sobre NOSA para finales del siglo XXI.

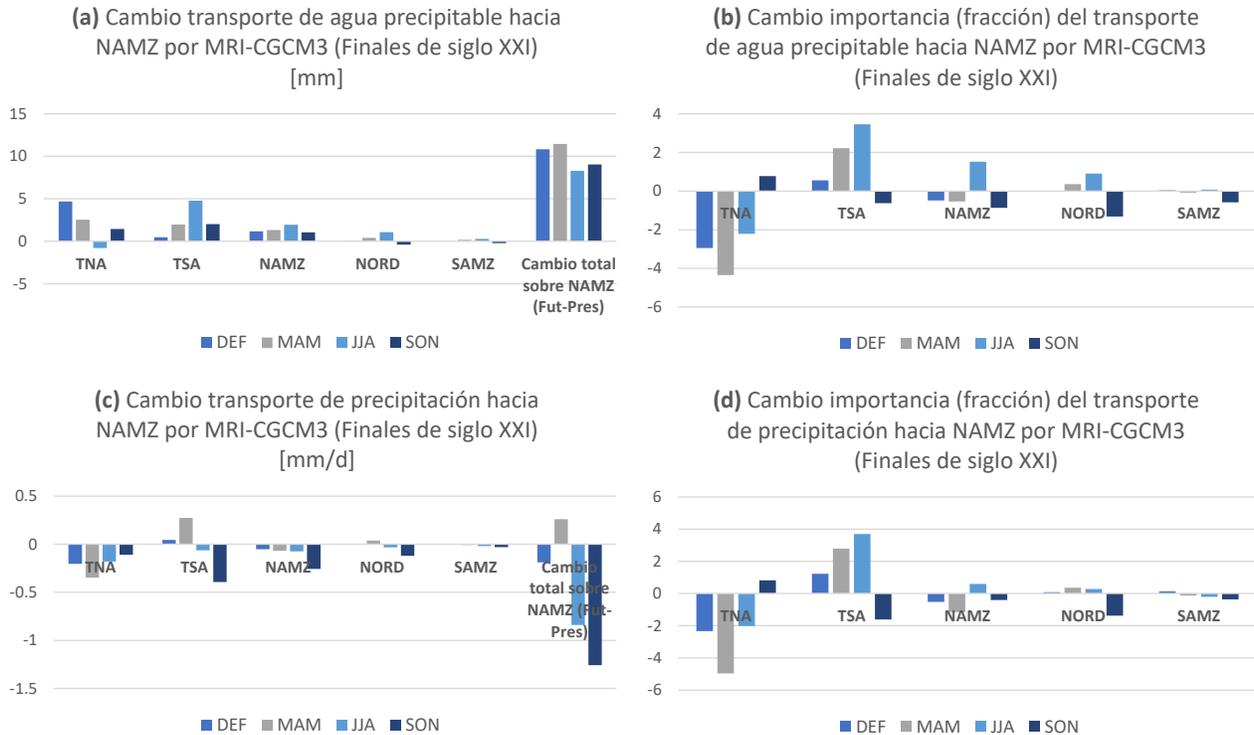


Figura B-2. Estimados del modelo MRI-CGCM3 sobre el cambio proyectado para transporte de humedad hacia NAMZ para finales del siglo XXI. (a) Cambio proyectado en la magnitud del transporte de agua precipitable (mm). (b) Cambio proyectado de la importancia de cada región como fuente de agua precipitable (%). (c) Igual que (a) pero para el transporte de precipitación (mm/d). (d) Igual que (b) pero para el transporte de precipitación (%). Cada uno de los grupos de barras corresponde a una fuente de humedad hacia NAMZ, las cuales se presentan en orden decreciente de importancia en la contribución de humedad hacia NAMZ durante el periodo histórico (Capítulo II). Los colores de las barras representan cada una de las temporadas del año. Las últimas cuatro barras de los paneles (a) y (c) representan el cambio de la variable total ((a) cambio de agua precipitable total y (c) cambio de precipitación total) sobre NAMZ para finales del siglo XXI.

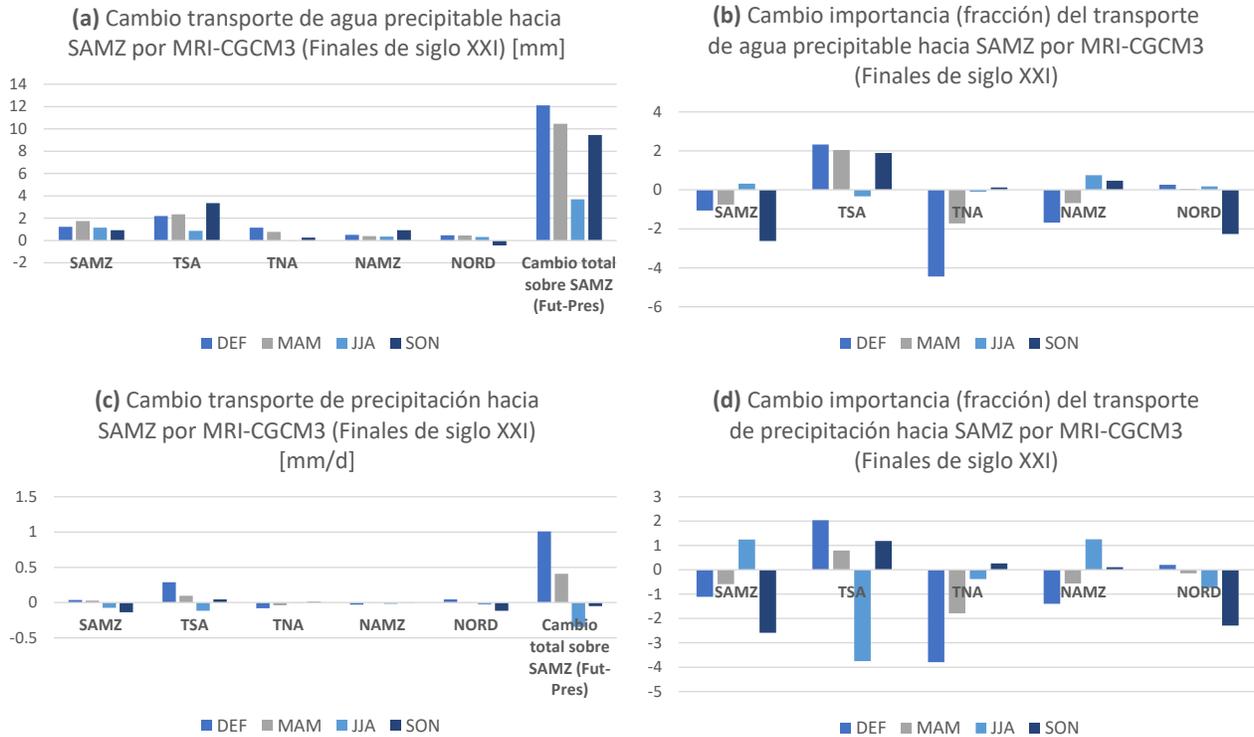


Figura B-3. Estimados del modelo MRI-CGCM3 sobre el cambio proyectado para transporte de humedad hacia SAMZ para finales del siglo XXI. (a) Cambio proyectado en la magnitud del transporte de agua precipitable (mm). (b) Cambio proyectado de la importancia de cada región como fuente de agua precipitable (%). (c) Igual que (a) pero para el transporte de precipitación (mm/d). (d) Igual que (b) pero para el transporte de precipitación (%). Cada uno de los grupos de barras corresponde a una fuente de humedad hacia SAMZ, las cuales se presentan en orden decreciente de importancia en la contribución de humedad hacia SAMZ durante el periodo histórico (Capítulo II). Los colores de las barras representan cada una de las temporadas del año. Las últimas cuatro barras de los paneles (a) y (c) representan el cambio de la variable total ((a) cambio de agua precipitable total y (c) cambio de precipitación total) sobre SAMZ para finales del siglo XXI.

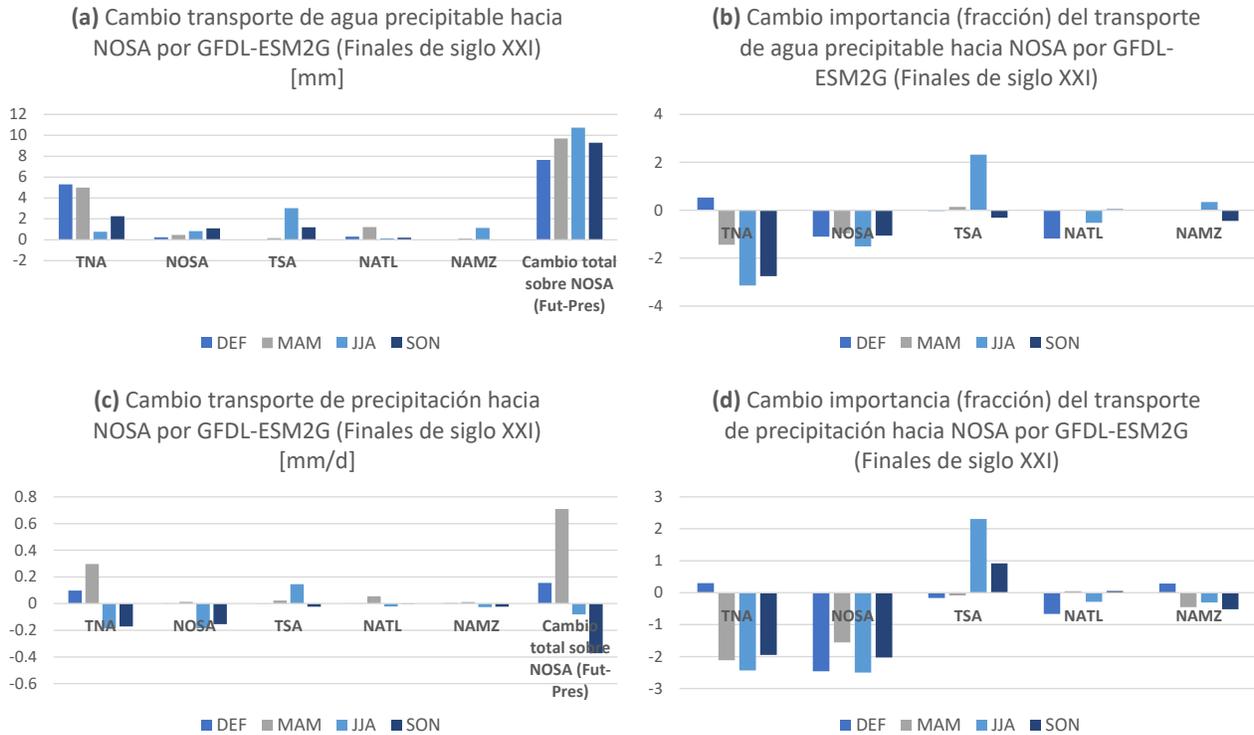


Figura B-4. Estimados del modelo GFDL-ESM2G sobre el cambio proyectado para transporte de humedad hacia NOSA para finales del siglo XXI. (a) Cambio proyectado en la magnitud del transporte de agua precipitable (mm). (b) Cambio proyectado de la importancia de cada región como fuente de agua precipitable (%). (c) Igual que (a) pero para el transporte de precipitación (mm/d). (d) Igual que (b) pero para el transporte de precipitación (%). Cada uno de los grupos de barras corresponde a una fuente de humedad hacia NOSA, las cuales se presentan en orden decreciente de importancia en la contribución de humedad hacia NOSA durante el periodo histórico (Capítulo II). Los colores de las barras representan cada una de las temporadas del año. Las últimas cuatro barras de los paneles (a) y (c) representan el cambio de la variable total ((a) cambio de agua precipitable total y (c) cambio de precipitación total) sobre NOSA para finales del siglo XXI.

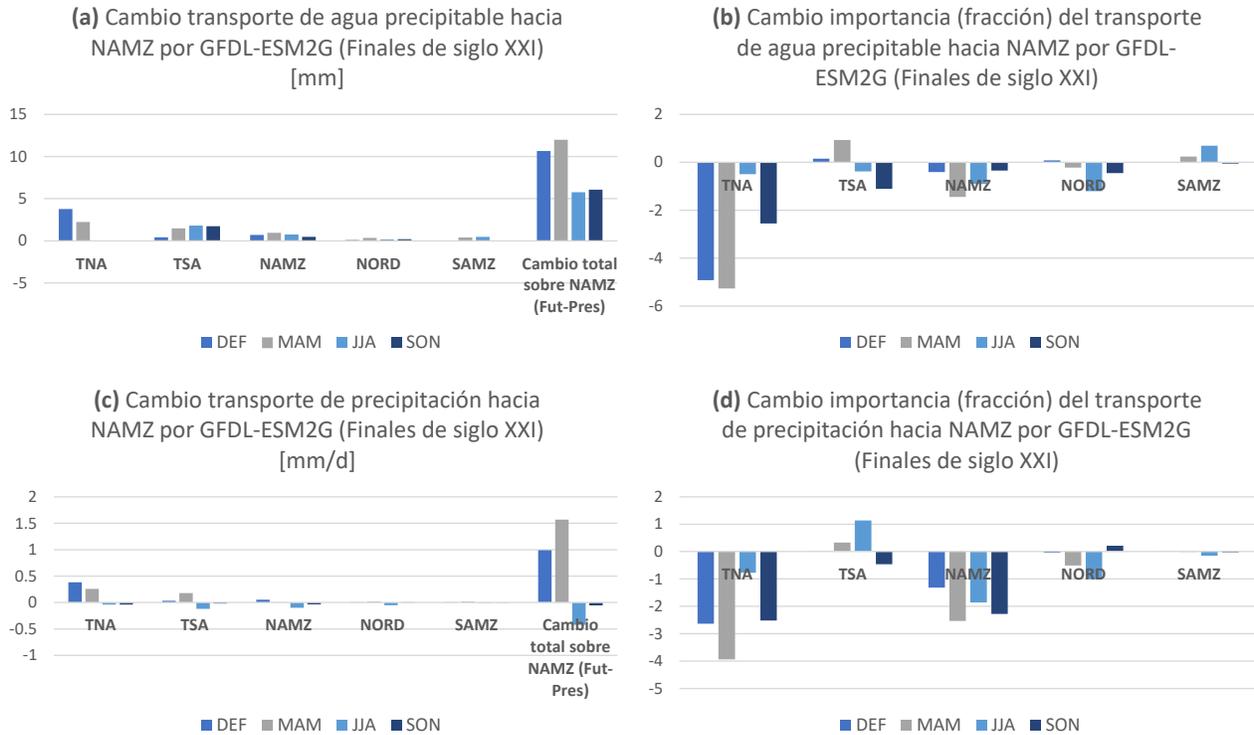


Figura B-5. Estimados del modelo GFDL-ESM2G sobre el cambio proyectado para transporte de humedad hacia NAMZ para finales del siglo XXI. (a) Cambio proyectado en la magnitud del transporte de agua precipitable (mm). (b) Cambio proyectado de la importancia de cada región como fuente de agua precipitable (%). (c) Igual que (a) pero para el transporte de precipitación (mm/d). (d) Igual que (b) pero para el transporte de precipitación (%). Cada uno de los grupos de barras corresponde a una fuente de humedad hacia NAMZ, las cuales se presentan en orden decreciente de importancia en la contribución de humedad hacia NAMZ durante el periodo histórico (Capítulo II). Los colores de las barras representan cada una de las temporadas del año. Las últimas cuatro barras de los paneles (a) y (c) representan el cambio de la variable total ((a) cambio de agua precipitable total y (c) cambio de precipitación total) sobre NAMZ para finales del siglo XXI.

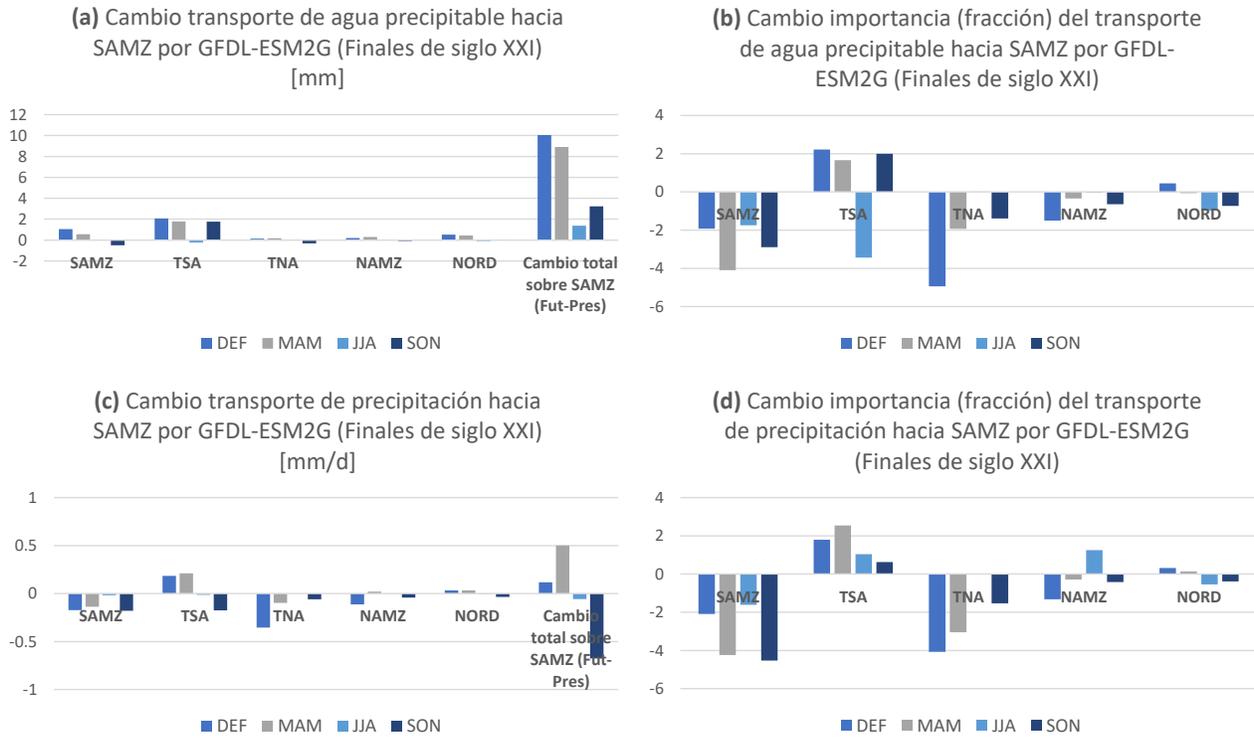


Figura B-6. Estimados del modelo GFDL-ESM2G sobre el cambio proyectado para transporte de humedad hacia SAMZ para finales del siglo XXI. (a) Cambio proyectado en la magnitud del transporte de agua precipitable (mm). (b) Cambio proyectado de la importancia de cada región como fuente de agua precipitable (%). (c) Igual que (a) pero para el transporte de precipitación (mm/d). (d) Igual que (b) pero para el transporte de precipitación (%). Cada uno de los grupos de barras corresponde a una fuente de humedad hacia SAMZ, las cuales se presentan en orden decreciente de importancia en la contribución de humedad hacia SAMZ durante el periodo histórico (Capítulo II). Los colores de las barras representan cada una de las temporadas del año. Las últimas cuatro barras de los paneles (a) y (c) representan el cambio de la variable total ((a) cambio de agua precipitable total y (c) cambio de precipitación total) sobre SAMZ para finales del siglo XXI.

Agradecimientos

Este Trabajo de Investigación fue financiado por el Comité para el Desarrollo de la Investigación (CODI) de la Universidad de Antioquia, a través del proyecto *“El cambio climático y los cambios de cobertura vegetal en el Amazonas: impactos en la disponibilidad de agua atmosférica en un escenario de postconflicto en Colombia”*, PRG2017-16264.

Agradezco sinceramente a todas las personas que hicieron posible este proceso. A Francina Domínguez y sus colegas por permitirme acceder al modelo DRM (*Dynamical Recycling Model*) y a todos quienes desarrollaron los conjuntos de datos utilizados en este trabajo y los pusieron a disposición de la comunidad científica. Esperamos que este resultado sea una contribución a todos estos esfuerzos y que sea de gran utilidad a diferentes campos de la investigación.

Finalmente, pero no menos importante, agradezco enormemente a mis Directores en este Trabajo de Investigación, Paola Andrea Arias Gómez y John Alejandro Martínez Agudelo, por su constante guía, paciencia y apoyo durante todo este proceso.

Referencias

- Adam, O., Schneider, T., & Brient, F. (2018). Regional and seasonal variations of the double-ITCZ bias in CMIP5 models. *Climate Dynamics*, 51(1–2), 101–117. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3909-1>
- Agudelo, J., Arias, P. A., Vieira, S. C., & Martínez, J. A. (2019). Influence of longer dry seasons in the Southern Amazon on patterns of water vapor transport over northern South America and the Caribbean. *Climate Dynamics*, 52(5–6), 2647–2665. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4285-1>
- Allan, R. P., Barlow, M., Byrne, M. P., Cherchi, A., Douville, H., Fowler, H. J., Gan, T. Y., Pendergrass, A. G., Rosenfeld, D., Swann, A. L. S., Wilcox, L. J., & Zolina, O. (2020). Advances in understanding large-scale responses of the water cycle to climate change. In *Annals of the New York Academy of Sciences* (Vol. 1472, Issue 1, pp. 49–75). Blackwell Publishing Inc. <https://doi.org/10.1111/nyas.14337>
- Allan, R. P., & Soden, B. J. (2008). Atmospheric warming and the amplification of precipitation extremes. *Science*, 321(5895), 1481–1484. <https://doi.org/10.1126/science.1160787>
- Allen, M., & Ingram, W. (2002). Constraints on future changes in climate and the hydrologic cycle. *Nature*.
- Alves, L. M., Marengo, J. A., Fu, R., & Bombardi, R. J. (2017). Sensitivity of Amazon Regional Climate to Deforestation. *American Journal of Climate Change*, 06(01), 75–98. <https://doi.org/10.4236/ajcc.2017.61005>
- Aragão, L. E. O. C., Poulter, B., Barlow, J. B., Anderson, L. O., Malhi, Y., Saatchi, S., Phillips, O. L., & Gloor, E. (2014). Environmental change and the carbon balance of Amazonian forests. *Biological Reviews*, 89(4), 913–931. <https://doi.org/10.1111/brv.12088>
- Archer, C. L., & Caldeira, K. (2008). Historical trends in the jet streams. *Geophysical Research Letters*, 35(8). <https://doi.org/10.1029/2008GL033614>
- Arias, P. A., Fu, R., Hoyos, C. D., Li, W., & Zhou, L. (2011). Changes in cloudiness over the Amazon rainforests during the last two decades: Diagnostic and potential causes. *Climate Dynamics*, 37(5), 1151–1164. <https://doi.org/10.1007/s00382-010-0903-2>
- Arias, P. A., Fu, R., Vera, C., & Rojas, M. (2015). A correlated shortening of the North and South American monsoon seasons in the past few decades. *Climate Dynamics*, 45(11–12). <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2533-1>
- Arias, P. A., Martínez, J. A., & Vieira, S. C. (2015). Moisture sources to the 2010–2012 anomalous wet season in northern South America. *Climate Dynamics*. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2511-7>
- Arraut, J. M., Nobre, C., Barbosa, H. M. J., Obregon, G., & Marengo, J. (2012). Aerial rivers and lakes: Looking at large-scale moisture transport and its relation to Amazonia and to subtropical rainfall in South America. *Journal of Climate*, 25(2), 543–556. <https://doi.org/10.1175/2011JCLI4189.1>
- Baker, A. J., Sodemann, H., Baldini, J. U. L., Breitenbach, S. F. M., Johnson, K. R., van Hunen, J., & Pingzhong, Z. (2015). Seasonality of westerly moisture transport in the East Asian summer monsoon and its implications for interpreting precipitation $\delta^{18}O$. *Journal of Geophysical Research*, 120(12), 5850–5862. <https://doi.org/10.1002/2014JD022919>

- Barkhordarian, A., von Storch, H., Zorita, E., Loikith, P. C., & Mechoso, C. R. (2018). Observed warming over northern South America has an anthropogenic origin. *Climate Dynamics*, *51*(5–6), 1901–1914. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3988-z>
- Bedoya-Soto, J. M., Poveda, G., Trenberth, K. E., & Vélez-Upegui, J. J. (2019). Interannual hydroclimatic variability and the 2009–2011 extreme ENSO phases in Colombia: from Andean glaciers to Caribbean lowlands. *Theoretical and Applied Climatology*, *135*(3–4), 1531–1544. <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2452-2>
- Berg, P., Haerter, J. O., Thejll, P., Piani, C., Hagemann, S., & Christensen, J. H. (2009). Seasonal characteristics of the relationship between daily precipitation intensity and surface temperature. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, *114*(18). <https://doi.org/10.1029/2009JD012008>
- Birner, T., Davis, S. M., & Seidel, D. J. (2014). The changing width of Earth's tropical belt. *Physics Today*, *67*(12), 38–44. <https://doi.org/10.1063/PT.3.2620>
- Boisier, J. P., Ciais, P., Ducharne, A., & Guimberteau, M. (2015). Projected strengthening of Amazonian dry season by constrained climate model simulations. *Nature Climate Change*, *5*(7), 656–660. <https://doi.org/10.1038/nclimate2658>
- Bonilla-Ovallos, C. A., & Mesa Sánchez, O. J. (2017). 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. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.427>
- Bosilovich, M. G., & Chern, J.-D. (2006). *Simulation of Water Sources and Precipitation Recycling for the Mackenzie, Mississippi, and Amazon River Basins*. http://journals.ametsoc.org/jhm/article-pdf/7/3/312/4159867/jhm501_1.pdf
- Budyko, M. I. (1974). *Climate and Life* (D. H. Miller (ed.)). Academic Press.
- Budyko, M. I., & Drozdov, O. . (1953). Characteristics of the moisture circulation in the atmosphere. *Izv. Akad.Nauk.SSSR Ser. Geogr. Geofiz.*, *4*, 5–14.
- Burde, G. I., & Zangvil, A. (2001). The estimation of regional precipitation recycling. Part I: Review of recycling models. *Journal of Climate*. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2001\)014<2497:TEORPR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2001)014<2497:TEORPR>2.0.CO;2)
- Cai, W., McPhaden, M. J., Grimm, A. M., Rodrigues, R. R., Taschetto, A. S., Garreaud, R. D., Dewitte, B., Poveda, G., Ham, Y.-G., Santoso, A., Ng, B., Anderson, W., Wang, G., Geng, T., Jo, H.-S., Marengo, J. A., Alves, L. M., Osman, M., Li, S., ... Vera, C. (2020). Climate impacts of the El Niño–Southern Oscillation on South America. *Nature Reviews Earth & Environment*, *1*(4), 215–231. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0040-3>
- Carmona, A. M., & Poveda, G. (2014). Detection of long-term trends in monthly hydro-climatic series of Colombia through Empirical Mode Decomposition. *Climatic Change*, *123*(2), 301–313. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-1046-3>
- Castino, F., Bookhagen, B., & Strecker, M. R. (2017). Rainfall variability and trends of the past six decades (1950–2014) in the subtropical NW Argentine Andes. *Climate Dynamics*, *48*(3–4), 1049–1067. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3127-2>
- Ceglar, A., Toreti, A., Balsamo, G., & Kobayashi, S. (2017). Precipitation over monsoon Asia: A comparison of

- reanalyses and observations. *Journal of Climate*, 30(2), 465–476. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0227.1>
- Chen, H., Sun, J., & Chen, X. (2014). Projection and uncertainty analysis of global precipitation-related extremes using CMIP5 models. *International Journal of Climatology*, 34(8), 2730–2748. <https://doi.org/10.1002/joc.3871>
- Christoffersen, B. O., Restrepo-Coupe, N., Arain, M. A., Baker, I. T., Cestaro, B. P., Ciais, P., Fisher, J. B., Galbraith, D., Guan, X., Gulden, L., van den Hurk, B., Ichii, K., Imbuzeiro, H., Jain, A., Levine, N., Miguez-Macho, G., Poulter, B., Roberti, D. R., Sakaguchi, K., ... Saleska, S. R. (2014). Mechanisms of water supply and vegetation demand govern the seasonality and magnitude of evapotranspiration in Amazonia and Cerrado. *Agricultural and Forest Meteorology*, 191, 33–50. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.02.008>
- Coe, M. T., Costa, M. H., & Soares-Filho, B. S. (2009). The influence of historical and potential future deforestation on the stream flow of the Amazon River - Land surface processes and atmospheric feedbacks. *Journal of Hydrology*, 369(1–2), 165–174. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.02.043>
- Costa, M. H., & Pires, G. F. (2010). Effects of Amazon and Central Brazil deforestation scenarios on the duration of the dry season in the arc of deforestation. *International Journal of Climatology*, 30(13), 1970–1979. <https://doi.org/10.1002/joc.2048>
- D'Agostino, R., & Lionello, P. (2017). Evidence of global warming impact on the evolution of the Hadley Circulation in ECMWF centennial reanalyses. *Climate Dynamics*, 48(9–10), 3047–3060. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3250-0>
- Davis, S. M., & Rosenlof, K. H. (2012). A multidiagnostic intercomparison of tropical-width time series using reanalyses and satellite observations. *Journal of Climate*, 25(4), 1061–1078. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00127.1>
- Debortoli, N., Dubreuil, V., Fanatsu, B., Delahaye, F., de Oliveira Henke, C., Rodrigues-Filho, S., Saito, C. H., & Fetter, R. (2015). Rainfall patterns in the Southern Amazon: a chronological perspective (1971– 2010). *Climatic Change*, 130, 1573–1480. <https://doi.org/DOI: 10.1007/s10584-015-1415-1>
- Dirmeyer, P. A., Jin, Y., Singh, B., & Yan, X. (2013a). Evolving land-atmosphere interactions over North America from CMIP5 simulations. *Journal of Climate*, 26(19), 7313–7327. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00454.1>
- Dirmeyer, P. A., Jin, Y., Singh, B., & Yan, X. (2013b). Trends in land-atmosphere interactions from CMIP5 simulations. *Journal of Hydrometeorology*, 14(3), 829–849. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-12-0107.1>
- Domínguez, F., Kumar, P., Liang, X.-Z., & Ting, M. (2006). *Impact of Atmospheric Moisture Storage on Precipitation Recycling*.
- Donat, M. G., Lowry, A. L., Alexander, L. V., O’Gorman, P. A., & Maher, N. (2016). More extreme precipitation in the world’s dry and wet regions. *Nature Climate Change*, 6(5), 508–513. <https://doi.org/10.1038/nclimate2941>
- Dong, W., Lin, Y., Wright, J. S., Xie, Y., Yin, X., & Guo, J. (2019). Precipitable water and CAPE dependence of rainfall intensities in China. *Climate Dynamics*, 52(5–6), 3357–3368. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4327-8>
- Drumond, A., Marengo, J., Ambrizzi, T., Nieto, R., Moreira, L., & Gimeno, L. (2014). The role of the Amazon Basin

moisture in the atmospheric branch of the hydrological cycle: A Lagrangian analysis. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(7), 2577–2598. <https://doi.org/10.5194/hess-18-2577-2014>

- Drumond, A., Nieto, R., Gimeno, L., & Ambrizzi, T. (2008). A Lagrangian identification of major sources of moisture over Central Brazil and la Plata Basin. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 113(14). <https://doi.org/10.1029/2007JD009547>
- Drumond, A., Stojanovic, M., Nieto, R., Vicente-Serrano, S., & Gimeno, L. (2019). Linking anomalous moisture transport and drought episodes in the IPCC reference regions. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 100(8), 1481–1498. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0111.1>
- Durack, P. J. (2015). Ocean salinity and the global water cycle. *Oceanography*, 28(1), 20–31. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2015.03>
- Durre, I., Williams, C. N., Yin, X., & Vose, R. S. (2009). Radiosonde-based trends in precipitable water over the Northern Hemisphere: An update. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 114(5). <https://doi.org/10.1029/2008JD010989>
- Eicker, A., Forootan, E., Springer, A., Longuevergne, L., & Kusche, J. (2016). Does GRACE see the terrestrial water cycle “intensifying”? *Journal of Geophysical Research*, 121(2), 733–745. <https://doi.org/10.1002/2015JD023808>
- Espinoza, J. C., Chavez, S., Ronchail, J., Junquas, C., Takahashi, K., & Lavado, W. (2015). Rainfall hotspots over the southern tropical Andes: Spatial distribution, rainfall intensity, and relations with large-scale atmospheric circulation. *Water Resources Research*, 51(5), 3459–3475. <https://doi.org/10.1002/2014WR016273>
- Espinoza, J. C., Ronchail, J., Marengo, J. A., & Segura, H. (2019). Contrasting North–South changes in Amazon wet-day and dry-day frequency and related atmospheric features (1981–2017). *Climate Dynamics*, 52(9–10), 5413–5430. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4462-2>
- Essou, G. R. C., Sabarly, F., Lucas-Picher, P., Brissette, F., & Poulin, A. (2016). Can precipitation and temperature from meteorological reanalyses be used for hydrological modeling? *Journal of Hydrometeorology*, 17(7), 1929–1950. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-15-0138.1>
- Figuroa, S. N., & Nobre, C. A. (1990). Precipitation distribution over central and western tropical South America. *Climanálise*, 5(6), 36–45.
- Fisch, G., Marengo, J. A., & Nobre, C. A. (1998). Uma revisão geral sobre o clima da Amazônia. *Acta Amazônica*, 28, 101–126. <https://doi.org/10.1590/1809-43921998282126>
- Fu, R., Yin, L., Li, W., Arias, P. A., Dickinson, R. E., Huang, L., Chakraborty, S., Fernandes, K., Liebmann, B., Fisher, R., & Myneni, R. B. (2013). Increased dry-season length over southern Amazonia in recent decades and its implication for future climate projection. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110(45), 18110–18115. <https://doi.org/10.1073/pnas.1302584110>
- Gimeno, L., Stohl, A., Trigo, R. M., Dominguez, F., Yoshimura, K., Yu, L., Drumond, A., Durn-Quesada, A. M., & Nieto, R. (2012). Oceanic and terrestrial sources of continental precipitation. *Reviews of Geophysics*. <https://doi.org/10.1029/2012RG000389>

- Goessling, H. F., & Reick, C. H. (2013). On the “well-mixed” assumption and numerical 2-D tracing of atmospheric moisture. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(11), 5567–5585. <https://doi.org/10.5194/acp-13-5567-2013>
- González Ortiz, C. J., & -Colombia, B. (2018). “Colombian Electricity Sector: Without Serious Risks in the Face of Climate Change” according to the Government. <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/tia/issue/archive>
- Grise, K. M., Davis, S. M., Simpson, I. R., Waugh, D. W., Fu, Q., Allen, R. J., Rosenlof, K. H., Ummenhofer, C. C., Karnauskas, K. B., Maycock, A. C., Quan, X.-W., Birner, T., & Staten, P. W. (2019). Recent Tropical Expansion: Natural Variability or Forced Response? *J. Climate*, 32, 1551–1571. <https://doi.org/https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0444.1>.
- Haghtalab, N., Moore, N., Heerspink, B. P., & Hyndman, D. W. (2020). Evaluating spatial patterns in precipitation trends across the Amazon basin driven by land cover and global scale forcings. *Theoretical and Applied Climatology*. <https://doi.org/10.1007/s00704-019-03085-3>
- Hardwick Jones, R., Westra, S., & Sharma, A. (2010). Observed relationships between extreme sub-daily precipitation, surface temperature, and relative humidity. *Geophysical Research Letters*, 37(22). <https://doi.org/10.1029/2010GL045081>
- Hegerl, G. C., Black, E., Allan, R. P., Ingram, W. J., Polson, D., Trenberth, K. E., Chadwick, R. S., Arkin, Beena Balan Sarojini, P. A., Becker, A., Durack, P. J., Easterling, D., Fowler, H. J., Kendon, J., Huffman, G. J., Liu, C., Marsh, R., Osborn, T. J., Stott, P. A., Vidale, P.-L., ... Zhang, X. (2015). Challenges in quantifying changes in the global water cycle. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 96, 1097–1115. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00212.1>
- Held, I. M., & Soden, B. J. (2006). *Robust Responses of the Hydrological Cycle to Global Warming*.
- Herrera-Estrada, J. E., Martinez, J. A., Dominguez, F., Findell, K. L., Wood, E. F., & Sheffield, J. (2019). Reduced moisture transport linked to drought propagation across North America. *Geophysical Research Letters*, 2019GL082475. <https://doi.org/10.1029/2019GL082475>
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., ... Thépaut, J. (2020). The ERA5 Global Reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, qj.3803. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Hirota, N., & Takayabu, Y. N. (2013). Reproducibility of precipitation distribution over the tropical oceans in CMIP5 multi-climate models compared to CMIP3. *Climate Dynamics*, 41(11–12), 2909–2920. <https://doi.org/10.1007/s00382-013-1839-0>
- Hoyos, I., Cañón-Barriga, J., Arenas-Suárez, T., Dominguez, F., & Rodríguez, B. A. (2019). Variability of regional atmospheric moisture over Northern South America: patterns and underlying phenomena. *Climate Dynamics*, 893–911. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4172-9>
- Hoyos, I., Dominguez, F., Cañón-Barriga, J., Martínez, J. A., Nieto, R., Gimeno, L., & Dirmeyer, P. A. (2018). Moisture origin and transport processes in Colombia, northern South America. *Climate Dynamics*. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3653-6>

- Hu, Q., Jiang, D., Lang, X., & Xu, B. (2018). Moisture sources of the Chinese Loess Plateau during 1979–2009. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, *509*, 156–163. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2016.12.030>
- Hu, Y., & Fu, Q. (2007). Observed poleward expansion of the Hadley circulation since 1979. In *Atmos. Chem. Phys.* (Vol. 7). www.atmos-chem-phys.net/7/5229/2007/
- Hu, Yongyun, Tao, L., & Liu, J. (2013). Poleward expansion of the Hadley circulation in CMIP5 simulations. *Advances in Atmospheric Sciences*, *30*(3), 790–795. <https://doi.org/10.1007/s00376-012-2187-4>
- Huntington, T. G. (2006). Evidence for intensification of the global water cycle: Review and synthesis. *Journal of Hydrology*, *319*(1–4), 83–95. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.07.003>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2013). *Climate change 2013: the physical science basis: Working Group I contribution to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. M. B. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, & P. M. Midgley (eds.)). Cambridge University Press.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). “*Climate Change 2014: synthesis Report,*” in *Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (and L. A. M. Core Writing Team, R. K. Pachauri (ed.)). <https://doi.org/doi:10.1017/CBO9781107415416>
- Joetzer, E., Douville, H., Delire, C., & Ciais, P. (2013). Present-day and future Amazonian precipitation in global climate models: CMIP5 versus CMIP3. *Climate Dynamics*, *41*(11–12), 2921–2936. <https://doi.org/10.1007/s00382-012-1644-1>
- Kang, S. M., & Polvani, L. M. (2011). The interannual relationship between the latitude of the eddy-driven jet and the edge of the Hadley cell. *Journal of Climate*, *24*(2), 563–568. <https://doi.org/10.1175/2010JCLI4077.1>
- Kharin, V. V., Zwiers, F. W., Zhang, X., & Wehner, M. (2013). Changes in temperature and precipitation extremes in the CMIP5 ensemble. *Climatic Change*, *119*(2), 345–357. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0705-8>
- Koster, R. D., Dirmeyer, P. A., Hahmann, A. N., Ijpehaar, R., Tyahla, L., Cox, P., & Suarez, M. J. (2002). *Comparing the Degree of Land-Atmosphere Interaction in Four Atmospheric General Circulation Models*. <http://journals.ametsoc.org/jhm/article-pdf/3/3/363/4144983/1525-7541>
- Kunkel, K. E., Karl, T. R., Easterling, D. R., Redmond, K., Young, J., Yin, X., & Hennon, P. (2013). Probable maximum precipitation and climate change. *Geophysical Research Letters*, *40*(7), 1402–1408. <https://doi.org/10.1002/grl.50334>
- Laf  n  , A., Nakamura, H., Nishii, K., & Miyasaka, T. (2014). A diagnostic study of future evaporation changes projected in CMIP5 climate models. *Climate Dynamics*, *42*(9–10), 2745–2761. <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2087-7>
- Laurance, W. F., Cochrane, M. A., Bergen, S., Fearnside, P. M., Delambnica, P., Barber, C., D ’Angelo, S., & Fernandes, T. (2001). The Future of the Brazilian Amazon. *Science*, *291*(5503), 438–439. <https://doi.org/DOI:10.1126/science.291.5503.438>

- Lavado, W. S., Labat, D., Ronchail, J., Espinoza, J. C., & Guyot, J. L. (2013). Trends in rainfall and temperature in the Peruvian Amazon-Andes basin over the last 40 years (1965-2007). *Hydrological Processes*, 27(20), 2944–2957. <https://doi.org/10.1002/hyp.9418>
- Lavers, D. A., Allan, R. P., Villarini, G., Lloyd-Hughes, B., Brayshaw, D. J., & Wade, A. J. (2013). Future changes in atmospheric rivers and their implications for winter flooding in Britain. *Environmental Research Letters*, 8(3). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/3/034010>
- Lavers, D. A., Ralph, F. M., Waliser, D. E., Gershunov, A., & Dettinger, M. D. (2015). Climate change intensification of horizontal water vapor transport in CMIP5. *Geophysical Research Letters*, 42(13), 5617–5625. <https://doi.org/10.1002/2015GL064672>
- Lawrence, D., & Vandecar, K. (2015). Effects of tropical deforestation on climate and agriculture. In *Nature Climate Change* (Vol. 5, Issue 1, pp. 27–36). Nature Publishing Group. <https://doi.org/10.1038/nclimate2430>
- Lejeune, Q., Davin, E. L., Guillod, B. P., & Seneviratne, S. I. (2015). Influence of Amazonian deforestation on the future evolution of regional surface fluxes, circulation, surface temperature and precipitation. *Climate Dynamics*, 44(9–10), 2769–2786. <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2203-8>
- Lenderink, G., & Van Meijgaard, E. (2008). Increase in hourly precipitation extremes beyond expectations from temperature changes. *Nature Geoscience*, 1(8), 511–514. <https://doi.org/10.1038/ngeo262>
- Levang, S. J., & Schmitt, R. W. (2015). Centennial changes of the global water cycle in CMIP5 models. *Journal of Climate*, 28(16), 6489–6502. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0143.1>
- Li, G., & Xie, S. P. (2014). Tropical biases in CMIP5 multimodel ensemble: The excessive equatorial pacific cold tongue and double ITCZ problems. *Journal of Climate*, 27(4), 1765–1780. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00337.1>
- Lima, L. S., Coe, M. T., Soares Filho, B. S., Cuadra, S. V., Dias, L. C. P., Costa, M. H., Lima, L. S., & Rodrigues, H. O. (2014). Feedbacks between deforestation, climate, and hydrology in the Southwestern Amazon: Implications for the provision of ecosystem services. *Landscape Ecology*, 29(2), 261–274. <https://doi.org/10.1007/s10980-013-9962-1>
- Link, A., Van Der Ent, R., Berger, M., Eisner, S., & Finkbeiner, M. (2020). The fate of land evaporation-A global dataset. *Earth Syst. Sci. Data Discuss.* <https://doi.org/https://doi.org/10.5194/essd-2019-246>
- Liu, C., & Allan, R. P. (2013). Observed and simulated precipitation responses in wet and dry regions 1850-2100. *Environmental Research Letters*, 8(3). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/3/034002>
- Llopart, M., Reboita, M. S., Coppola, E., Giorgi, F., da Rocha, R. P., & de Souza, D. O. (2018). Land use change over the Amazon forest and its impact on the local climate. *Water (Switzerland)*, 10(2). <https://doi.org/10.3390/w10020149>
- Longo, M., Knox, R. G., Levine, N. M., Alves, L. F., Bonal, D., Camargo, P. B., Fitzjarrald, D. R., Hayek, M. N., Restrepo-Coupe, N., Saleska, S. R., da Silva, R., Stark, S. C., Tapajós, R. P., Wiedemann, K. T., Zhang, K., Wofsy, S. C., & Moorcroft, P. R. (2018). Ecosystem heterogeneity and diversity mitigate Amazon forest resilience to frequent extreme droughts. *New Phytologist*, 219(3), 914–931. <https://doi.org/10.1111/nph.15185>

- Lorenz, R., Argüeso, D., Donat, M. G., Pitman, A. J., Hurk, B. Van Den, Berg, A., Lawrence, D. M., Chéruy, F., Ducharne, A., Hagemann, S., Meier, A., Milly, P. C. D., & Seneviratne, S. I. (2016). Influence of land-atmosphere feedbacks on temperature and precipitation extremes in the GLACE-CMIP5 ensemble. *Journal of Geophysical Research*, *121*(2), 607–623. <https://doi.org/10.1002/2015JD024053>
- Lu, J., Vecchi, G. A., & Reichler, T. (2007). Expansion of the Hadley cell under global warming. *Geophysical Research Letters*, *34*(6). <https://doi.org/10.1029/2006GL028443>
- Magrin, G. O., Marengo, J. A., Boulanger, J.-P., Buckeridge, M. S., Castellanos, E., Poveda, G., Scarano, F. R., & Vicuña, S. (2014). Central and South America. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability., Chapter 27. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 1499–1566. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415386.007>
- Makarieva, A. M., & Gorshkov, V. G. (2007). Hydrology and Earth System Sciences Biotic pump of atmospheric moisture as driver of the hydrological cycle on land. In *Hydrol. Earth Syst. Sci* (Vol. 11). www.hydrol-earth-syst-sci.net/11/1013/2007/
- Makarieva, A. M., Gorshkov, V. G., & Li, B. L. (2013). Revisiting forest impact on atmospheric water vapor transport and precipitation. *Theoretical and Applied Climatology*, *111*(1–2), 79–96. <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0643-9>
- Malhi, Y., Roberts, J. T., Betts, R. A., Killeen, T. J., Li, W., & Nobre, C. A. (2008). *Climate Change, Deforestation, and the Fate of the Amazon*. <https://doi.org/doi:10.1126/science.1146961>
- Marengo, J. A. (2006). On the hydrological cycle of the Amazon Basin: A historical review and current state-of-the-art. In *Revista Brasileira de Meteorologia* (Vol. 3). <https://www.researchgate.net/publication/228647135>
- Marengo, J. A. (2009). Long-term trends and cycles in the hydrometeorology of the Amazon basin since the late 1920s. *Hydrological Processes*, *23*(22), 3236–3244. <https://doi.org/10.1002/hyp.7396>
- Marengo, J. A., Chou, S. C., Kay, G., Alves, L. M., Pesquero, J. F., Soares, W. R., Santos, D. C., Lyra, A. A., Sueiro, G., Betts, R., Chagas, D. J., Gomes, J. L., Bustamante, J. F., & Tavares, P. (2012). Development of regional future climate change scenarios in South America using the Eta CPTEC/HadCM3 climate change projections: Climatology and regional analyses for the Amazon, São Francisco and the Paraná River basins. *Climate Dynamics*, *38*(9–10), 1829–1848. <https://doi.org/10.1007/s00382-011-1155-5>
- Marengo, J. A., & Espinoza, J. C. (2016). Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: Causes, trends and impacts. In *International Journal of Climatology* (Vol. 36, Issue 3, pp. 1033–1050). John Wiley and Sons Ltd. <https://doi.org/10.1002/joc.4420>
- Marengo, J. A., Soares, W. R., Saulo, C., & Nicolini, M. (2004). Climatology of the low-level jet east of the Andes as derived from the NCEP-NCAR reanalyses: Characteristics and temporal variability. *Journal of Climate*, *17*(12), 2261–2280. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017<2261:COTLJE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<2261:COTLJE>2.0.CO;2)
- Marengo, J. A., Souza, C. M., Thonicke, K., Burton, C., Halladay, K., Betts, R. A., Alves, L. M., & Soares, W. R. (2018). Changes in Climate and Land Use Over the Amazon Region: Current and Future Variability and Trends.

Frontiers in Earth Science, 6(December), 1–21. <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00228>

- Martínez, J. A., & Domínguez, F. (2014). Sources of Atmospheric Moisture for the La Plata River Basin. *Journal of Climate*, 27(17), 6737–6753. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00022.s1>
- Martins, G., von Randow, C., Sampaio, G., & Dolman, A. J. (2015). Precipitation in the Amazon and its relationship with moisture transport and tropical Pacific and Atlantic SST from the CMIP5 simulation. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 12(1), 671–704. <https://doi.org/10.5194/hessd-12-671-2015>
- Medvigy, D., Walko, R. L., & Avissar, R. (2011). Effects of deforestation on spatiotemporal distributions of precipitation in South America. *Journal of Climate*, 24(8), 2147–2163. <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3882.1>
- Molina, R. D., Salazar, J. F., Martínez, J. A., Villegas, J. C., & Arias, P. A. (2019). Forest-induced exponential growth of precipitation along climatological wind streamlines over the Amazon. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1–22.
- Montes, C. (2018). La incertidumbre climática y el dilema energético colombiano. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 42(165), 392. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.664>
- Morales, J. S., Arias, P. A., Martínez, J. A., & Durán-Quesada, A. M. (2020). The role of low-level circulation on water vapor transport to Central and northern South America: insights from a 2D lagrangian approach. *International Journal of Climatology*. <https://doi.org/10.1002/joc.6873>
- Morán-Tejeda, E., Bazo, J., López-Moreno, J. I., Aguilar, E., Azorín-Molina, C., Sanchez-Lorenzo, A., Martínez, R., Nieto, J. J., Mejía, R., Martín-Hernández, N., & Vicente-Serrano, S. M. (2016). Climate trends and variability in Ecuador (1966–2011). *International Journal of Climatology*, 36(11), 3839–3855. <https://doi.org/10.1002/joc.4597>
- Moss, R., Babiker, M., Brinkman, S., Calvo, E., Carter, T., Edmonds, J., Elgizouli, I., Emori, S., Lin, E., Hibbard, K., Jones, R., Kainuma, M., Kelleher, J., Lamarque, J.-F., Manning, M., Matthews, B., Meehl, J., Meyer, L., Mitchell, J., & Zurek, M. (2008). *Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts, and Response Strategies. Technical Summary*. <http://www.ipcc.ch>
- Navarro Monterroza, E., Vieira, S. C., & Arias, P. A. (2017). *Spatiotemporal Variability of the Precipitation in Colombia During ENSO Events*. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3113796>
- Nguyen, H., Evans, A., Lucas, C., Smith, I., & Timbal, B. (2013). The hadley circulation in reanalyses: Climatology, variability, and Change. *Journal of Climate*, 26(10), 3357–3376. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00224.1>
- Nguyen, H., Lucas, C., Evans, A., Timbal, B., & Hanson, L. (2015). Expansion of the Southern Hemisphere hadley cell in response to greenhouse gas forcing. *Journal of Climate*, 28(20), 8067–8077. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0139.1>
- Nobre, A. (2014). *The Future Climate of Amazonia*. <http://www.ccst.inpe.br/wp-content/uploads/2014/11/>
- Nobre, C. A., Obregón, G. O., Marengo, J. A., Fu, R., & Poveda, G. (2009). Characteristics of Amazonian Climate: Main Features. In *Amazonia and Global Change. Geophysical Monograph Ser* (Vol. 186, pp. 149–162). <https://doi.org/10.1029/2008GM000720>

- Nobre, Carlos A., Sampaio, G., Borma, L. S., Castilla-Rubio, J. C., Silva, J. S., & Cardoso, M. (2016). Land-use and climate change risks in the amazon and the need of a novel sustainable development paradigm. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 113(39), 10759–10768. <https://doi.org/10.1073/pnas.1605516113>
- Nobre, Carlos A., Sellers, P. J., & Shukla, J. (1991). Amazonian Deforestation and Regional Climate Change. *Journal of Climate*, 4(10), 957–988. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1991\)004<0957:adarcc>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1991)004<0957:adarcc>2.0.co;2)
- O’Gorman, P. A. (2015). Precipitation Extremes Under Climate Change. In *Current Climate Change Reports* (Vol. 1, Issue 2, pp. 49–59). Springer. <https://doi.org/10.1007/s40641-015-0009-3>
- O’Gorman, P. A., & Muller, C. J. (2010). How closely do changes in surface and column water vapor follow Clausius-Clapeyron scaling in climate change simulations? *Environmental Research Letters*, 5(2). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/5/2/025207>
- O’Gorman, P. A., & Schneider, T. (2009). *The physical basis for increases in precipitation extremes in simulations of 21st-century climate change*. [https://doi.org/DOI: 10.1073/pnas.0907610106](https://doi.org/DOI:10.1073/pnas.0907610106)
- Oki, T. (2006). The Hydrologic Cycles and Global Circulation. In *Encyclopedia of Hydrological Sciences*, (pp. 13–22).
- Oki, T., & Kanae, S. (2006). *Global Hydrological Cycles and World Water Resources*. <https://doi.org/10.1126/science.1128845>
- Ortega, G., & Arias, P. A. (2018). *Evaluación de la representación de la precipitación y la temperatura media por modelos CMIP5 sobre Colombia y el neotrópico: implicaciones en regímenes hidrológicos*. <https://www.researchgate.net/publication/327561776>
- Ortega, G., Arias, P. A., Villegas, J. C., Marquet, P. A., & Nobre, P. (2020). *Present-day and future climate over Central and South America according to CMIP5/CMIP6 models*. *International Journal of Climatology*.
- Pabón-Caicedo, J. D. (2012). Cambio climático en Colombia: tendencias en la segunda mitad del siglo XX y escenarios posibles para el siglo XXI. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, 36, 127–144.
- Pabón-Caicedo, J. D., Arias, P. A., Carril, A. F., Espinoza, J. C., Borrel, L. F., Goubanova, K., Lavado-Casimiro, W., Masiokas, M., Solman, S., & Villalba, R. (2020). Observed and Projected Hydroclimate Changes in the Andes. In *Frontiers in Earth Science* (Vol. 8). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00061>
- Palomino-Lemus, R., Córdoba-Machado, S., Gámiz-Fortis, S. R., Castro-Díez, Y., & Esteban-Parra, M. J. (2015). Summer precipitation projections over northwestern South America from CMIP5 models. *Global and Planetary Change*, 131, 11–23. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2015.05.004>
- Palomino-Lemus, R., Córdoba-Machado, S., Gámiz-Fortis, S. R., Castro-Díez, Y., & Esteban-Parra, M. J. (2017). Climate change projections of boreal summer precipitation over tropical America by using statistical downscaling from CMIP5 models. *Environmental Research Letters*, 12(12). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa9bf7>
- Pires, G. F., & Costa, M. H. (2013). Deforestation causes different subregional effects on the Amazon bioclimatic equilibrium. *Geophysical Research Letters*, 40(14), 3618–3623. <https://doi.org/10.1002/grl.50570>

- Polade, S. D., Pierce, D. W., Cayan, D. R., Gershunov, A., & Dettinger, M. D. (2014). The key role of dry days in changing regional climate and precipitation regimes. *Scientific Reports*, 4. <https://doi.org/10.1038/srep04364>
- Polson, D., & Hegerl, G. C. (2017). Strengthening contrast between precipitation in tropical wet and dry regions. *Geophysical Research Letters*, 44(1), 365–373. <https://doi.org/10.1002/2016GL071194>
- Poveda, G. (2004). La hidroclimatología de Colombia: Una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diurna. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, 28, 201–222. <https://www.researchgate.net/publication/284691636>
- Poveda, G., Álvarez, D. M., & Rueda, Ó. A. (2011). Hydro-climatic variability over the Andes of Colombia associated with ENSO: A review of climatic processes and their impact on one of the Earth's most important biodiversity hotspots. In *Climate Dynamics* (Vol. 36, Issues 11–12, pp. 2233–2249). <https://doi.org/10.1007/s00382-010-0931-y>
- Poveda, G., Jaramillo, A., Gil, M. M., Quiceno, N., & Mantilla, R. I. (2001). Seasonality in ENSO-related precipitation, river discharges, soil moisture, and vegetation index in Colombia. *Water Resources Research*, 37(8), 2169–2178. <https://doi.org/10.1029/2000WR900395>
- Poveda, G., Jaramillo, L., & 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. <https://doi.org/10.1002/2013WR014087>
- Poveda, G., & Mesa, O. (1999). La corriente de chorro superficial del oeste (“Del Chocó”) y otras dos corrientes de chorro en Colombia: Climatología y variabilidad durante las fases del ENSO. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, 23, 517–528.
- Poveda, G., & Mesa, Ó. J. (1996). Las fases extremas del fenómeno ENSO (El Niño y La Niña) y su influencia sobre la hidrología de Colombia. *Ingeniería Hidráulica En México*, 11, 21–37.
- Previdi, M., & Liepert, B. G. (2007). Annular modes and Hadley cell expansion under global warming. *Geophysical Research Letters*, 34(22). <https://doi.org/10.1029/2007GL031243>
- Reyer, C. P. O., Adams, S., Albrecht, T., Baarsch, F., Boit, A., Canales Trujillo, N., Carlsburg, M., Coumou, D., Eden, A., Fernandes, E., Langerwisch, F., Marcus, R., Mengel, M., Mira-Salama, D., Perette, M., Pereznieto, P., Rammig, A., Reinhardt, J., Robinson, A., ... Thonicke, K. (2017). Climate change impacts in Latin America and the Caribbean and their implications for development. *Regional Environmental Change*, 17(6), 1601–1621. <https://doi.org/10.1007/s10113-015-0854-6>
- Riahi, K., Rao, S., Krey, V., Cho, C., Chirkov, V., Fischer, G., Kindermann, G., Nakicenovic, N., & Rafaj, P. (2011). RCP 8.5-A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. *Climatic Change*, 109(1), 33–57. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0149-y>
- Rincón, E., Rendón, A. M., & Salazar, J. F. (2018). *Evaluación de la capacidad de los modelos climáticos del CMIP3 y CMIP5 para predecir El Niño y sus efectos sobre la precipitación en Colombia*. https://www.researchgate.net/publication/337059261_EVALUACION_DE_LA_CAPACIDAD_DE_LOS_MODELOS_CLIMATICOS_DEL_CMIP3_Y_CMIP5_PARA_PREDECIR_EL_NINO_Y_SUS_EFECTOS SOBRE_LA_PRECIPITACION_EN_COLOMBIA

- Rocha, V. M., Correia, F. W. S., da Silva, P. R. T., Gomes, W. B., Vergasta, L. A., de Moura, R. G., Trindade, M. da S. P., Pedrosa, A. L., & da Silva, J. J. S. (2017). Reciclagem de precipitação na bacia amazônica: O papel do transporte de umidade e da evapotranspiração da superfície. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 32(3), 387–398. <https://doi.org/10.1590/0102-77863230006>
- Roy, T., Martinez, J. A., Herrera-Estrada, J. E., Zhang, Y. U., Dominguez, F., Berg, A., Ek, M., & Wood, E. F. (2019). Role of Moisture Transport and Recycling in Characterizing Droughts: Perspectives from Two Recent U.S. Droughts and the CFSv2 System. *J. Hydrometeor.*, 20, 139–154. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-18-0159.1>
- Ruiz-Vásquez, M., Arias, P. A., Martínez, J. A., & Espinoza, J. C. (2020). Effects of Amazon basin deforestation on regional atmospheric circulation and water vapor transport towards tropical South America. *Climate Dynamics*, 54(9–10). <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05223-4>
- Ruiz, D., Moreno, H. A., Gutiérrez, M. E., & Zapata, P. A. (2008). Changing climate and endangered high mountain ecosystems in Colombia. *Science of the Total Environment*, 398(1–3), 122–132. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.02.038>
- Ruiz Vásquez, M., Arias, P. A., & Martínez, A. (2018). *Influencia del fenómeno ENSO en el transporte de humedad atmosférica hacia Colombia y norte de Suramérica: Importancia para eventos extremos*. <https://www.researchgate.net/publication/332350565>
- Rusticucci, M., Zazulie, N., & Raga, G. B. (2014). Regional winter climate of the southern central Andes: Assessing the performance of ERA-Interim for climate studies. *Journal of Geophysical Research*, 119(14), 8568–8582. <https://doi.org/10.1002/2013JD021167>
- Sakamoto, M. S., Ambrizzi, T., & Poveda, G. (2011). Moisture Sources and Life Cycle of Convective Systems over Western Colombia. *Advances in Meteorology*, 2011, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2011/890759>
- Salah, Z., Nieto, R., Drumond, A., Gimeno, L., & Vicente-Serrano, S. M. (2018). A Lagrangian analysis of the moisture budget over the Fertile Crescent during two intense drought episodes. *Journal of Hydrology*, 560, 382–395. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.03.021>
- Salazar, J. F., Villegas, J. C., Rendón, A. M., Rodríguez, E., Hoyos, I., Mercado-Bettín, D., & Poveda, G. (2018). Scaling properties reveal regulation of river flows in the Amazon through a “forest reservoir.” *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(3), 1735–1748. <https://doi.org/10.5194/hess-22-1735-2018>
- Samanta, D., Karnauskas, K. B., & Goodkin, N. F. (2019). Tropical Pacific SST and ITCZ Biases in Climate Models: Double Trouble for Future Rainfall Projections? *Geophysical Research Letters*, 46(4), 2242–2252. <https://doi.org/10.1029/2018GL081363>
- Sampaio, G., Borma, L. S., Cardoso, M., Alves, L. M., von Randow, C., Rodriguez, D. A., Nobre, C. A., & Alexandre, F. F. (2018). Assessing the possible impacts of a 4 °C or higher warming in Amazonia. In *Climate Change Risks in Brazil* (pp. 201–218). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-92881-4_8
- Sampaio, G., Nobre, C., Costa, M. H., Satyamurty, P., Soares-Filho, B. S., & Cardoso, M. (2007). Regional climate change over eastern Amazonia caused by pasture and soybean cropland expansion. *Geophysical Research Letters*, 34(17). <https://doi.org/10.1029/2007GL030612>
- Satyamurty, P., da Costa, C. P. W., & Manzi, A. O. (2013). Moisture source for the Amazon Basin: A study of

contrasting years. *Theoretical and Applied Climatology*, 111(1–2), 195–209. <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0637-7>

Schanze, J. J., Schmitt, R. W., & Yu, L. L. (2010). The global oceanic freshwater cycle: A state-of-the-art quantification. In *Journal of Marine Research* (Vol. 68).

Schoolmeester, T., Saravia, M., Andresen, M., Postigo, J., Valverde, A., Jurek, M., Alftan, B., & Giada, S. (2016). *Outlook on Climate Change Adaptation in the Tropical Andes mountains. Mountain Adaptation Outlook Series*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4311.1287>

Schwalm, C. R., Glendon, S., & Duffy, P. B. (2020). RCP8.5 tracks cumulative CO2 emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 117(33), 19656–19657. <https://doi.org/10.1073/PNAS.2007117117>

Schwendike, J., Berry, G. J., Reeder, M. J., Jakob, C., Govekar, P., & Wardle, R. (2015). Trends in the local Hadley and local Walker circulations. *Journal of Geophysical Research*, 120(15), 7599–7618. <https://doi.org/10.1002/2014JD022652>

Seidel, D. J., & Randel, W. J. (2007). Recent widening of the tropical belt: Evidence from tropopause observations. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 112(20). <https://doi.org/10.1029/2007JD008861>

Seiler, C., Hutjes, R. W. A., & Kabat, P. (2013a). Likely ranges of climate change in Bolivia. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52(6), 1303–1317. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-12-0224.1>

Seiler, C., Hutjes, R. W. A., & Kabat, P. (2013b). Climate variability and trends in Bolivia. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52(1), 130–146. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-12-0105.1>

Sena, A. C. T., & Magnusdottir, G. (2020). Projected End-of-Century Changes in the South American Monsoon in the CESM Large Ensemble. *Journal of Climate*, 33(18), 7859–7874. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0645.1>

Serreze, M. C., & Hurst, C. M. (2000). *Representation of Mean Arctic Precipitation from NCEP-NCAR and ERA Reanalyses*. <http://journals.ametsoc.org/jcli/article-pdf/13/1/182/3761763/1520-0442>

Shaw, T. A., & Tan, Z. (2018). Testing Latitudinally Dependent Explanations of the Circulation Response to Increased CO2 Using Aquaplanet Models. *Geophysical Research Letters*, 45(18), 9861–9869. <https://doi.org/10.1029/2018GL078974>

Shuttleworth, W. J. (1988). Evaporation from Amazonian rainforest. *Proceedings - Royal Society of London, Series B*, 233(1272), 321–346. <https://doi.org/10.1098/rspb.1988.0024>

Sierra, J. P., Arias, P. A., & Vieira, S. C. (2015). Precipitation over Northern South America and its seasonal variability as simulated by the CMIP5 models. *Advances in Meteorology*, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/634720>

Sierra, J. P., Arias, P. A., Vieira, S. C., & Agudelo, J. (2018). How well do CMIP5 models simulate the low-level jet in western Colombia? *Climate Dynamics*, 51(5–6), 2247–2265. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-4010-5>

Sillmann, J., Kharin, V. V., Zwiers, F. W., Zhang, X., & Bronaugh, D. (2013). Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: Part 2. Future climate projections. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*,

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

- Skansi, M. de los M., Brunet, M., Sigró, J., Aguilar, E., Arevalo Groening, J. A., Bentancur, O. J., Castellón Geier, Y. R., Correa Amaya, R. L., Jácome, H., Malheiros Ramos, A., Oria Rojas, C., Pasten, A. M., Sallons Mitro, S., Villaroel Jiménez, C., Martínez, R., Alexander, L. V., & Jones, P. D. (2013). Warming and wetting signals emerging from analysis of changes in climate extreme indices over South America. *Global and Planetary Change, 100*, 295–307. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.11.004>
- Sobel, A. H., & Camargo, S. J. (2011). Projected future seasonal changes in tropical summer climate. *Journal of Climate, 24*(2), 473–487. <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3748.1>
- Sörensson, A. A., & Ruscica, R. C. (2018). Intercomparison and Uncertainty Assessment of Nine Evapotranspiration Estimates Over South America. *Water Resources Research, 54*(4), 2891–2908. <https://doi.org/10.1002/2017WR021682>
- Sorí, R., Marengo, J. A., Nieto, R., Drumond, A., & Gimeno, L. (2018). The atmospheric branch of the hydrological cycle over the Negro and Madeira River Basins in the Amazon Region. *Water (Switzerland), 10*(6). <https://doi.org/10.3390/w10060738>
- Spracklen, D. V., Arnold, S. R., & Taylor, C. M. (2012). Observations of increased tropical rainfall preceded by air passage over forests. *Nature, 489*(7415), 282–285. <https://doi.org/10.1038/nature11390>
- Spracklen, D. V., & Garcia-Carreras, L. (2015). The impact of Amazonian deforestation on Amazon basin rainfall. *Geophysical Research Letters, 42*(21), 9546–9552. <https://doi.org/10.1002/2015GL066063>
- Staten, P. W., Lu, J., Grise, K. M., Davis, S. M., & Birner, T. (2018). Re-examining tropical expansion. In *Nature Climate Change* (Vol. 8, Issue 9, pp. 768–775). Nature Publishing Group. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0246-2>
- Stickler, C. M., Coe, M. T., Costa, M. H., Nepstad, D. C., McGrath, D. G., Dias, L. C. P., Rodrigues, H. O., & Soares-Filho, B. S. (2013). Dependence of hydropower energy generation on forests in the Amazon Basin at local and regional scales. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 110*(23), 9601–9606. <https://doi.org/10.1073/pnas.1215331110>
- Stojanovic, M., Drumond, A., Nieto, R., & Gimeno, L. (2017). Moisture transport anomalies over the Danube River basin during two drought events: A Lagrangian analysis. *Atmosphere, 8*(10). <https://doi.org/10.3390/atmos8100193>
- Studholme, J., & Gulev, S. (2018). Concurrent changes to hadley circulation and the meridional distribution of tropical cyclones. *Journal of Climate, 31*(11), 4367–4389. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0852.1>
- Taylor, K. E. (2001). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research Atmospheres, 106*(D7), 7183–7192. <https://doi.org/10.1029/2000JD900719>
- Taylor, K. E., Stouffer, R. J., & Meehl, G. A. (2012). An overview of CMIP5 and the experiment design. In *Bulletin of the American Meteorological Society* (Vol. 93, Issue 4, pp. 485–498). <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>
- Tian, B. (2015). Spread of model climate sensitivity linked to double-Intertropical Convergence Zone bias.

Geophysical Research Letters, 42(10), 4133–4141. <https://doi.org/10.1002/2015GL064119>

- Tian, B., & Dong, X. (2020). The Double-ITCZ Bias in CMIP3, CMIP5, and CMIP6 Models Based on Annual Mean Precipitation. *Geophysical Research Letters*, 47(8). <https://doi.org/10.1029/2020GL087232>
- Toreti, A., Naveau, P., Zampieri, M., Schindler, A., Scoccimarro, E., Xoplaki, E., Dijkstra, H. A., Gualdi, S., & Luterbacher, J. (2013). Projections of global changes in precipitation extremes from Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 models. *Geophysical Research Letters*, 40(18), 4887–4892. <https://doi.org/10.1002/grl.50940>
- Trenberth, K. E. (2011). Changes in precipitation with climate change. *Climate Research*, 47(1–2), 123–138. <https://doi.org/10.3354/cr00953>
- Trenberth, K. E., Fasullo, J. T., & Mackaro, J. (2011). Atmospheric moisture transports from ocean to land and global energy flows in reanalyses. *Journal of Climate*, 24(18), 4907–4924. <https://doi.org/10.1175/2011JCLI4171.1>
- Trenberth, K. E., Fasullo, J. T., & Shepherd, T. G. (2015). Attribution of climate extreme events. In *Nature Climate Change* (Vol. 5, Issue 8, pp. 725–730). Nature Publishing Group. <https://doi.org/10.1038/nclimate2657>
- Trenberth, K. E., Smith, L., Qian, T., Dai, A., & Fasullo, J. (2007). Estimates of the global water budget and its annual cycle using observational and model Data. In *Journal of Hydrometeorology* (Vol. 8, Issue 4, pp. 758–769). <https://doi.org/10.1175/JHM600.1>
- Tuinenburg, O. A., & Staal, A. (2020). Tracking the global flows of atmospheric moisture and associated uncertainties. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(5), 2419–2435. <https://doi.org/10.5194/hess-24-2419-2020>
- Tuinenburg, O. A., Theeuwens, J. J. E., & Staal, A. (2020). *High-resolution global atmospheric moisture connections from evaporation to precipitation*. <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.912710>
- Utsumi, N., Seto, S., Kanae, S., Maeda, E. E., & Oki, T. (2011). Does higher surface temperature intensify extreme precipitation? *Geophysical Research Letters*, 38(16). <https://doi.org/10.1029/2011GL048426>
- Vallis, G. K., Zurita-Gotor, P., Cairns, C., & Kidston, J. (2015). Response of the large-scale structure of the atmosphere to global warming. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 141(690), 1479–1501. <https://doi.org/10.1002/qj.2456>
- Van Der Ent, R. J., Savenije, H. H. G., Schaefli, B., & Steele-Dunne, S. C. (2010). Origin and fate of atmospheric moisture over continents. *Water Resources Research*, 46(9). <https://doi.org/10.1029/2010WR009127>
- Van Der Ent, R. J., Tuinenburg, O. A., Knoche, H.-R., Kunstmann, H., & Savenije, H. H. G. (2013). Should we use a simple or complex model for moisture recycling and atmospheric moisture tracking? *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 10(5), 6723–6764. <https://doi.org/10.5194/hessd-10-6723-2013>
- van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G. C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J. F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S. J., & Rose, S. K. (2011). The representative concentration pathways: An overview. *Climatic Change*, 109(1), 5–31. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>

- Vázquez, M., Algarra, I., Eiras-Barca, J., Ramos, A. M., Nieto, R., & Gimeno, L. (2018). Atmospheric rivers over the Arctic: Lagrangian characterisation of their moisture sources. *Water (Switzerland)*, *11*(1). <https://doi.org/10.3390/w11010041>
- Vizy, E. K., & Cook, K. H. (2016). Understanding long-term (1982–2013) multi-decadal change in the equatorial and subtropical South Atlantic climate. *Climate Dynamics*, *46*(7–8), 2087–2113. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2691-1>
- Vuille, M., Franquist, E., Garreaud, R., Lavado Casimiro, W. S., & Cáceres, B. (2015). Impact of the global warming hiatus on Andean temperature. *Journal of Geophysical Research*, *120*(9), 3745–3757. <https://doi.org/10.1002/2015JD023126>
- Wang, X., Zhang, K., Wu, S., Fan, S., & Cheng, Y. (2016). Water vapor-weighted mean temperature and its impact on the determination of precipitable water vapor and its linear trend. *Journal of Geophysical Research*, *121*(2), 833–852. <https://doi.org/10.1002/2015JD024181>
- Warner, M. D., Mass, C. F., & Salathé, E. P. (2015). Changes in winter atmospheric rivers along the North American west coast in CMIP5 climate models. *Journal of Hydrometeorology*, *16*(1), 118–128. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-14-0080.1>
- WCRP. (2019). *World Climate Research Programme*. <https://cmip.llnl.gov/cmip5/index.html>
- Weng, W., Luedeke, M., Zemp, D., Lakes, T., & Kropp, J. (2018). Aerial and surface rivers: Downwind impacts on water availability from land use changes in Amazonia. *Hydrology and Earth System Sciences*, *22*(1), 911–927. <https://doi.org/10.5194/hess-22-911-2018>
- Westra, S., Fowler, H. J., Evans, J. P., Alexander, L. V., Berg, P., Johnson, F., Kendon, E. J., Lenderink, G., & Roberts, N. M. (2014). Future changes to the intensity and frequency of short-duration extreme rainfall. In *Reviews of Geophysics* (Vol. 52, Issue 3, pp. 522–555). Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1002/2014RG000464>
- Wild, M., Grieser, J., & Schär, C. (2008). Combined surface solar brightening and increasing greenhouse effect support recent intensification of the global land-based hydrological cycle. *Geophysical Research Letters*, *35*(17). <https://doi.org/10.1029/2008GL034842>
- Yin, L., Fu, R., Shevliakova, E., & Dickinson, R. E. (2013). How well can CMIP5 simulate precipitation and its controlling processes over tropical South America? *Climate Dynamics*, *41*(11–12), 3127–3143. <https://doi.org/10.1007/s00382-012-1582-y>
- Zemp, D. C., Schleussner, C. F., Barbosa, H. M. J., Hirota, M., Montade, V., Sampaio, G., Staal, A., Wang-Erlandsson, L., & Rammig, A. (2017). Self-amplified Amazon forest loss due to vegetation-atmosphere feedbacks. *Nature Communications*, *8*. <https://doi.org/10.1038/ncomms14681>
- Zemp, D. C., Schleussner, C. F., Barbosa, H. M. J., Van Der Ent, R. J., Donges, J. F., Heinke, J., Sampaio, G., & Rammig, A. (2014). On the importance of cascading moisture recycling in South America. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *14*(23), 13337–13359. <https://doi.org/10.5194/acp-14-13337-2014>
- Zhang, J., & Zhao, T. (2019). Historical and future changes of atmospheric precipitable water over China simulated by CMIP5 models. *Climate Dynamics*, *52*(11), 6969–6988. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4559-7>

- Zhang, X., Liu, H., & Zhang, M. (2015). Double ITCZ in Coupled Ocean-Atmosphere Models: From CMIP3 to CMIP5. *Geophysical Research Letters*, 42(20), 8651–8659. <https://doi.org/10.1002/2015GL065973>
- Zhang, Yi, & Fueglistaler, S. (2019). Mechanism for Increasing Tropical Rainfall Unevenness With Global Warming. *Geophysical Research Letters*, 46(24), 14836–14843. <https://doi.org/10.1029/2019GL086058>
- Zhang, Yongqiang, Chiew, F. H. S., Peña-Arancibia, J., Sun, F., Li, H., & Leuning, R. (2017). Global variation of transpiration and soil evaporation and the role of their major climate drivers. *Journal of Geophysical Research*, 122(13), 6868–6881. <https://doi.org/10.1002/2017JD027025>
- Zhang, Yongqiang, Peña-Arancibia, J. L., McVicar, T. R., Chiew, F. H. S., Vaze, J., Liu, C., Lu, X., Zheng, H., Wang, Y., Liu, Y. Y., Miralles, D. G., & Pan, M. (2016). Multi-decadal trends in global terrestrial evapotranspiration and its components. *Scientific Reports*, 6. <https://doi.org/10.1038/srep19124>
- Zhou, Sha, Yu, B., Zhang, Y., Huang, Y., & Wang, G. (2016). Partitioning evapotranspiration based on the concept of underlying water use efficiency. *Water Resources Research*, 52(2), 1160–1175. <https://doi.org/10.1002/2015WR017766>
- Zhou, Shijie, Huang, G., & Huang, P. (2020). Excessive ITCZ but Negative SST Biases in the Tropical Pacific Simulated by CMIP5/6 Models: The Role of the Meridional Pattern of SST Bias. *Journal of Climate*, 33(12), 5305–5316. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-19-0922.1>
- Zubler, E. M., Fischer, A. M., Fröb, F., & Liniger, M. A. (2016). Climate change signals of CMIP5 general circulation models over the Alps – impact of model selection. *International Journal of Climatology*, 36(8), 3088–3104. <https://doi.org/10.1002/joc.4538>