

PROYECCIONES FUTURAS DE PATRONES DE CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA DE BAJO NIVEL SOBRE EL SUR DE SUDAMÉRICA TROPICAL: IMPACTOS EN LA PRECIPITACIÓN Y LA DURACIÓN DE LA TEMPORADA SECA DEL AMAZONAS

Jhoana Agudelo^{1,2,3}, Jhan Carlo Espinoza¹,
Clementine Junquas^{1,3}, Paola A. Arias²,
Juan Pablo Sierra^{1,4} y Matías E. Olmo^{5,6}

¹ Univ. Grenoble Alpes, IRD, CNRS, Grenoble INP, IGE, Grenoble, France

² Grupo de Ingeniería y Gestión Ambiental (GIGA), Escuela Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

³ Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), Lima, Perú

⁴ LMD/IPSL, École Polytechnique, Institut Polytechnique de Paris, ENS, PSL Research University, Sorbonne Université, CNRS, Palaiseau, France

⁵ Department of Atmospheric and Ocean Sciences, Faculty of Exact and Natural Sciences, University of Buenos Aires (DCAO-FCEN-UBA), Buenos Aires, Argentina

⁶ Barcelona Supercomputing Center, Barcelona, Spain



Jhoana Agudelo es magíster en Ingeniería Ambiental por la Universidad de Antioquia, Colombia. Actualmente, se encuentra en su tercer año de estudios doctorales en la Universidad de Grenoble Alpes en

Francia. Sus intereses de investigación abarcan una variedad de temas, incluyendo cambio climático, variabilidad climática, circulación y transporte de humedad atmosférica en Sudamérica tropical.

Palabras clave: Patrones de circulación atmosférica, cambio climático, Sudamérica tropical sur, alargamiento de la temporada seca

Citar como Agudelo, J., Espinoza, J-C., Junquas, C., Arias, P., Sierra, J-P. & Olmo, M. (2024). Proyecciones futuras de patrones de circulación atmosférica de bajo nivel sobre el sur de Sudamérica tropical: impactos en la precipitación y la duración de la temporada seca del Amazonas. *Boletín científico El Niño*, Instituto Geofísico del Perú, vol. 11 n.º 12, págs. 4-12.

¿Cuál es la **contribución** de esta investigación para tomadores de decisiones?*

Los tomadores de decisiones deben implementar estrategias para mitigar los impactos del alargamiento de la estación seca en el sur de la Amazonía con el cambio climático, con 19 % más de días secos en los próximos 50 años. El retraso del inicio y adelanto del final del sistema monzónico sudamericano (SAMS) afectaría navegación, pesca, agricultura en la Amazonía y podría causar la pérdida de bosque y humedad que este aporta a la atmósfera, con efectos cascada hacia los Andes y la costa peruana. Es clave integrar información científica en la planificación y fortalecer políticas contra la deforestación y las emisiones de gases de efecto invernadero.

Resumen

El sur de la Amazonía muestra un alargamiento de la estación seca debido al retraso en el inicio del sistema monzónico sudamericano (SAMS, por sus siglas en inglés). Mediante el reconocimiento de patrones de circulación atmosférica (CPs), se evaluaron los cambios proyectados del periodo histórico (1970-2000) al futuro (2040-2070), según seis modelos de circulación general (GCM, por sus siglas en inglés) de la sexta fase del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP6). Las proyecciones indican cambios significativos en los CPs asociados a la estación seca, a razón de un inicio tardío y una desaparición temprana del SAMS. La frecuencia de días secos en la Amazonía aumentaría en promedio un 19 %, y se prevé un incremento en la frecuencia de CPs secos al inicio y fin de las temporadas de transición.

1. Introducción

Sudamérica tropical sur (STSA, por sus siglas en inglés) se define como la región comprendida entre 10° N y 30° S, y 90° O y 30° O, incluyendo, entre otros ecosistemas, los Andes tropicales y la cuenca del Amazonas. Esta región alberga la mayor cuenca hidrográfica del mundo y un ecosistema dinámico que abarca zonas de Brasil, Perú, Bolivia, Colombia, Ecuador, Venezuela, Guyana y Surinam (Nobre et al., 2009). Así, STSA es una región importante para el estudio de la hidroclimatología regional y global debido a las múltiples interacciones entre biomas, superficie terrestre y procesos atmosféricos (Marengo et al., 2018; Sousa et al., 2022).

Por otro lado, el sistema monzónico sudamericano (SAMS, por sus siglas en inglés) es uno de los componentes clave en la determinación de la dinámica climática regional, a lo cual debe añadirse su rol como impulsor determinante de la temporada de lluvias en la región (Arias et al., 2015; Marengo et al., 2012; Vera et al., 2006).

Durante las últimas décadas, STSA, principalmente el sur de la Amazonía (alrededor de 5°-15° S y 70°-50° O), ha experimentado un alargamiento de la estación seca relacionado con un retraso en el inicio del SAMS (Arias et al., 2015; Espinoza et al., 2019; Fu et al., 2013).

Utilizando un marco de reconocimiento de patrones de

tipificación meteorológica o patrones de circulación atmosférica (CPs, por sus siglas en inglés), es posible investigar los regímenes diarios de circulación atmosférica sobre STSA. Los CPs suelen definirse como estados atmosféricos recurrentes y potencialmente predecibles que pueden relacionarse con variables locales, como la precipitación o la temperatura (Bettolli et al., 2010; Moron et al., 2008; Solman y Menéndez, 2003).

El uso del enfoque de CPs puede ser una metodología atractiva para evaluar las simulaciones de los modelos climáticos globales y regionales, ya que la circulación atmosférica está generalmente mejor representada por los modelos climáticos que por la precipitación (Ban et al., 2021; Flato et al., 2013; Pichelli et al., 2021). En este sentido, el objetivo principal del presente estudio es identificar los cambios proyectados en la circulación regional de bajo nivel en STSA bajo un escenario de cambio climático. Para ello, utilizamos los modelos identificados por Olmo et al. (2022), los cuales consideramos como los mejores para simular la dinámica de los CPs sobre STSA. Para identificar los cambios futuros, utilizamos proyecciones de modelos bajo el escenario SSP3-7.0, con emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) altas (Riahi et al., 2017). En particular, nos centramos en analizar los cambios de los CPs en la estación seca y en la estación de transición de la época seca a la húmeda durante mediados del siglo XXI. Este estudio tiene como objetivo investigar si el alargamiento observado de la estación seca en STSA también se proyecta en futuras simulaciones de los GCM. Además, pretende explorar los mecanismos físicos asociados con este proceso, centrándose especialmente en la circulación regional de bajo nivel.

2. Datos y métodos

2.1 Datos de referencia

2.1.1 Datos atmosféricos

Se utilizó el reanálisis climatológico ERA5 para analizar la circulación atmosférica de bajo nivel (850 hPa) a partir del viento diario zonal y meridional sobre Sudamérica tropical sur (STSA) durante el periodo 1970-2000. Para comparar los datos de ERA5 con los resultados de los diferentes GCM seleccionados, los datos medios diarios se interpolan bilinealmente a una cuadrícula de 1.0° × 1.0° de resolución.

2.1.2 Datos de precipitación

Se utilizó el conjunto de datos Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Stations (CHIRPS; Funk et al., 2014) para analizar la variabilidad de las precipitaciones y su relación con los CPs sobre STSA durante el periodo 1981-2000. Mediante una interpolación bilineal, estos datos se ajustaron a una resolución espacial de $1.0^\circ \times 1.0^\circ$ para compararlos con los resultados históricos de los GCM.

2.2 Modelos de circulación general (GCM)

Se consideraron los seis GCM seleccionados como los mejores para representar los CPs en STSA, según Olmo et al. (2022) (ver Tabla 1), utilizando los vientos diarios zonales y meridionales a 850 hPa sobre STSA durante los periodos 1970-2000 (histórico) y 2040-2070 (futuro, bajo el escenario SSP3-7.0).

2.3 Duración de la temporada seca

El presente estudio se centra en el análisis de la estación seca (llegada, final y duración) identificada en la región comprendida entre 5° y 15° S, y 50° y 70° O. Para estimar las fechas anuales de inicio de

la temporada seca (DSA, por sus siglas en inglés) y de final de la temporada seca (DSE, por sus siglas en inglés), utilizamos la metodología desarrollada por Li y Fu (2004).

2.4 Definición de patrones de circulación

Se utilizó la metodología de reconocimiento de patrones de tipificación meteorológica o patrones de circulación atmosférica (CPs) descrita por Espinoza et al. (2021) para STSA. Espinoza et al. (2021) identificaron y caracterizaron nueve CPs a partir de las anomalías estandarizadas de los vientos zonales y meridionales a 850 hPa sobre la región 10° N- 30° S y 90° - 30° O. Los vientos horizontales a 850 hPa han demostrado ser adecuados para la descripción de las principales características de la circulación atmosférica de bajo nivel en la región de Sudamérica tropical sur (Paccini et al., 2018). Las anomalías estandarizadas del viento se calcularon utilizando la media climatológica diaria a largo plazo y su desviación estándar, y luego se agruparon sin ningún filtro de tiempo. Este enfoque proporciona una visión general a gran escala de la variabilidad atmosférica al considerar todas las escalas temporales, desde la diaria hasta la decadal, incluidas las tendencias a largo plazo (Espinoza et al., 2021).

Tabla 1. Modelos de circulación general (GCM) CMIP6 utilizados en el presente estudio para las simulaciones históricas (1970-2000) y futuras (2040-2070).

GCM	Resolución horizontal	Institución	Referencia
ACCESS-ESM1-5	$1.9^\circ \times 1.2^\circ$	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO), Australia	Ziehn et al. (2020)
CanESM5	$2.8^\circ \times 2.8^\circ$	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, Canada	Swart et al. (2019)
CESM2	$1.2^\circ \times 0.9^\circ$	National Center for Atmospheric Research (NCAR), USA	Danabasoglu et al. (2019)
IPSL-CM6A-LR	$2.5^\circ \times 1.3^\circ$	Institut Pierre-Simon Laplace, France	Boucher et al. (2020)
MPI-ESM1-2-HR	$0.9^\circ \times 0.9^\circ$	Max Planck Institute for Meteorology, Germany	Müller et al. (2018)
NorESM2-MM	$0.9^\circ \times 1.2^\circ$	Norwegian Climate Centre, Norway	Bentsen et al. (2013)

3. Resultados y discusiones

3.1 Identificación de CPs históricos y futuros

La variabilidad de la circulación atmosférica regional de bajo nivel se resume en nueve CPs que pueden entenderse como estados atmosféricos preferentes a lo largo del año (Figura 1). Por su parte, la Figura 2 muestra la frecuencia media diaria relativa de los nueve CPs en STSA, según el reanálisis climatológico ERA5, y los seis GCM para simulaciones históricas y

futuras. Los GCM analizados muestran un claro ciclo estacional en la frecuencia relativa de CPs durante el periodo histórico (Figura 2). Los ciclos anuales de las CPs simulados por cada modelo para mediados del siglo XXI muestran un aumento en las frecuencias de las CPs invernales (W1, W2 y W3; en colores cálidos) durante la temporada seca del sur de la Amazonía (Figura 2). Para cinco de los seis modelos estudiados (excepto el modelo global CanESM5), los CP W1, W2 y W3 aparecen antes en el año (marzo, en lugar de abril) y prolongan su aparición hasta finales de noviembre (en lugar de finales de octubre) en comparación con las simulaciones históricas.

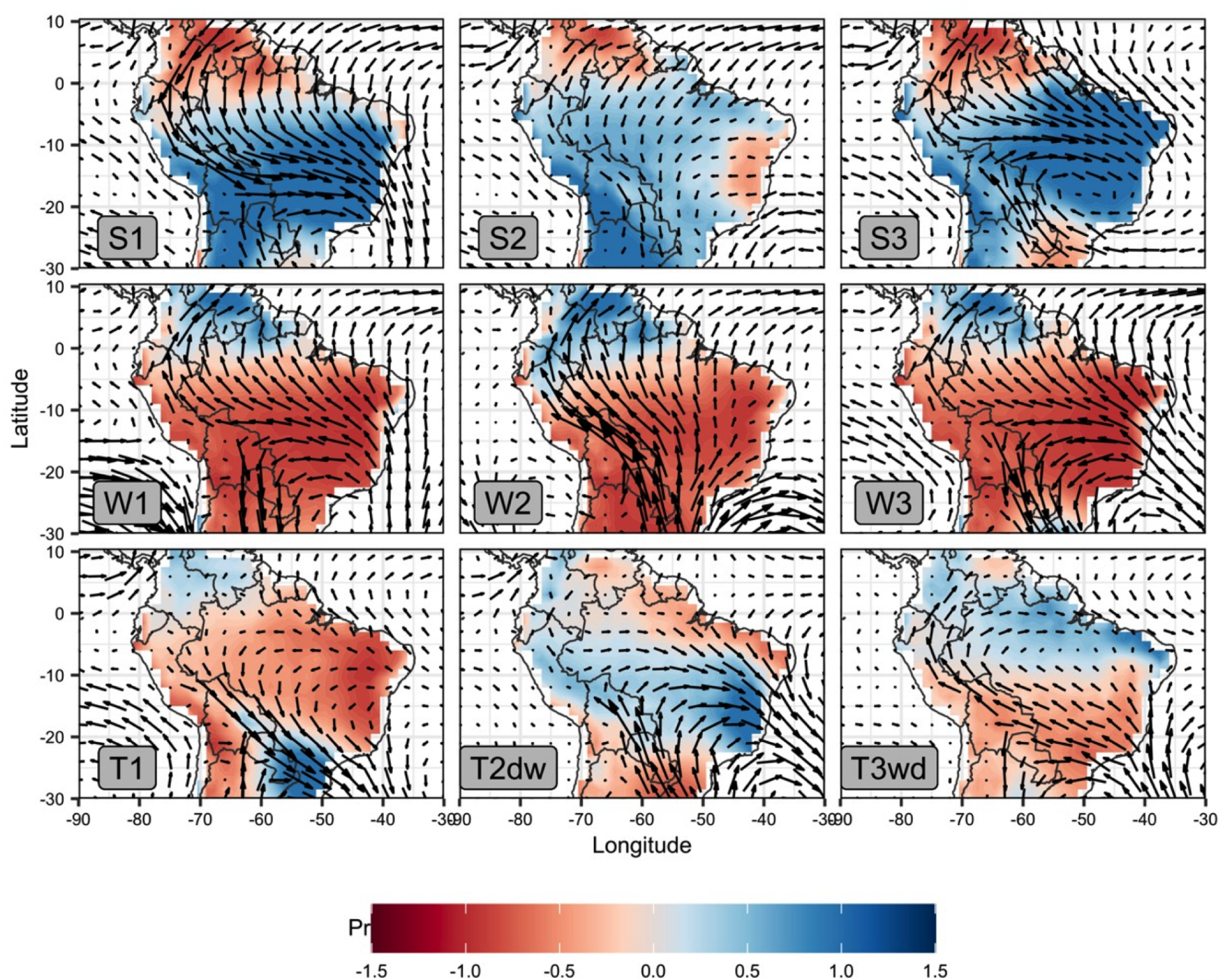


Figura 1. Patrones espaciales de precipitación y anomalías de viento (en mm/día y m/s, respectivamente) para los nueve patrones de circulación (CPs) en Sudamérica Tropical Sur, según el reanálisis climatológico ERA5. Este análisis permite identificar nueve CPs: tres CPs invernales (W1, W2 y W3), tres CPs de verano (S1, S2 y S3) y tres CPs de transición (T1 y T2dw, principalmente para la transición de la estación seca a la húmeda, y T3wd para la transición de la temporada húmeda a la seca). Los vectores indican las anomalías del viento a 850 hPa, mientras que los colores sombreados se refieren a las anomalías de precipitación usando el conjunto de datos CHIRPS.

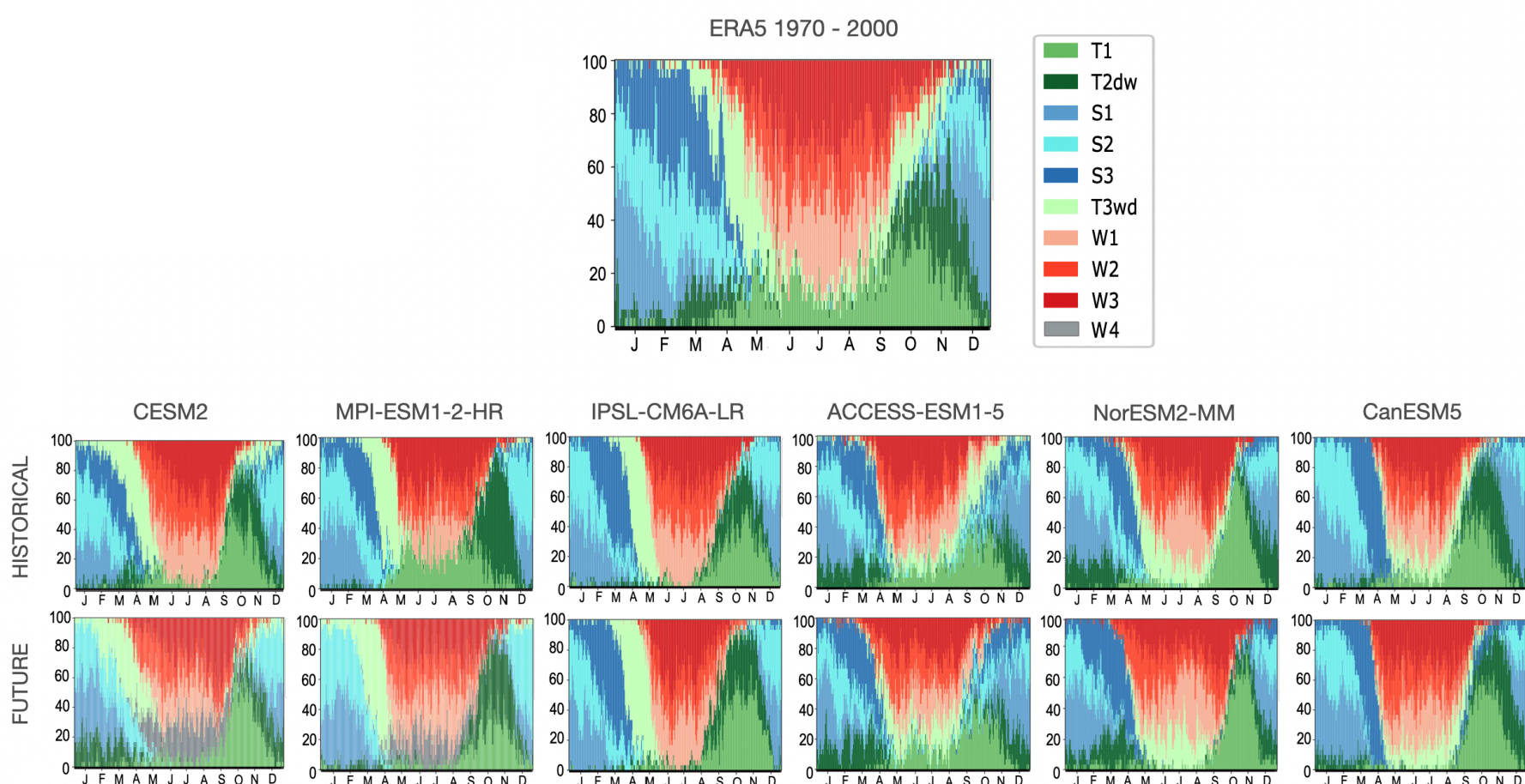


Figura 2. Ciclo anual de la frecuencia diaria relativa de los nueve CPs en STSA, según el reanálisis climatológico ERA5, y los seis GCM para simulaciones históricas y futuras. El eje "x" muestra los 365 días del año, mientras que el eje "y" indica el promedio de la frecuencia diaria relativa de cada CPs.

3.2 Proyecciones futuras del alargamiento de la temporada seca a partir de los CPs

Para comprender cómo pueden cambiar los CPs bajo el escenario SSP3-7.0 (Shared Socioeconomic Pathways 3-70, por sus siglas en inglés), la Figura 3 muestra la frecuencia media relativa de las CPs durante mediados del siglo XXI, correspondiente a dos CPs de invierno (W2 y W3) y dos de transición (T1 y T2dw), tanto para las simulaciones históricas (línea azul) como para las futuras (línea roja). Estos CPs, en particular, fueron seleccionados debido a su relevancia durante la ocurrencia de la estación seca (Espinoza et al., 2021). W2 y W3, como indicadores del periodo seco, pueden ofrecer información valiosa sobre la duración de la temporada seca. Por el contrario, T1 y T2 están asociados con el inicio del monzón, lo que significa el comienzo de la temporada de lluvias (es decir, el DSE). Cabe señalar que SSP3-7.0 es el cuarto escenario socioeconómico global proyectado para el 2100 de cinco establecidos para el futuro del clima, donde las emisiones de CO₂ se duplican respecto a los niveles actuales (Welch, [2024]).

De la Figura 3 es posible notar que el CP W2

proyectado muestra mayores frecuencias durante abril, mayo y junio en comparación con la simulación histórica para los modelos CESM2, MPI-ESM1-2-HR, NorESM2-MM y CanESM5 (columna izquierda de la Figura 3). Esto sugiere una mayor frecuencia de días con condiciones más secas al principio de la estación seca (entre el 10 % y el 20 %), lo que puede favorecer una transición más brusca de la época húmeda a la seca en esta región. El CP W3 proyectado presenta frecuencias crecientes al final del año para todos los modelos considerados, excluyendo el modelo IPSL-CM6A-LR. Específicamente, este CP, asociado a condiciones secas, ocurre no solo durante el invierno, sino también durante la temporada de octubre y noviembre (transición de seco a húmedo), lo que podría favorecer un inicio tardío del SAMS y, por extensión, un DSE retrasado.

Los CPs T1 y T2dw tienen un ligero retraso en su aparición en septiembre y octubre en el futuro, comparado con el pasado, lo que sugiere un inicio tardío del SAMS y la estación lluviosa en la Amazonía sur. El promedio multimodelo revela una aparición más temprana de W2 en el futuro, con un aumento leve de W3 en octubre-noviembre.

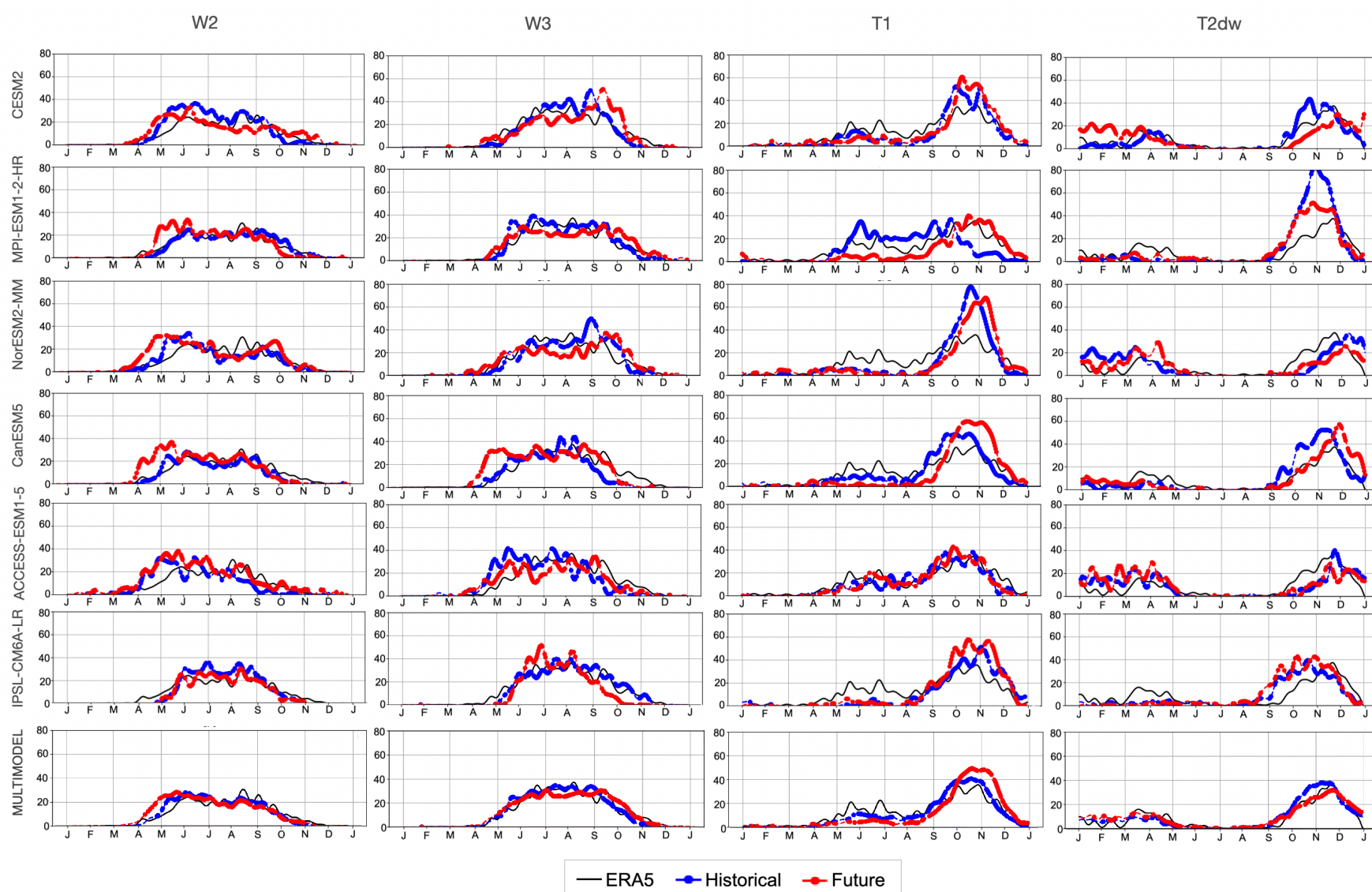


Figura 3. Promedio de frecuencia diaria relativa de los patrones de circulación (CPs) de invierno (W2, W3) y de transición (T1 y T2dw), definido a partir del análisis de agrupación de k-medias para los seis GCM durante los periodos histórico y futuro (líneas azul y roja, respectivamente). La línea de referencia dada por el reanálisis climatológico ERA5 para los mismos años del periodo histórico (1970-2000) se presenta en color negro. El eje "x" muestra los 365 días del año, mientras que el eje "y" indica el promedio de la frecuencia diaria relativa de cada CPs.

3.3 Cambios futuros en el ciclo anual de precipitaciones y en la duración de la estación seca

La Figura 4 ilustra una estimación del ciclo anual de la precipitación sobre la región sur de la Amazonía, calculada para cada modelo durante los periodos histórico y futuro. Los modelos ACCESS-ESM1-5 y MPI-ESM1-2-HR muestran la mejor representación del ciclo anual de la precipitación durante el periodo histórico (línea azul) en comparación con los datos obtenidos a través del dataset CHIRPS (línea gris). Modelos como CanESM5, CESM2 y NorESM2-MM subestiman la precipitación durante la temporada seca (es decir, el invierno austral: junio-julio-agosto [JJA]) y la transición a la temporada húmeda (septiembre-octubre-noviembre [SON]) para el periodo histórico. El modelo IPSL-CM6A-LR (Figura 4d) simula adecuadamente la precipitación durante la estación seca, pero la subestima significativamente durante el verano austral (diciembre-enero-febrero: DJF, por sus siglas en inglés). Este modelo también

muestra el cambio más pequeño en el ciclo anual de la precipitación entre los periodos histórico y futuro. A excepción del modelo IPSL-CM6A-LR, el resto de modelos muestran una reducción importante de las precipitaciones durante la estación de transición de la temporada seca a la húmeda (SON) para las proyecciones futuras (línea roja), lo que coincide con la media multimodelo (Figura 4g).

La pentada climatológica que marca el inicio (DSA) y fin (DSE) de la temporada seca se muestra en la Tabla 2 (columnas 1 y 2, respectivamente), también señalada con puntos en la Figura 4. Además, la duración promedio de la estación seca se presenta en la tercera columna de la Tabla 2, tanto para el periodo histórico como para el futuro. Como referencia, en el caso de los datos CHIRPS, las fechas DSA y DSE se producen durante las pentadas 19 y 60, respectivamente. Esto sugiere que, en promedio, la estación seca abarca, aproximadamente, del 5 de abril al 27 de octubre para este conjunto de datos de referencia.

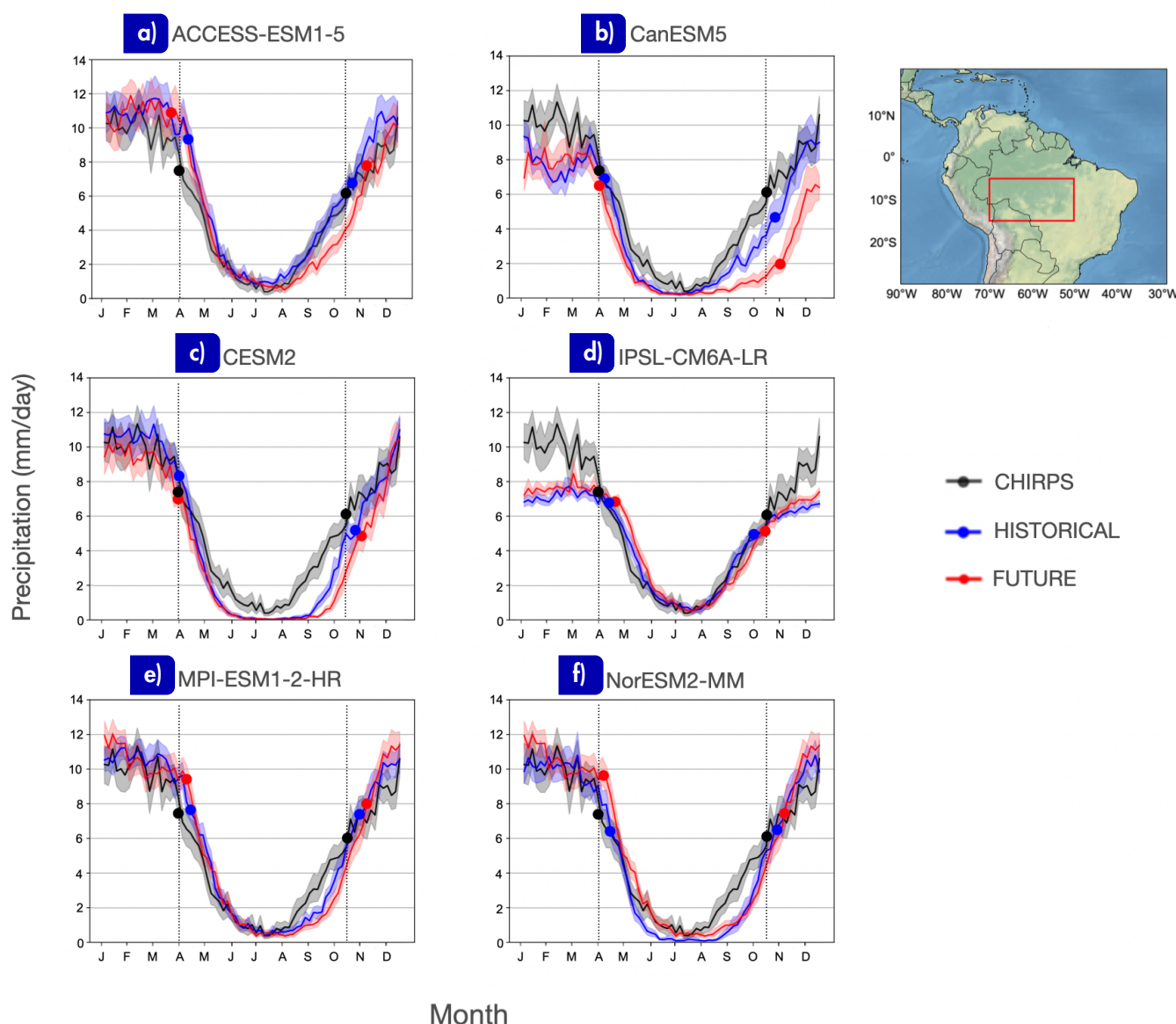


Figura 4. Ciclos anuales de precipitación sobre el sur de la Amazonía (5°-15° S y 50°-70° O; rectángulo rojo), expresados en mm/día y suavizados utilizando una ventana móvil de cinco días (pentada). La línea gris indica el conjunto de datos de referencia CHIRPS durante el periodo 1981-2000, mientras que la línea azul (roja) indica el ciclo anual climatológico simulado para el periodo histórico (futuro) por los diferentes GCM: (a) ACCESS-ESM1-5, (b) CanESM5, (c) CESM2, (d) IPSL-CM6A-LR, (e) MPI-ESM1-HR y (f) NorESM2-MM. Las sombras muestran la envolvente de la incertidumbre utilizando *bootstrapping*, con un intervalo de confianza del 95 %. Las fechas climatológicas de inicio (DSA) y fin (DSE) de la temporada seca se resaltan en círculos.

Tabla 2. Pentada correspondiente al inicio (DSA), final (DSE) y duración de la estación seca (DSL) en el periodo histórico (1970-2000) y el cambio proyectado para el futuro (2040-2070), así como su desviación estándar. El color gris indica cambios estadísticamente significativos según la prueba t ($p < 0.05$). La DSL corresponde a la diferencia entre DSE y DSA.

	DSA		DSE		DSL	
	1970-2000	2040-2070	1970-2000	2040-2070	1970-2000	2040-2070
ACCESS-ESM1-5	20 ± 1.7	-2 ± 1.6	61 ± 2.1	+2 ± 1.7	41 ± 3.2	+4 ± 2.8
CanESM5	20 ± 1.1	-1 ± 1.4	62 ± 0.7	+1 ± 1.7	42 ± 0.9	+2 ± 2.1
CESM2	19 ± 1.9	0 ± 2.1	62 ± 0.8	+1 ± 1.4	43 ± 1.1	+2 ± 2.5
IPSL-CM6A-LR	22 ± 1.7	+1 ± 1.1	57 ± 2.0	+3 ± 2.1	35 ± 2.4	+1 ± 2.6
MPI-ESM1-2-HR	21 ± 1.8	-1 ± 2.0	62 ± 1.8	+1 ± 1.6	41 ± 2.3	+2 ± 2.5
NorESM2-MM	21 ± 1.7	-1 ± 2.2	62 ± 1.8	+1 ± 1.9	41 ± 2.8	+2 ± 2.8

CHIRPS (1981-2000) 19 ± 1.7

60 ± 1.2

La Tabla 2 indica que todos los modelos muestran un aumento proyectado en la duración de la temporada seca (DSL). Este aumento se debe a un retraso en el inicio de la estación de lluvias (de 5 a 15 días en todos los modelos) y a un ligero adelanto en el final de la misma (de 5 a 10 días en cuatro de seis modelos). En particular, el modelo ACCESS-ESM1-5 muestra una prolongación de la temporada seca en veinte días. Los demás modelos indican un aumento de 5 a 10 días en la duración de la temporada seca.

4. Observaciones finales

Nuestro estudio contribuye a reducir la incertidumbre en la predicción del inicio y fin de la estación seca en el sur de la Amazonía por dos razones principales: (1) utilizamos modelos que capturan adecuadamente los mecanismos relacionados con el inicio de la temporada seca y (2) exploramos los factores que prolongan esta temporada mediante un enfoque de patrones de circulación, el cual ofrece una mejor simulación que la precipitación. Dado el aumento esperado de las condiciones secas en la región y los posibles impactos de la deforestación en el ciclo de precipitación, es crucial realizar más investigaciones. Es importante comprender cómo un retraso en el inicio de la estación húmeda en el sur de la Amazonía puede afectar los patrones de precipitación en las regiones adyacentes.

Referencias

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), 3183-3203. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2533-1>

Ban, N., Caillaud, C., Coppola, E., Pichelli, E., Sobolowski, S., Adinolfi, M., Ahrens, B., Alias, A., Anders, I., Bastin, S., Belušić, D., Berthou, S., Brisson, E., Cardoso, R. M., Chan, S. C., Christensen, O. B., Fernández, J., Fita, L., Frisius, T., ... Zander, M. J. (2021). The first multi-model ensemble of regional climate simulations at kilometer-scale resolution, part I: evaluation of precipitation. *Climate Dynamics*, 57(1-2), 275-302. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05708-w>

Bettolli, M. L., Penalba, O. C., & Vargas, W. M. (2010). Synoptic weather types in the south of South America and their relationship to daily rainfall in the core crop-producing region in Argentina. *Australian meteorological and oceanographic journal*, 60(1), 37-48, <https://doi.org/10.22499/2.6001.004>

Espinoza, J. C., Ronchail, J., Marengo, J., & 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>

Espinoza, J. C., Arias, P., Moron, V., Junquas, C., Segura, H., Sierra-Pérez, J., Wongchuig, S., & Condom, T. (2021). Recent changes in the atmospheric circulation patterns during the dry-to-wet transition season in south tropical South America (1979–2020): Impacts on precipitation and fire season. *Journal of Climate*, 34(22), 9025–9042. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-21-0303.1>

Flato, G., Marotzke, J., Abiodun, B., Braconnot, P., Chou, S. C., Collins, W., Cox, P., Driouech, F., Emori, S., Eyring, V., Forest, C., Gleckler, P., Guilyardi, E., Jakob, C., Kattsov, V., Reason, C. & Rummukainen, M. (2013). Evaluation of climate models. In Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. & Midgley, P.M. (Eds.) *Climate change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 741-866). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>

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 - PNAS*, 110(45), 18110–18115. <https://doi.org/10.1073/pnas.1302584110>

Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., & Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 2, 150066. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>

Li, W., & Fu, R. (2004). Transition of the Large-Scale atmospheric and Land Surface Conditions from the Dry to the Wet Season over Amazonia as Diagnosed by the ECMWF Re-analysis. *Journal of Climate*, 17(13), 2637-2651, [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017<2637:totlaa.2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<2637:totlaa.2.0.co;2)

Marengo, J. A., Liebmann, B., Grimm, A. M., Misra, V., Silva Dias, P. D., Cavalcanti, I. F. A., Carvalho, L. M. V., Berbery, E. H., Ambrizzi, T., Vera, C. S., Saulo, A. C., Noguez-Paegle, J., Zipser, E., Seth, A., & Alves, L. M. (2012). Recent developments on the South American monsoon system. *International Journal of Climatology*, 32(1), 1-21. <https://doi.org/10.1002/joc.2254>

Marengo, J. A., Souza Jr, C. M., Thonicke, K., Burton, C., Halladay, K., Betts, R. A., Alves L. & 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, 228. <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00228>

Moron, V., Robertson, A. W., Ward, M. N., y Ndiaye, O. (2008). Weather types and rainfall over Senegal. Part II: Downscaling of GCM Simulations. *Journal of Climate*, 21(2), 288–307. <https://doi.org/10.1175/2007jcli1624.1>

Nobre, C. A., Obregón, G. O., Marengo, J. A., Fu, R., & Poveda, G. (2009). Characteristics of Amazonian Climate: Main Features. En Keller, M., Bustamante, M., Gash, J. & Silva, P. (Eds.), *Amazonia and global change* (Vol. 186, pp. 149-162). American Geophysical Union. <https://doi.org/10.1029/2009GM000903>

Olmo, M. E., Espinoza, J. C., Bettolli, M. L., Sierra, J. P., Junquas, C., Arias, P. A., Moron, V. & Balmaceda-Huarte, R. (2022). Circulation Patterns and Associated Rainfall Over South Tropical South America: GCMs Evaluation During the Dry-To-Wet Transition Season. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127, e2022JD036468. <https://doi.org/10.1029/2022JD036468>

Pichelli, E., Coppola, E., Sobolowski, S., Ban, N., Giorgi, F., Stocchi, P., Alias, A., Belušić, D., Berthou, S., Caillaud, C., Cardoso, R. M., Chan, S., Christensen, O. B., Dobler, A., de Vries, H., Goergen, K., Kendon, E. J., Keuler, K., Lenderink, G., ... Vergara-Temprado, J. (2021). The first multi-model ensemble of regional climate simulations at kilometer-scale resolution part 2: historical and future simulations of precipitation. *Climate Dynamics*, 56(11-12), 3581-3602. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05657-4>

Riahi, K., Van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O., Lutz, W., Popp, A., Cuaresma, J. C., KC, S., Leimbach, M., Jiang, L., Kram, T., Rao, S., Emmerling, J., ... Tavoni, M. (2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An Overview. *Global Environmental Change*, 42(C), 153-168. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>

Solman, S. A., & Menéndez, C. G. (2003). Weather regimes in the South American sector and neighbouring oceans during winter. *Climate Dynamics*, 21(1), 91-104. <https://doi.org/10.1007/s00382-003-0320-x>

Sousa, T. R., Schiatti, J., Ribeiro, I. O., Emilio, T., Fernández, R. H., Steege, H., Castilho, C. V., Esquivel-Muelbert, A., Baker, T., Castro, W., Mendoza, A. M., Lima, A. J. N., Rudas, A., Araujo-Murakami, A., Andrade, A., Manzatto, A. G., Torres-Lezama, A., Marimon, B., Marimon, B. H., ... Phillips, O. L. (2022). Water table depth modulates productivity and biomass across Amazonian forests. *Global Ecology and Biogeography*. 31(8), 1571-1588. <https://doi.org/10.1111/geb.13531>

Vera, C., Higgins, W., Amador, J., Ambrizzi, T., Garreaud, R., Gochis, D., Gutzler, D., Lettenmaier, D., Marengo, J., Mechoso, C. R., Nogue-Paegle, J., Dias, P. L. S., & Zhang, C. (2006). Toward a Unified View of the American Monsoon Systems. *Journal of Climate*, 19(20), 4977-5000. <https://doi.org/10.1175/jcli3896.1>

Paccini, L., Espinoza, J. C., Ronchail, J., & Segura, H. (2018). Intraseasonal rainfall variability in the Amazon basin related to large-scale circulation patterns: A focus on Western Amazon-Andes transition region. *International Journal of Climatology*, 38(5), 2386-2399. <https://doi.org/10.1002/joc.5341>

Welch, I. (2024). *The IPCC Shared Socioeconomic Pathways (SSPs): Explained, Evaluated, Replaced* (No. w32178). National Bureau of Economic Research.