

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN

Impactos de la Oscilación del Sur de El Niño en la variabilidad hidroclimática de una cuenca andina tropical a partir de conjuntos de datos en malla fina

Impacts of El Niño Southern Oscillation on hydroclimatic variability of a tropical Andean basin from fine-gridded datasets

DOI: <https://doi.org/10.26640/22159045.2025.654>

Fecha de recepción: 2024-11-12 / Fecha de evaluación: 2025-07-25 / Fecha de aceptación: 2025-09-15

José A. Posada-Marín¹; Sharon A. Sánchez-Muñoz²; Melisa K. Toro-Martínez³

CITAR COMO:

Posada-Marín, J.; Sánchez-Muñoz, S.; Toro-Martínez, M. (2025). Impactos de la Oscilación del Sur El Niño en la variabilidad hidroclimática de una cuenca andina tropical a partir de conjuntos de datos en malla fina, *Boletín Científico CIOH*, 44(2), 3-23. <https://doi.org/10.26640/22159045.2025.654>.

RESUMEN

Cuantificar cuánto los modos climáticos modulan los regímenes hidrológicos locales es esencial para anticipar riesgos en regiones montañosas tropicales. Este estudio analizó la influencia del fenómeno El Niño–Oscilación del Sur (ENOS) sobre la variabilidad hidroclimática en la cuenca Peñol–Guatapé, estratégica para la generación hidroeléctrica en los Andes colombianos. Aunque existen validaciones regionales de datos de precipitación, su desempeño varía en terrenos montañosos complejos, dejando un vacío a escala de cuenca, donde se toman decisiones críticas de gestión. Se evaluaron productos de alta resolución frente a registros en superficie y se analizaron anomalías asociadas al ENOS. CHIRPS representó con mayor consistencia la precipitación. Además, El Niño redujo la lluvia en más del 30 % en temporadas críticas, mientras La Niña intensificó la precipitación, elevando los riesgos de inundaciones y deslizamientos. Estos hallazgos subrayan el papel del ENOS como modulador hidroclimático y la importancia de validaciones locales en regiones tropicales montañosas.

PALABRAS CLAVES: El Niño, variabilidad climática, precipitación, seguridad del agua, gestión del agua.

ABSTRACT

Quantifying how much climate modes modulate local hydrological regimes is essential for anticipating risks in tropical mountain regions. This study analyzed the influence of the El Niño–Southern Oscillation (ENOS) on hydroclimatic variability in the Peñol–Guatapé basin, a strategic area for hydropower generation in the Colombian Andes. Although regional validations of precipitation datasets exist, their performance varies in complex mountainous terrains, leaving a gap at the basin scale where critical management decisions are made. High-resolution products were evaluated against surface records, and anomalies associated with ENOS were analyzed. CHIRPS most consistently represented precipitation. Moreover, El Niño reduced precipitation by more than 30% during critical seasons, while La Niña intensified precipitation and increased the risks of floods and landslides. These findings highlight the role of ENOS as a hydroclimatic driver and the importance of localized validations in tropical mountain regions.

KEYWORDS: El Niño, climate variability, precipitation, water security, water management.

¹ Orcid: 0000-0001-7456-8772. Grupo de Investigación en Innovación Digital y Desarrollo Social INDES, IU Digital de Antioquia, Medellín, Colombia. Correo electrónico: jose.posada@iudigital.edu.co

² Orcid: 0000-0001-5996-9367. Grupo de Investigación en Innovación Digital y Desarrollo Social INDES, IU Digital de Antioquia, Medellín, Colombia. Correo electrónico: sharon.sanchez@iudigital.edu.co

³ Orcid: 0009-0004-1248-1734. Grupo de Investigación en Innovación Digital y Desarrollo Social INDES, IU Digital de Antioquia, Medellín, Colombia. Correo electrónico: melisa.toro@iudigital.edu.co

INTRODUCCIÓN

El fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) es el principal impulsor de la variabilidad climática regional y global (Arias *et al.*, 2021). Este fenómeno incluye una fase cálida (El Niño) y una fase fría (La Niña), cada una caracterizada por patrones anómalos de temperatura en el océano Pacífico. Durante la fase de El Niño (La Niña), las temperaturas en el Pacífico oriental son más altas (más bajas) que el promedio histórico (McPhaden, Zebiak & Glantz, 2006). El ENOS impulsa la variabilidad hidrológica, alterando notablemente la precipitación a escalas regionales y globales (Dai & Wigley, 2000; Lin & Qian, 2019; Posada-Marín, *et al.*, 2023). Numerosos estudios han demostrado la influencia de El Niño en eventos extremos de precipitación (por ejemplo, Sun, *et al.*, 2015; Yang, Wu, Liu & Ye, 2021; An *et al.*, 2023), los cuales afectan la magnitud y frecuencia de amenazas naturales como inundaciones (Emerton, *et al.*, 2017; Yan *et al.*, 2020), deslizamientos de tierra (Vilímek, *et al.*, 2013; Emberson, *et al.*, 2021; Vega, *et al.*, 2024) y escasez de agua (Veldkamp *et al.*, 2015; Vicente-Serrano *et al.*, 2017; Singh, Ashfaq, Skinner, Anderson, Mishra & Singh, 2022).

Estas amenazas inducidas por el ENOS tienen impactos significativos en la infraestructura (Kim, Chowdhury, Pant, Yamashita & Ghimire, 2021), la seguridad alimentaria (Muza, 2017; Sazib, Mladenova & Bolten, 2020), la seguridad hídrica (Mishra, 2020), la generación hidroeléctrica (Poveda, Mesa & Waylen, 2003; Ng, Turner & Galelli, 2017; Gao, Zhao, Hou & Wang, 2022), la salud pública (Muñoz, Poveda, Arbeláez & Vélez, 2021; Woyessa, Siebert, Owusu, Cousin, Dinku & Thomson, 2023) y el funcionamiento de los ecosistemas (Holmgren, Scheffer, Ezcurra, Gutiérrez & Mohren, 2001; Posada-Marín *et al.*, 2023). Estos impactos podrían volverse aún más severos bajo escenarios de cambio climático, ya que se proyecta un aumento en la ocurrencia e intensidad de las fases del ENOS (Cai *et al.*, 2015; Cai *et al.*, 2022; Singh *et al.*, 2022).

El norte de América del Sur (NSA, por sus siglas en inglés) está particularmente influenciado por el ENOS (Poveda, Álvarez & Rueda, 2011; Cai *et al.*, 2020; Bolaños, Salazar, Betancur & Werner, 2021). En términos generales, la fase de El Niño (La Niña) conduce a reducciones (incrementos)

en la precipitación en esta región (Poveda *et al.*, 2011). El ciclo anual de precipitación en el NSA está modulado por la oscilación de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), la cual afecta la intensidad y comportamiento de los chorros de nivel bajo que transportan humedad desde el océano Pacífico (Chorro de Nivel Bajo del Chocó - CHLLJ, Sierra, Arias, Durán-Quesada, Tapias, Vieira & Martínez, 2021), el océano Atlántico (Chorro de Nivel Bajo del Caribe - CLLJ, Wang, 2007) y las cuencas del Amazonas (Chorro de Nivel Bajo de América del Sur - SALLJ, Montini, Jones & Carvalho, 2019) y del Orinoco (Chorro de Nivel Bajo del Orinoco - OLLJ, Jiménez-Sánchez, Markowski, Jewtoukoff, Young & Stensrud, 2019). Cai *et al.* (2020) sintetizaron hallazgos sobre la influencia del ENOS en América del Sur, indicando que durante la fase de El Niño (La Niña) se presenta movimiento descendente (ascendente) anómalo sobre el NSA, lo cual genera reducciones (incrementos) en la precipitación. Poveda *et al.* (2011) sugirieron además que, durante las fases de El Niño (La Niña), los cambios en los gradientes de temperatura entre el océano Pacífico y el continente del NSA causan un debilitamiento (intensificación) de los chorros CHLLJ y CLLJ, reduciendo (aumentando) así el transporte de humedad hacia el interior.

Asimismo, el reciclaje de humedad terrestre (TMR, por sus siglas en inglés) desde las cuencas del Amazonas y del Orinoco hacia los Andes Tropicales del NSA, modulado por los chorros SALLJ y OLLJ, se reduce considerablemente (Poveda *et al.*, 2011; Builes-Jaramillo *et al.*, 2022; Posada-Marín *et al.*, 2023). Estos cambios en el transporte atmosférico de humedad explican parcialmente las anomalías de precipitación en el NSA (Cai *et al.*, 2020).

El ENOS puede afectar la ocurrencia y severidad de amenazas naturales relacionadas con la precipitación en el norte de América del Sur, como sequías, inundaciones y deslizamientos. Emerton *et al.* (2017) señalaron que no existe una relación lineal simple entre la precipitación y la magnitud de las inundaciones, lo que dificulta determinar la influencia del ENOS en las amenazas asociadas a inundaciones, las cuales varían según la ubicación dentro de los Andes Tropicales. En cuanto a los incendios forestales, las fases de El Niño aumentan su ocurrencia durante las temporadas secas debido a reducciones en la precipitación y

en la humedad del suelo (Emerton *et al.*, 2017; Bolaños *et al.*, 2021). Por el contrario, La Niña incrementa la precipitación tanto en las estaciones secas como en las húmedas, aumentando la erosión y la ocurrencia de deslizamientos (Vega *et al.*, 2024). Estas amenazas naturales inducidas por el ENOS provocan alteraciones en los ecosistemas, pérdidas económicas, daños a la infraestructura e incluso víctimas fatales (Duque-Escobar, 2007). Los efectos son particularmente severos en las regiones montañosas de los Andes Tropicales, donde las características topográficas y geológicas, combinadas con los patrones alterados de precipitación, incrementan los riesgos de deslizamientos y los daños asociados (Vega *et al.*, 2024). El monitoreo de la precipitación es esencial para comprender cómo la variabilidad inducida por el ENOS impacta las amenazas relacionadas con el agua, contribuyendo así a garantizar la seguridad hídrica en esta región.

Existen diversos conjuntos de datos en malla, como reconstrucciones climatológicas (por ejemplo, GPCC - Global Precipitation Climatology Centre, Becker *et al.*, 2013), reanálisis (por ejemplo, ERA5-Land, Hersbach *et al.*, 2020) y datos de teledetección (por ejemplo, GPM - Global Precipitation Measurement, Skofronick-Jackson *et al.*, 2017), que proporcionan información de precipitación para caracterizar la variabilidad hidroclimática a escalas global y regional (por ejemplo, Dai & Wigley, 2000; Posada-Marín *et al.*, 2023). Sin embargo, estos conjuntos de datos suelen tener una resolución espacial más gruesa, lo que limita la capacidad para comprender la variabilidad hidroclimática a escalas locales. Esta información es esencial para mitigar los riesgos asociados con las amenazas naturales derivadas de dicha variabilidad. Por ejemplo, muchas cuencas que abastecen embalses hidroeléctricos cubren áreas relativamente pequeñas, y estos conjuntos de datos no logran capturar completamente la variabilidad espacio-temporal de la precipitación dentro de ellas (por ejemplo, Posada-Marín, Rendón, Salazar, Mejía & Villegas, 2019). En consecuencia, los datos de precipitación de resolución más fina son fundamentales para comprender la disponibilidad hídrica de las cuencas, garantizar operaciones hidroeléctricas eficientes y reducir las amenazas naturales vinculadas a modos de variabilidad climática como el ENOS.

En los últimos años, ha surgido una nueva generación de productos de precipitación que abordan las limitaciones de resolución espacial y se han convertido en una valiosa fuente de datos para mejorar las evaluaciones hidroclimáticas. Entre ellos, el conjunto de datos Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data (CHIRPS, Funk *et al.*, 2015) proporciona estimaciones diarias de precipitación cuasi globales de alta resolución espacial, combinando imágenes satelitales con observaciones terrestres, lo que ha permitido su uso generalizado en estudios climáticos e hidrológicos en regiones tropicales. De manera similar, el conjunto Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks (PERSIANN, Nguyen *et al.*, 2018) ofrece cobertura global con énfasis en eventos extremos de precipitación, mientras que el producto Multi-Fuente Weighted-Ensemble Precipitation (MSWEP, Beck *et al.*, 2017) combina información de pluviómetros, satélites y reanálisis para ofrecer un conjunto balanceado con precisión mejorada en diversas regiones.

El conjunto de reanálisis ERA5-Land-Land (Muñoz-Sabater *et al.*, 2021), producido por el European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), integra modelación atmosférica y observaciones asimiladas para generar registros consistentes a largo plazo con resolución temporal horaria.

Estos conjuntos de datos han resultado útiles en regiones con registros *in situ* limitados; sin embargo, su representatividad puede variar considerablemente en áreas con topografía compleja, donde las estimaciones satelitales y los modelos de reanálisis pueden subestimar o representar de manera incorrecta los patrones locales de precipitación. Diversos estudios han destacado estos desafíos, mostrando que el desempeño de los productos en malla está fuertemente condicionado por los gradientes topográficos y climáticos (Amjad, Yilmaz, Yucel & Yilmaz, 2020; Hafizi & Sorman, 2022; López-Bermeo, Montoya, Caro-Lopera & Díaz-García, 2022; Nadeem *et al.*, 2022; Peña-Guerrero, Umirbekov, Tarasova & Müller, 2022; Valencia, Marín, Gómez, Hoyos, Salazar & Villegas, 2023; Amjad, Shahzad & Hassan, 2025).

Por lo tanto, aunque estas bases de datos proporcionan cobertura espacial continua y

permiten análisis comparativos, su eficacia en cuencas montañosas —como los Andes Tropicales— requiere una validación cuidadosa frente a las redes de pluviómetros disponibles antes de poder incorporarlas de manera confiable a los procesos de gestión de recursos hídricos y toma de decisiones a escala de cuenca.

En este estudio, evaluamos la capacidad de cuatro conjuntos de datos de precipitación en malla para representar las características hidroclimáticas de la cuenca Peñol-Guatapé, una cuenca andina tropical donde la precipitación desempeña un papel fundamental en el sostenimiento de la generación hidroeléctrica, piedra angular del suministro eléctrico de Colombia. La caracterización precisa de la dinámica de la precipitación en la cuenca está limitada por su topografía montañosa y una red pluviométrica escasa, lo que introduce incertidumbres en las evaluaciones hidroclimáticas y en la planificación de los recursos hídricos. Además, la cuenca es sensible a la variabilidad climática a gran escala, particularmente al ENOS, que puede desencadenar anomalías significativas en la precipitación y aumentar la probabilidad de extremos hidrológicos.

Asimismo, analizamos la relación entre el ENOS y la variabilidad y anomalías de precipitación, y examinamos cómo el ENOS modifica las funciones de densidad de probabilidad de la precipitación estacional, con énfasis en los posibles cambios en la ocurrencia de amenazas naturales. Al combinar evaluaciones a escala de cuenca con análisis impulsados por el ENOS, este estudio ayuda a cerrar la brecha entre los conjuntos de datos de precipitación y su aplicabilidad en cuencas locales dentro de regiones montañosas, ofreciendo información relevante tanto para la comprensión científica como para la gestión del recurso hídrico.

AREA DE ESTUDIO

La cuenca Peñol-Guatapé se encuentra en la zona central de los Andes Tropicales, en la región oriental del departamento de Antioquia, Colombia. Esta cuenca es una de las más importantes de la región, ya que aporta hasta 10 GWh/día al sistema interconectado nacional, con una capacidad máxima de almacenamiento de 1.240 Mm³ y profundidades máxima y promedio de 43 m y 27,5 m, respectivamente (Aguirre Ramírez, Palacio Baena & Ramírez Restrepo,

2007). El embalse cubre un área de 1.218 km², ofreciendo diversos servicios ecosistémicos — como el abastecimiento de agua, el turismo y la generación hidroeléctrica— que benefician tanto a las comunidades locales como regionales.

La cuenca se caracteriza por una topografía compleja, con un paisaje fragmentado por numerosas islas y penínsulas. Se encuentra a una altitud promedio de 1.900 metros sobre el nivel del mar y presenta un clima húmedo y templado, con una temperatura media anual entre 17 °C y 19 °C (Aguirre Ramírez *et al.*, 2007). Entre sus servicios ecosistémicos, el embalse contribuye a la regulación de los flujos de agua, controlando las inundaciones en la parte baja de la cuenca y almacenando agua durante las temporadas lluviosas para su uso en las épocas secas.

Además, sustenta diversas especies acuáticas y terrestres, proporcionando hábitat para la fauna local, incluyendo aves, peces y otros organismos dependientes de los ecosistemas acuáticos y ribereños (Aguirre Ramírez *et al.*, 2007). El embalse también ofrece servicios culturales a través del turismo, la recreación, el valor paisajístico y la educación ambiental. Las condiciones hidroclimáticas de la cuenca están fuertemente influenciadas por el ENOS, lo que representa riesgos para la provisión de servicios ecosistémicos y la estabilidad de la seguridad hídrica y energética.

METODOLOGÍA

Evaluación del desempeño de los conjuntos de datos de precipitación

Las condiciones hidroclimáticas en la cuenca del embalse Peñol-Guatapé durante el periodo 1983–2022 se caracterizaron utilizando datos de precipitación (P) provenientes de varios conjuntos de datos de alta resolución (Tabla 1). Estos conjuntos incluyeron un reanálisis atmosférico (ERA5-Land-Land) y tres conjuntos de datos de precipitación que integran información de teledetección y estaciones de superficie mediante técnicas de inteligencia artificial y asimilación de datos para el monitoreo hidroclimático. Los valores de precipitación de estos productos se compararon con datos provenientes de siete pluviómetros superficiales administrados por

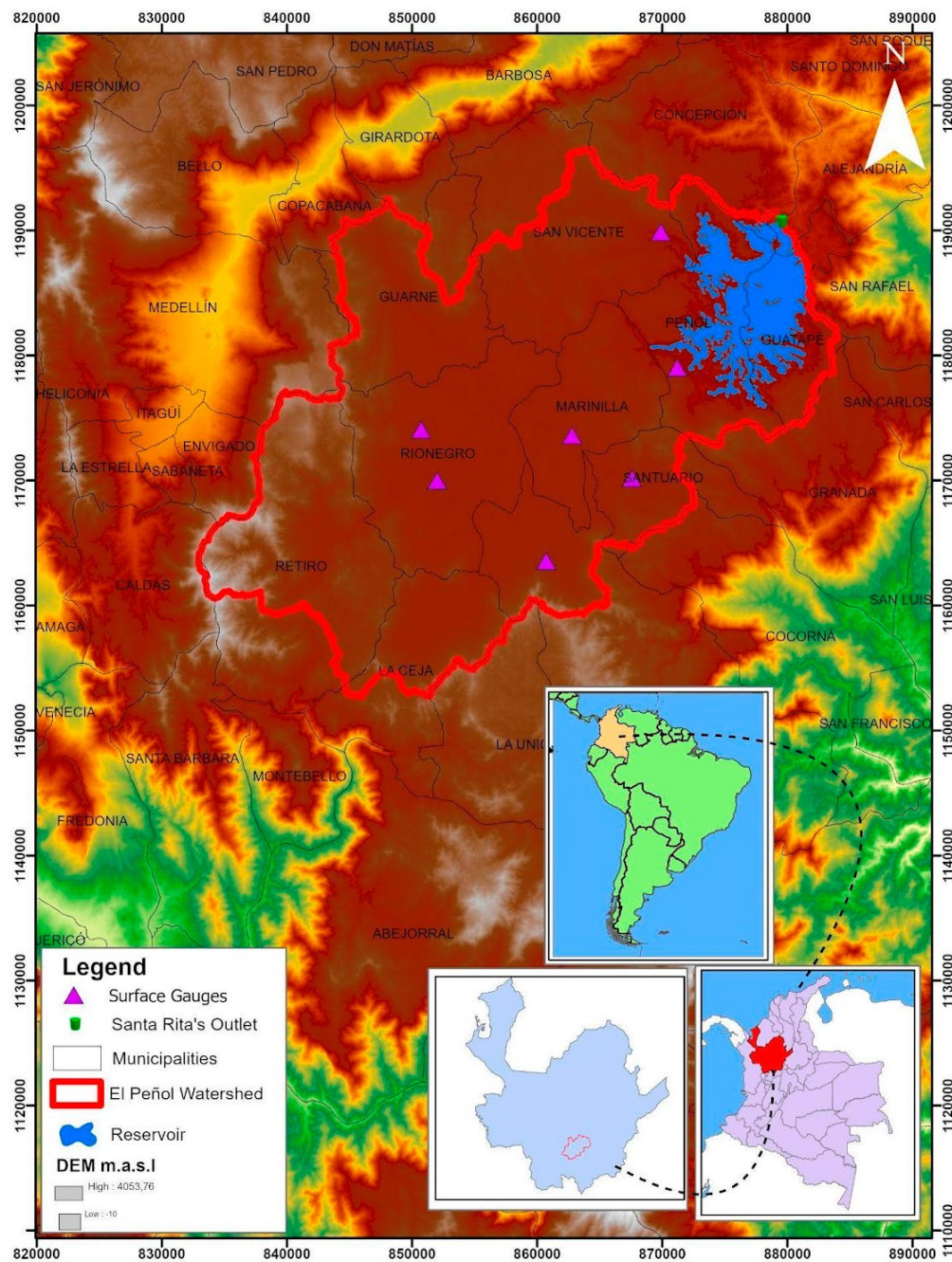


Figura 1. Ubicación geográfica de la cuenca Peñol-Guatapé (polígono rojo), que alimenta el embalse (polígono azul). Los triángulos indican los pluviómetros superficiales utilizados en este estudio.

el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Colombia). Las series temporales de precipitación empleadas en este estudio consistieron en datos mensuales previamente procesados y controlados en calidad por el IDEAM, garantizando la homogeneidad y

confiabilidad de los registros. Para este análisis, se verificó que todas las series temporales cubrieran el mismo periodo (1983–2022) y no presentaran valores faltantes, evitando así la necesidad de aplicar procedimientos de reconstrucción de datos.

Tabla 1. Fuentes de datos hidroclimáticos utilizadas en este estudio.

Fuente	Categoría	Resolución Espacial [km]	Resolución Temporal	Periodo de operación	Referencia
ERA5-Land-Land	Reanálisis	9	Mensual	1940-presente	https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-land-monthly-means?tab=overview
CHIRPS	Teledetección	5	Mensual	1981- presente	https://www.chc.ucsb.edu/data/chirps
PERSIANN	Teledetección	4	Mensual	1983- presente	https://chrdata.eng.uci.edu/
MSWEP	Teledetección	9	Mensual	1979- presente	https://www.gloh2o.org/mswep/
IDEAM	Surface gauges. Aeropuerto J.M. Cordova Aut [23085270] Campoalegre [23080650] Corrientes [23085160] La Selva Aut [23085260] Marinilla [23080640] El Penol [23085110] Santuario [23080920]	-	Mensual	1983 -presente	http://dhime.ideam.gov.co/webgis/home/

Se realizó una comparación de los conjuntos de datos de alta resolución mediante un conjunto de indicadores estadísticos para evaluar su desempeño en la representación de las distribuciones espaciales y temporales de la precipitación (por ejemplo,, Posada-Marín *et al.*, 2019). Para cada pluviómetro, se extrajo la serie temporal de estimaciones correspondiente al píxel en el que se encuentra la estación. Este enfoque fue consistente con la técnica Match-up, que relaciona directamente las observaciones *in situ* con los valores de la celda de la cuadrícula del conjunto de datos. Las métricas estadísticas aplicadas incluyeron la evaluación de: (1) El error cuadrático medio (RMSE), (2) El error relativo (E%), (3) El coeficiente de correlación (R), y (4) La desviación estándar (SD):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \times \sum_{k=1}^N (M_k - O_k)^2} \quad [1]$$

$$E\% = \sum_{k=1}^N \frac{M_k - O_k}{O_k} \quad [2]$$

$$R = \frac{\sum_{k=1}^N (O_k - \underline{O})(M_k - \underline{M})}{\sqrt{\sum_{k=1}^N (O_k - \underline{O})^2 \sum_{k=1}^N (M_k - \underline{M})^2}} \quad [3]$$

$$SD = \sqrt{\frac{1}{N} \times \sum_{k=1}^N (O_k - \underline{O})^2} \quad [4]$$

En estas ecuaciones, O y M representan los valores de las estaciones y de los productos en malla, respectivamente, para un tiempo o punto determinado (el índice k identifica tiempo o espacio, según el caso), y N denota el tamaño de la muestra. Además, se utilizaron diagramas de Taylor para evaluar la variabilidad espacial de la precipitación sobre la cuenca Peñol-Guatapé, comparando todas las fuentes de información en malla con las observaciones superficiales en

términos de error, variabilidad y correlación. Con el fin de garantizar la solidez de los análisis posteriores, se basó la evaluación de los conjuntos de datos de precipitación en la comparación con los pluviómetros del IDEAM, con el objetivo de identificar el producto que mejor representara la dinámica de la precipitación en la cuenca. Este paso de selección es una práctica común en los estudios hidroclimáticos, ya que garantiza que la base de datos utilizada para analizar las teleconexiones climáticas a gran escala sea la más consistente con las observaciones locales.

A partir de esta evaluación, se examinó la influencia del ENOS sobre la variabilidad de la precipitación, relacionando las anomalías en malla con diferentes índices ENOS.

Análisis de compuestos del ENOS

La relación entre el ENOS y las condiciones hidroclimáticas en la cuenca del embalse Peñol-

Guatapé se analizó mediante técnicas estadísticas (por ejemplo, Dai & Wigley, 2000; Posada-Marín *et al.*, 2023) aplicadas a las series temporales anuales y estacionales de precipitación y de los índices ENOS (Tabla 2). Usamos las relaciones más fuertes identificadas en este análisis, junto con la evaluación de los conjuntos de datos, para calcular las anomalías de precipitación inducidas por el ENOS. Los eventos seleccionados de ENOS (El Niño y La Niña) fueron primero promediados y luego sustraídos de los promedios de las fases neutrales para formar las anomalías compuestas. Las diferencias estadísticamente significativas en los compuestos del ENOS se determinaron mediante una prueba t de Student de dos colas con un nivel de confianza del 0.95. Estas diferencias se evaluaron entre los compuestos de diferentes fases del ENOS en cada celda de malla, garantizando que la correlación espacial no afectara la prueba (por ejemplo, Posada-Marín *et al.*, 2023).

Tabla 2. Índices de ENOS utilizados en este estudio.

Fuente	Categoría	Resolución Temporal	Referencia
Índice Oceánico del Niño (ONI)	Oceánico	Mensual	https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php
Índice de la región Niño 1+2	Oceánico	Mensual	https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/nino-sst-indices-nino-12-3-34-4-oni-and-tni
Índice de la región Niño 3.4	Oceánico	Mensual	https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/nino-sst-indices-nino-12-3-34-4-oni-and-tni
Índice de la región Niño 3	Oceánico	Mensual	https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/nino-sst-indices-nino-12-3-34-4-oni-and-tni
Índice de la región Niño 4	Oceánico	Mensual	https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/nino-sst-indices-nino-12-3-34-4-oni-and-tni

Aunque los registros pluviométricos de las siete estaciones superficiales del IDEAM ubicadas dentro de la cuenca Peñol-Guatapé proporcionan información valiosa como fuente de realidad en tierra, su distribución espacial es dispersa y desigual, lo que limita su capacidad para capturar la alta variabilidad espacial de la precipitación en una cuenca montañosa. Por esta razón, nuestro análisis se basó principalmente en productos de precipitación en malla—CHIRPS, PERSIANN, MSWEP y ERA5-Land—que ofrecen cobertura espacial continua. Estos conjuntos de datos permiten caracterizar la

dinámica de la precipitación a escalas espaciales más finas y realizar validaciones cruzadas entre fuentes independientes, aumentando así la robustez de los resultados. No obstante, reconociendo las incertidumbres asociadas con los productos de teledetección y reanálisis en regiones con topografía compleja, validamos las cuatro bases de datos frente a las estaciones IDEAM disponibles antes de incorporarlas en la evaluación hidroclimática, garantizando que las observaciones locales sirvieran como referencia esencial.

RESULTADOS

Desempeño de los conjuntos de datos de precipitación

La Figura 2 sintetiza la capacidad de los conjuntos de datos en malla para representar la variabilidad espacio-temporal de la precipitación anual en la cuenca Peñol-Guatapé. Usando como referencia las estaciones superficiales del IDEAM, el conjunto de datos que mejor representó la variabilidad anual de la precipitación fue CHIRPS, que presentó el error de magnitud más bajo y un RMSE de 0.42 mm/día. En contraste, el conjunto PERSIANN mostró el RMSE más alto (3.36 mm/día), indicando debilidades en su capacidad para representar la magnitud de la precipitación. Todos los conjuntos de datos en malla capturaron el patrón temporal de la precipitación anual en la cuenca, según el coeficiente de correlación (Fig. 2a, $R > 0.7$), siendo CHIRPS el que lo capturó con mayor precisión. La representación de la variabilidad temporal, indicada por la razón entre las desviaciones estándar de los conjuntos de datos en malla y las de las estaciones superficiales (SDM/SDO), mostró que MSWEP y CHIRPS proporcionaron aproximaciones muy cercanas de la variabilidad anual. Cuanto más cercana a 1 sea esta razón, mejor es la representación de la variabilidad observada. CHIRPS subestimó ligeramente la precipitación anual, con un error porcentual medio de 0.2% y valores mínimos y máximos de -18.1% y 11.6%. MSWEP presentó el segundo mejor desempeño ($E\% = 4.0\%$), pero con una mayor variabilidad en el error (valores mínimo y máximo de -19.0% y 32.0%). PERSIANN sobreestimó la precipitación en casi un 50%, con un valor máximo de 116.2%, lo que evidencia problemas serios para representar la magnitud de la precipitación anual (Fig. 2b).

En cuanto a la variabilidad espacial del promedio anual, todos los conjuntos de datos capturaron el patrón espacial ($R > 0.6$), excepto ERA5-Land (Fig. 2c). En conclusión, CHIRPS proporcionó la mejor representación del patrón espacial, con un coeficiente de correlación y una razón entre desviaciones estándar cercanos a 0.7 y 0.5, respectivamente. A pesar de su marcada sobreestimación, PERSIANN capturó un patrón espacial similar al de CHIRPS. En contraste, MSWEP y ERA5-Land no lograron representar

adecuadamente el patrón espacial, probablemente debido a su resolución espacial más gruesa. ERA5-Land presentó la resolución más baja (9 km), lo que limita su capacidad para representar la variabilidad espacial dentro de la cuenca Peñol-Guatapé.

La Figura 3 resume la capacidad de los conjuntos de datos en malla para representar el ciclo anual de precipitación en la cuenca Peñol-Guatapé. Estos conjuntos capturaron eficazmente la fase del ciclo anual, el cual sigue un patrón bimodal influenciado por la migración de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT). Este patrón incluye una estación seca de diciembre a febrero (DJF), dos estaciones lluviosas de marzo a mayo (MAM) y de septiembre a noviembre (SON), y una estación de transición de junio a agosto (JJA). Las diversas fuentes de datos de teledetección reflejaron con precisión la variabilidad intraanual (SDM/SDO ~ 1.0). Sin embargo, el conjunto PERSIANN tendió a sobreestimar considerablemente la precipitación mensual (3.27 mm/día, 53%), especialmente durante la estación seca. CHIRPS y MSWEP mostraron un desempeño comparable, aunque CHIRPS presentó una ligera ventaja debido a su menor error relativo y a una variabilidad de error más reducida. Con base en estos resultados, CHIRPS se destacó como el conjunto de datos más consistente con la información de las estaciones superficiales.

La Figura 4 muestra diagramas de Taylor que representan la capacidad de los distintos conjuntos de datos para capturar la distribución espacial de la precipitación media estacional en la cuenca Peñol-Guatapé. Usando como referencia las observaciones de las estaciones superficiales para los diagramas de Taylor normalizados, se encontró que ERA5-Land y MSWEP no logran representar con precisión la variabilidad espacial de la precipitación estacional en la cuenca. Ambos conjuntos presentaron valores de correlación (R) inferiores a 0.5, excepto durante el periodo de septiembre a noviembre (SON). Además, durante todos los trimestres, estos conjuntos mostraron mayor diferencia entre sus desviaciones estándar y las observadas en superficie, excepto en ERA5-Land durante SON. Estos problemas surgen debido a la resolución espacial más gruesa de los conjuntos de datos en relación con el tamaño de la cuenca Peñol-Guatapé. En contraste, PERSIANN

y CHIRPS mostraron valores de correlación superiores a 0.5 en todos los trimestres, excepto para PERSIANN durante diciembre a febrero (DJF). CHIRPS logró capturar aproximadamente la mitad de la variabilidad espacial de la precipitación en comparación con los datos de las estaciones superficiales. Aunque ambos

conjuntos mostraron capacidades similares, PERSIANN presentó dificultades para representar la magnitud de la precipitación, especialmente en DJF. En consecuencia, CHIRPS resultó ser el más efectivo para capturar la distribución espacial de la precipitación media estacional en la cuenca Peñol-Guatapé.

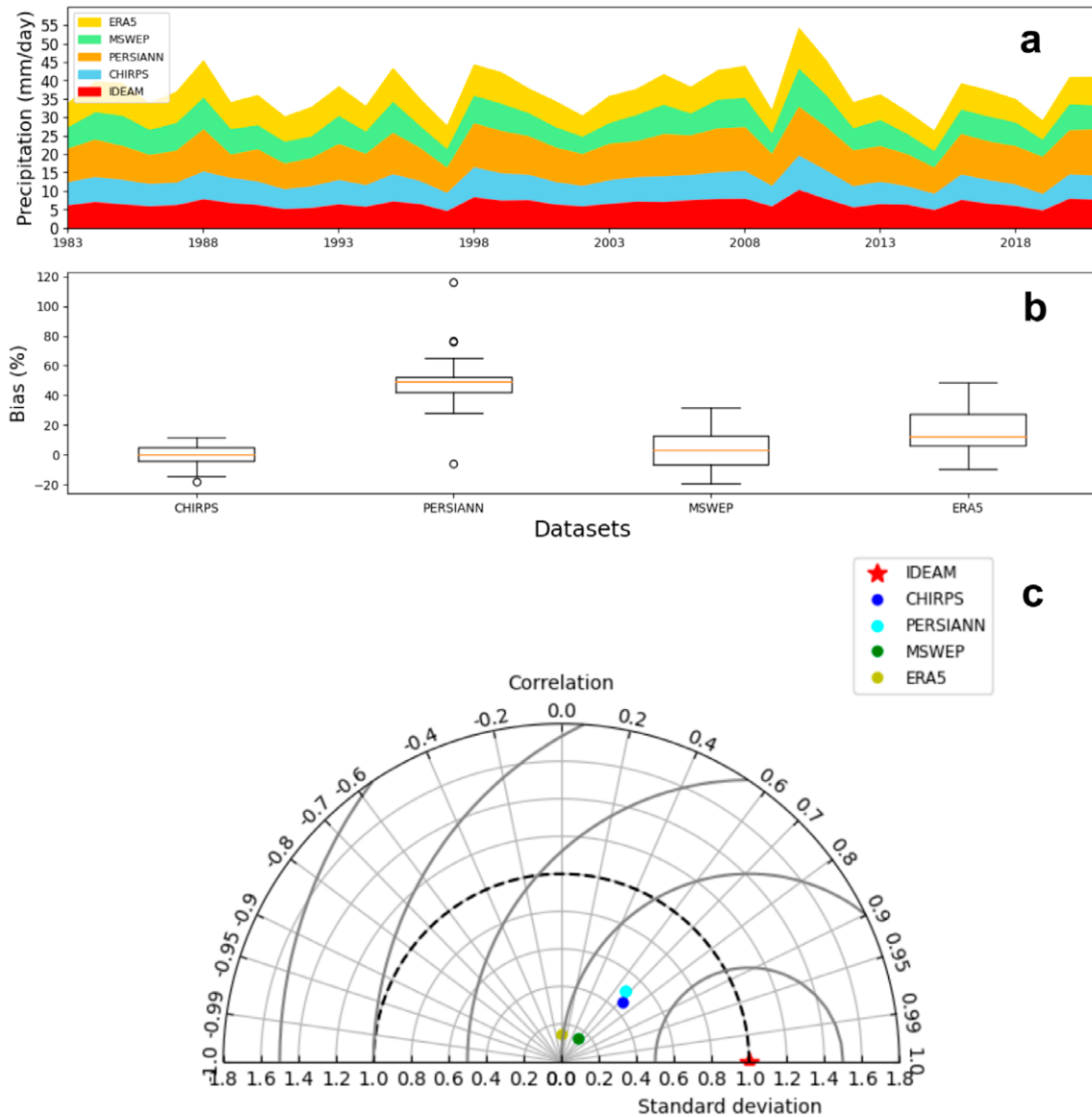


Figura 2. (a) Series anuales de precipitación en la cuenca a partir de varios conjuntos de datos; (b) error relativo de 1983 a 2022; y (c) diagrama de Taylor que resume la capacidad de los conjuntos de datos para representar la distribución espacial de la precipitación media anual en la cuenca.

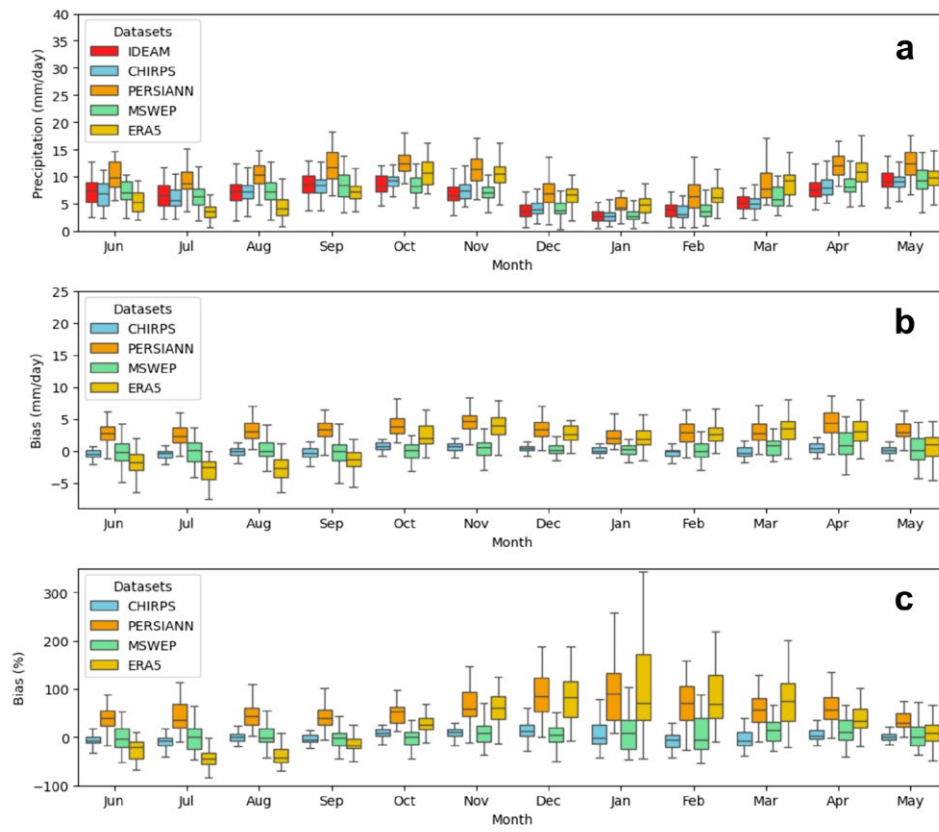


Figura 3. Diagramas de caja que muestran el ciclo anual de (a) precipitación en la cuenca a partir de los conjuntos de datos durante 1983-2022, (b) error absoluto y (c) error relativo.

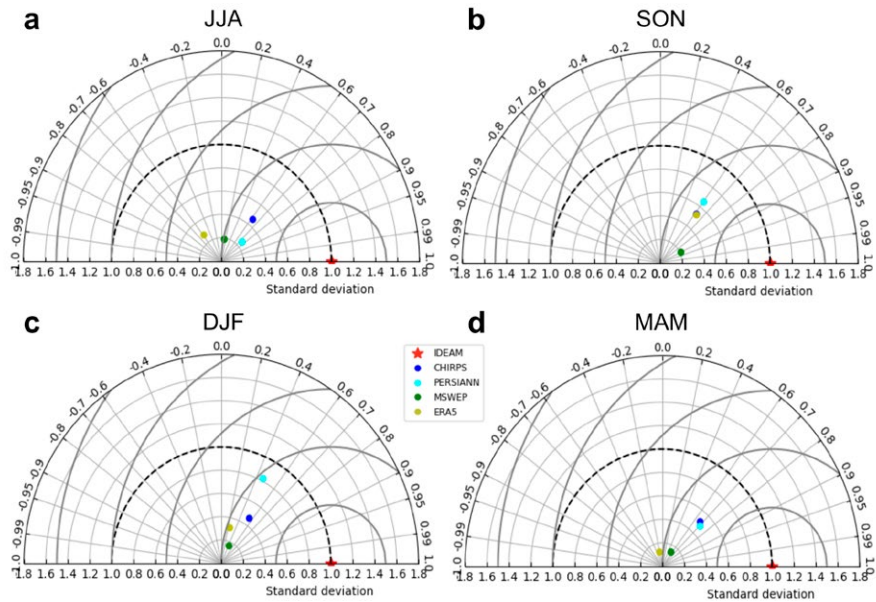


Figura 4. Diagramas de Taylor que resumen la capacidad de los conjuntos de datos para representar la distribución espacial de la precipitación estacional media en la cuenca durante (a) junio-julio-agosto (JJA), (b) septiembre-octubre-noviembre (SON), (c) diciembre-enero-febrero (DJF) y (d) marzo-abril-mayo (MAM) para el período 1983-2022.

Relación entre ENOS y las condiciones hidrocimáticas

La Figura 5 muestra las correlaciones temporales entre los conjuntos de datos de precipitación y los índices ENOS a escala anual. CHIRPS, seguido de PERSIANN, presentó el mejor ajuste entre los datos en malla y las estaciones superficiales del IDEAM, mientras que ERA5-Land presentó la correlación más baja (Fig. 5a). En cuanto a los índices ENOS, la correlación más fuerte ocurrió entre los índices Niño 3.4 y Niño 3 (Fig. 5b, $R = 0.95$). Esta alta correlación se debe a su estrecha proximidad geográfica y a los procesos oceánico-atmosféricos compartidos que impulsan los eventos de El Niño y La Niña. Las anomalías de temperatura en ambas regiones están influenciadas por la misma dinámica climática de gran escala y por la propagación hacia el este de aguas cálidas en el Pacífico ecuatorial.

Como resultado, ambos índices capturan cambios sincronizados en la temperatura superficial del mar durante estos fenómenos climáticos. Una relación similar se presenta entre el ONI y el índice Niño 3, siendo el ONI calculado a partir de anomalías de temperatura superficial del mar (SST) en la región Niño 3.4 del Pacífico ecuatorial. El mayor valor de correlación entre la precipitación de las estaciones superficiales y los índices ENOS se observó con el ONI (Fig. 5c). Como se mencionó anteriormente, CHIRPS mostró una mejor capacidad para representar los datos de precipitación de las estaciones. Sin embargo, la mayor correlación entre este conjunto de datos y los índices ENOS corresponde al Niño 4, aunque también es significativa con el Niño 3 y el ONI. Con base en este análisis, utilizamos el índice ONI para calcular las anomalías de precipitación a partir de CHIRPS en la cuenca Peñol-Guatapé.

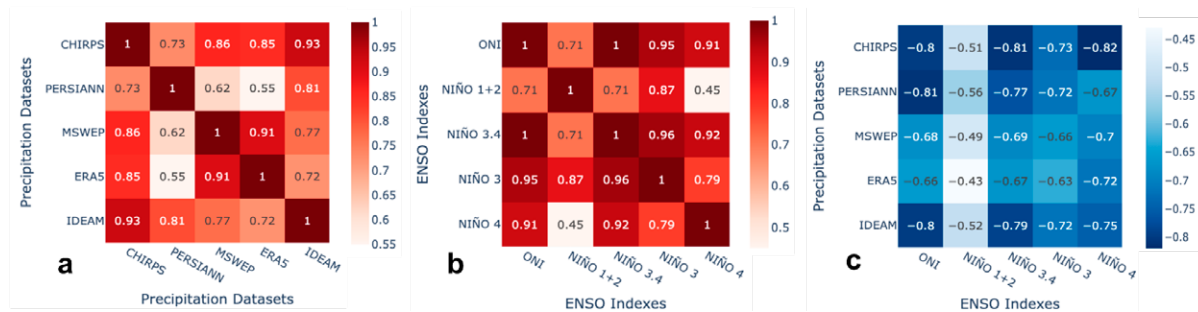


Figura 5. Mapas de calor que muestran las correlaciones entre (a) los conjuntos de datos de precipitación, (b) los índices ENOS y (c) los conjuntos de datos de precipitación versus índices ENOS a escala anual.

Anomalías en la precipitación inducidas por ENOS

La Figura 6 presenta las anomalías anuales y estacionales de precipitación inducidas por las fases del ENOS. Se identifica una relación inversa entre el índice ONI y las anomalías anuales de precipitación sobre la cuenca Peñol-Guatapé (Fig. 6a). Esto indica que el calentamiento (enfriamiento) asociado con El Niño (La Niña) en el Pacífico redujo (aumentó) la precipitación en la cuenca. Las reducciones más significativas en la precipitación inducidas por El Niño ocurrieron durante 2015-2016 (31.3%), cuando el calentamiento en el Pacífico fue más intenso según el ONI (1.82). Por el contrario, durante el evento La Niña 2010-2011, el incremento en la precipitación fue más pronunciado (43.0%), aunque este no fue el año

con el mayor enfriamiento (1988-1989). Estos resultados destacan la influencia significativa del ENOS en los patrones de precipitación en la cuenca Peñol-Guatapé. La sustancial reducción en la precipitación durante El Niño 2015-2016 concuerda con las expectativas de disminución bajo condiciones cálidas en el Pacífico. Del mismo modo, el notable aumento durante La Niña 2010-2011 confirma el incremento esperado bajo temperaturas oceánicas más frías. Sin embargo, el hecho de que el mayor aumento de precipitación no coincida con el mayor enfriamiento sugiere que otros factores atmosféricos o regionales pueden modular la respuesta hidrológica de la cuenca frente a las fases de ENOS. En ambas fases, las anomalías más fuertes ocurren durante JJA y SON (Fig. 6b). Durante JJA, el compuesto de El Niño (La Niña) sugiere reducciones (aumentos) en la

precipitación cercanas al 18% (30%). Durante el trimestre DJF, las reducciones inducidas por El Niño son más intensas (alrededor del 25%). Estos

resultados coinciden con los patrones esperados: El Niño genera condiciones más secas, mientras que La Niña intensifica la precipitación.

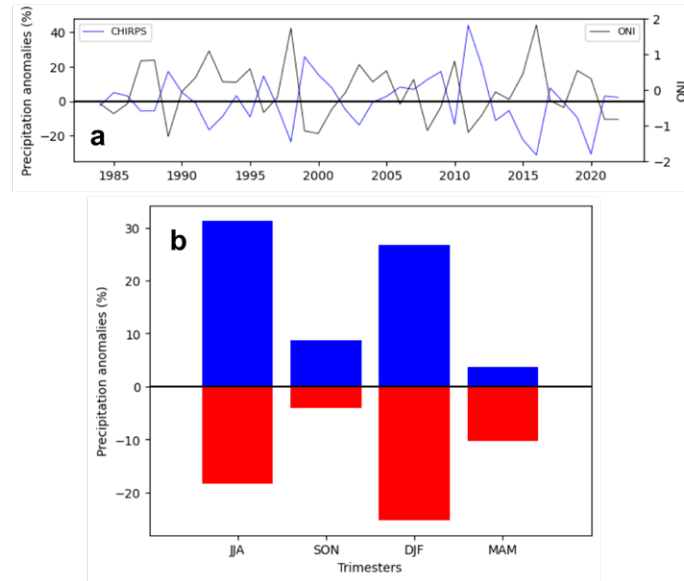


Figura 6. (a) Anomalías anuales y (b) estacionales de precipitación inducidas por las fases de ENOS.

La Figura 7 muestra la distribución espacial del promedio anual de largo plazo de las anomalías de precipitación inducidas por ENOS. La fase El Niño causó reducciones significativas en la precipitación sobre la cuenca, que pueden superar el 20% del promedio anual (Fig. 7a). Estas reducciones fueron más intensas en la parte media de la cuenca. En contraste, la fase La Niña generó aumentos de precipitación que pueden alcanzar aproximadamente el 8% del promedio anual; sin embargo, estas diferencias no fueron estadísticamente significativas (Fig. 7b). Estos resultados resaltan el riesgo potencial para la seguridad hídrico-energética de la cuenca durante eventos de El Niño, dado que la reducción sustancial en la precipitación podría conducir a una menor disponibilidad de agua para la generación hidroeléctrica. Además, los incrementos de precipitación asociados a La Niña, aunque presentes, fueron menos pronunciados, lo que sugiere una capacidad limitada para amortiguar amenazas naturales como sequías, y a la vez un posible incremento del riesgo de inundaciones en ciertas áreas, aunque con un impacto menor en la estabilidad hidrológica de largo plazo.

La Figura 8 muestra la distribución espacial del promedio estacional de largo plazo de las anomalías de precipitación inducidas por El Niño. Esta fase de ENOS generó reducciones en la precipitación durante todas las estaciones del año, con disminuciones significativas en toda la cuenca durante los trimestres JJA y DJF, que corresponden a los períodos más secos y críticos para la generación hidroeléctrica. En particular, durante DJF, estas reducciones fueron más severas, superando el 30% de la precipitación típica para este período. Históricamente, estas disminuciones en la precipitación han amenazado la disponibilidad de agua y la generación hidroeléctrica en la región (Posada-Marín *et al.*, 2019). Cabe destacar que las reducciones durante DJF fueron más pronunciadas en la región norte de la cuenca. Las estrategias de mitigación ante los riesgos hídricos-energéticos inducidos por El Niño podrían priorizarse en esta zona. Al atender estas vulnerabilidades, los actores involucrados pueden mejorar la disponibilidad de agua y asegurar una generación hidroeléctrica más confiable, reduciendo así el riesgo que los eventos El Niño representan para la seguridad energética de la región y su resiliencia frente a amenazas naturales.

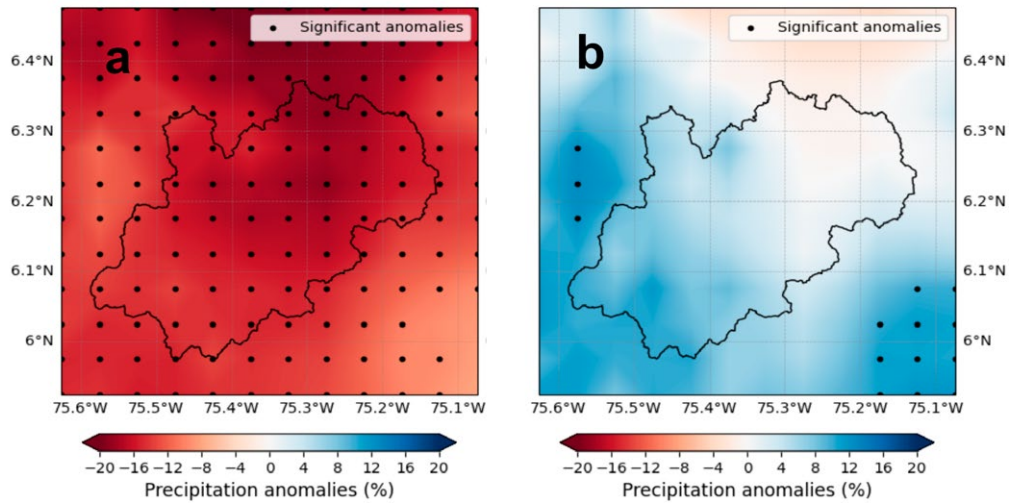


Figura 7. Distribución espacial del promedio anual de largo plazo de las anomalías de precipitación inducidas por ENOS durante (a) El Niño y (b) La Niña. Los puntos indican diferencias estadísticamente significativas (nivel de confianza del 0.95).

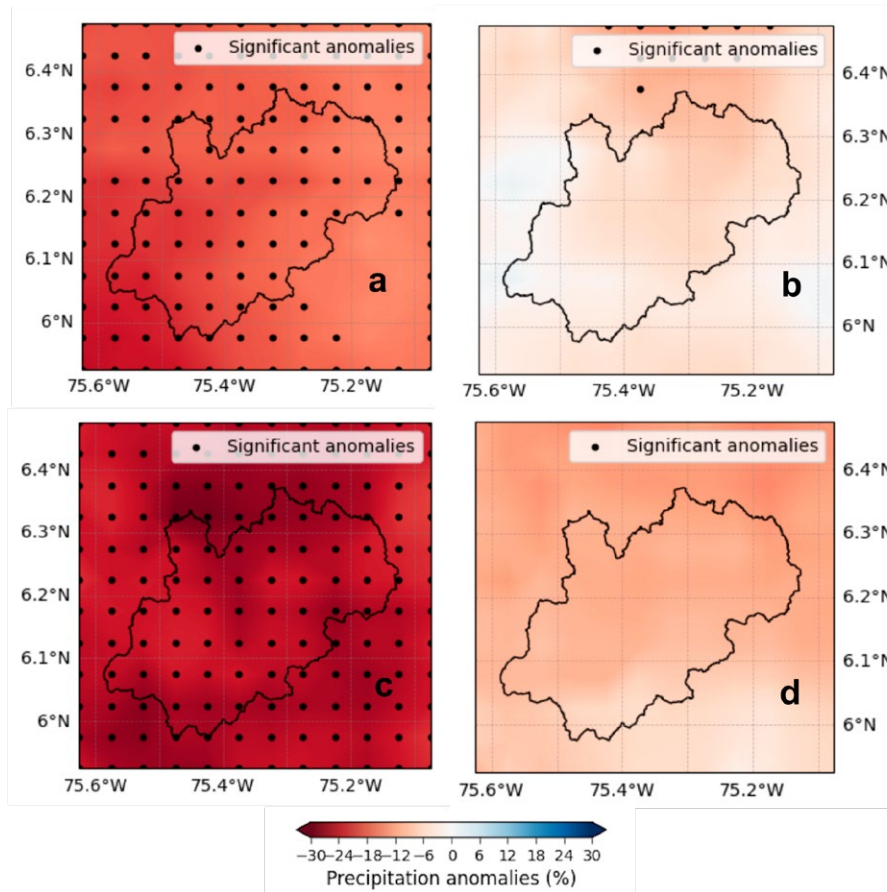


Figura 8. Distribución espacial del promedio estacional de largo plazo de las anomalías de precipitación inducidas por El Niño durante (a) JJA, (b) SON, (c) DJF y (d) MAM. Los puntos indican diferencias estadísticamente significativas (nivel de confianza del 0.95).

La Figura 9 muestra la distribución espacial del promedio estacional de largo plazo de las anomalías de precipitación inducidas por La Niña. Durante los trimestres JJA y DJF, esta fase del ENOS presentó anomalías que oscilaron entre el 16% y el 40%, lo que indica un aumento de la precipitación durante las temporadas secas, favoreciendo una mayor acumulación de agua en el suelo. De acuerdo con Emerton *et al.* (2017), este incremento en la precipitación influye en la ocurrencia y severidad de amenazas naturales

en los Andes. En consecuencia, tales aumentos de lluvia previos a las temporadas húmedas pueden desencadenar deslizamientos de tierra e inundaciones, lo que representa riesgos para la vida humana, la vivienda y el desarrollo sostenible dentro del área crítica de la cuenca. Esta región, localizada en la zona de Montaña Andina Tropical, se caracteriza por un relieve complejo con pendientes abruptas, lo que la hace particularmente vulnerable a dichas amenazas naturales (Vega *et al.*, 2024).

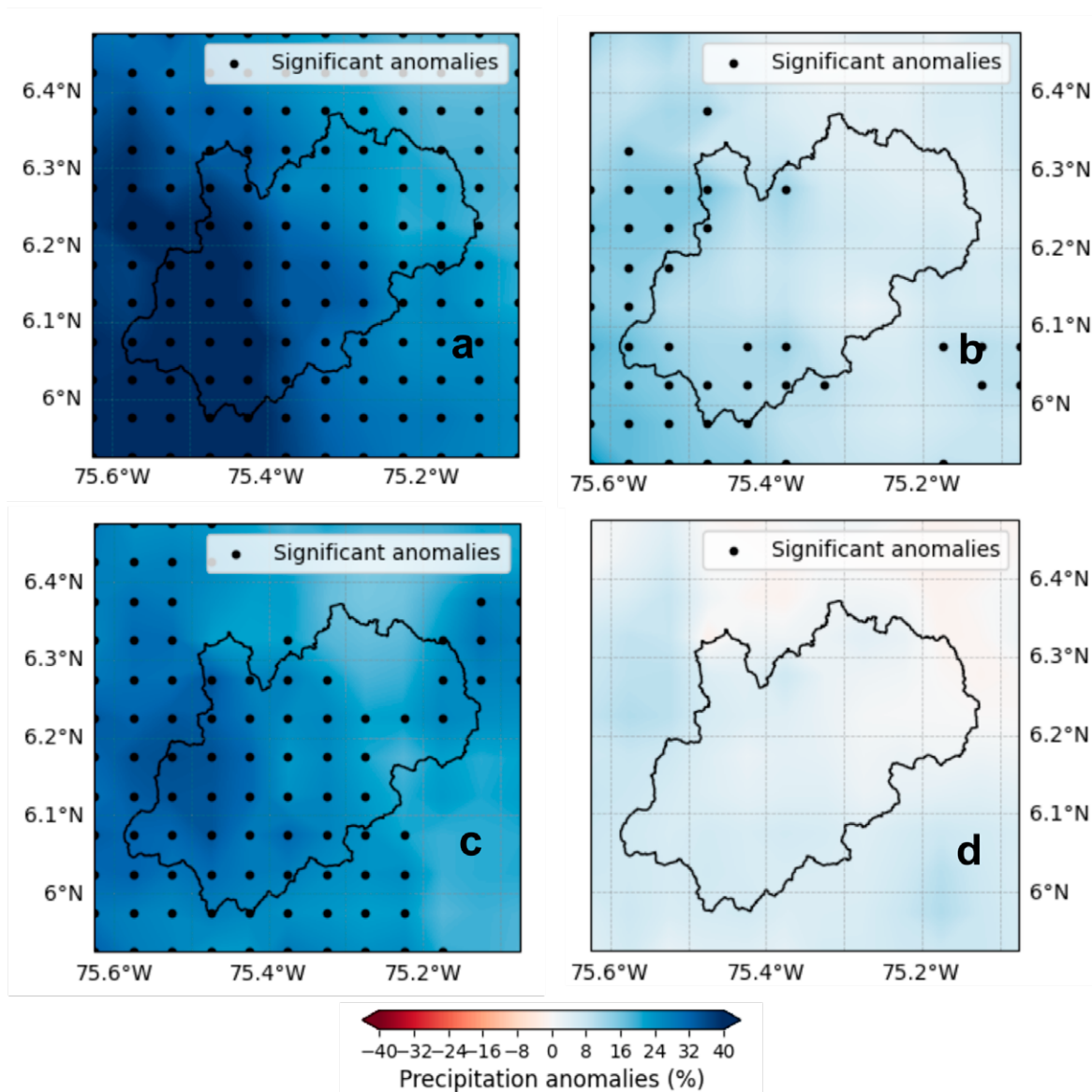


Figura 9. Distribución espacial del promedio estacional de largo plazo de las anomalías de precipitación inducidas por La Niña durante (a) JJA, (b) SON, (c) DJF y (d) MAM. Los puntos indican diferencias estadísticamente significativas (nivel de confianza del 0.95).

La Figura 10 presenta las funciones de densidad de probabilidad de la precipitación media estacional durante las fases del ENOS en la cuenca Peñol-Guatapé. Durante JJA y DJF (Figs. 10a y 10c), las estaciones más críticas para la disponibilidad hídrica, las fases de El Niño redujeron significativamente la precipitación, aumentando así la probabilidad de desabastecimiento (valores $p < 0.05$). De manera similar, La Niña generó incrementos significativos en las funciones de densidad de probabilidad de la precipitación media estacional durante estos trimestres. En contraste, para SON y MAM (Figs. 10b y 10d), los cambios en la precipitación media estacional inducidos por las fases del ENOS no fueron significativos (valores $p > 0.05$). Estas variaciones en los patrones de precipitación tienen importantes implicaciones para la ocurrencia de amenazas naturales relacionadas con el agua. La reducción de la precipitación durante

El Niño puede generar condiciones de sequía, aumentando el riesgo de desabastecimiento hídrico que afecta la generación hidroeléctrica, el suministro de agua potable y los ecosistemas. Por el contrario, el incremento de la precipitación durante La Niña puede resultar en inundaciones y deslizamientos, particularmente en áreas vulnerables. Comprender estas dinámicas es crucial para implementar estrategias efectivas de gestión del riesgo de desastres, dado que la cuenca Peñol-Guatapé puede enfrentar períodos alternantes de escasez y exceso de agua, lo que requiere medidas adaptativas para mitigar los impactos de estas amenazas naturales. Esta adición vincula los hallazgos con las implicaciones más amplias para las amenazas naturales, enfatizando la importancia de comprender estos patrones de precipitación para una gestión y mitigación efectivas.

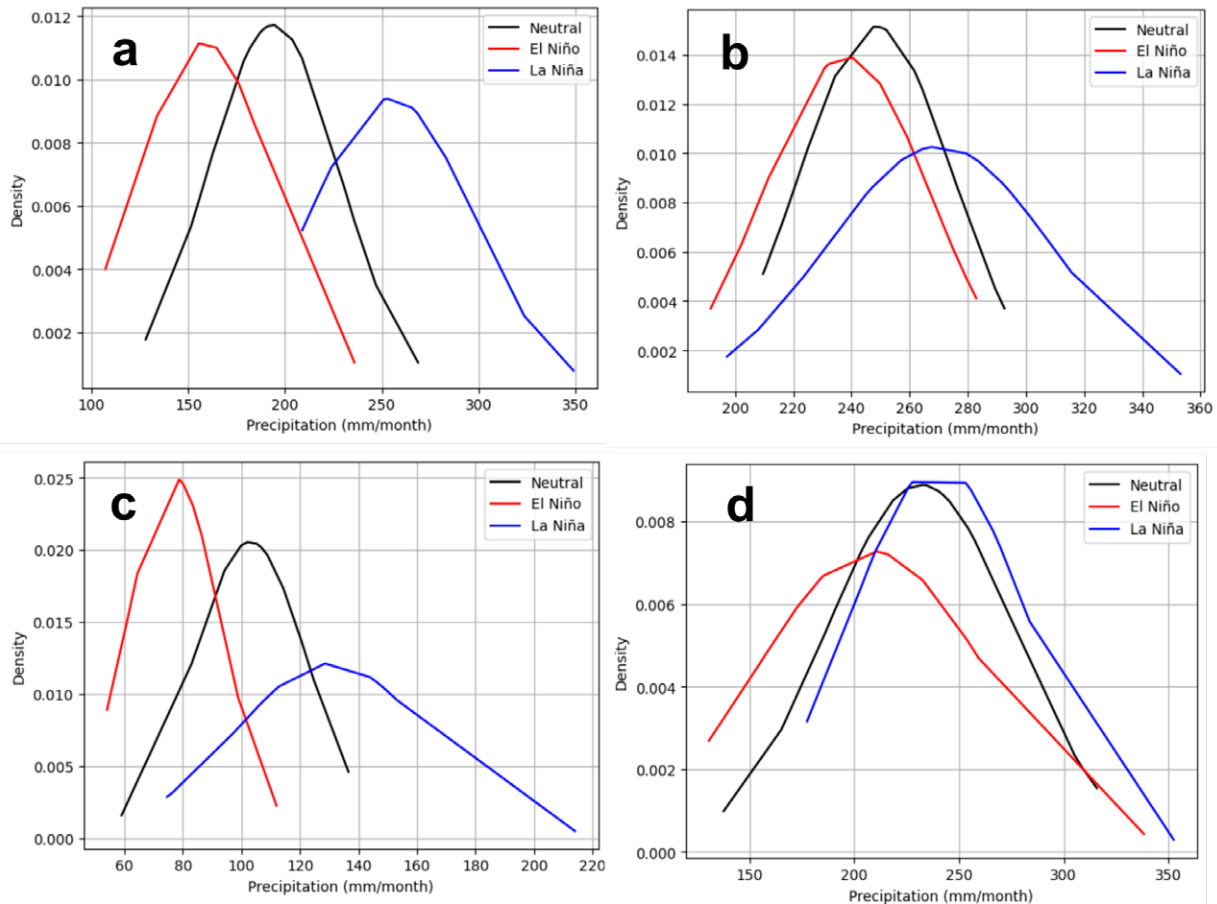


Figura 10. Funciones de densidad de probabilidad de la precipitación estacional durante las fases del ENOS: (a) JJA, (b) SON, (c) DJF y (d) MAM.

DISCUSIÓN

Los resultados de este estudio confirmaron el papel dominante del ENOS en la configuración de la variabilidad de la precipitación en la cuenca Peñol-Guatapé, pero también destacaron patrones locales que enriquecen la comprensión más amplia de las dinámicas hidroclimáticas en cuencas andinas tropicales. Aunque López-Bermeo *et al.* (2022) realizaron una validación a escala regional de CHIRPS en una zona más amplia, nuestro estudio contribuye al reducir esta evaluación a una cuenca hidroeléctrica de relevancia estratégica. Esta perspectiva localizada es necesaria porque el desempeño de los conjuntos de datos de precipitación presenta una fuerte heterogeneidad espacial, especialmente en terrenos montañosos donde los efectos topográficos amplifican o atenúan las señales del ENOS. Así, este trabajo se posiciona como un estudio de caso que demuestra cómo los conjuntos de datos de alta resolución pueden apoyar la gestión del agua a escala de cuenca bajo condiciones de variabilidad climática.

La asimetría estacional de las anomalías inducidas por el ENOS, con impactos más fuertes durante los períodos secos de JJA y DJF, subraya una vulnerabilidad crítica para la disponibilidad de agua y la producción hidroeléctrica. Dependencias similares se han reportado en otras cuencas andinas y asiáticas (Ng *et al.*, 2017; Gao *et al.*, 2022), pero nuestros resultados refuerzan que algunas cuencas tropicales de montaña son particularmente sensibles a los déficits de precipitación durante El Niño y a los excesos de lluvia durante La Niña. Esta dualidad resalta la transferibilidad de nuestra metodología y hallazgos a otras cuencas de montaña tropical donde la hidroelectricidad, los ecosistemas y las comunidades están simultáneamente expuestos a sequías e inundaciones.

Un resultado notable es la no linealidad de las respuestas de la cuenca a las fases del ENOS. Por ejemplo, el mayor aumento de precipitación no coincidió con el mayor enfriamiento del Pacífico. Esto sugiere que el forzamiento a gran escala del ENOS interactúa con dinámicas atmosféricas regionales —como los chorros de bajo nivel y el reciclaje de humedad terrestre— para configurar la hidroclimatología local (Builes-Jaramillo, Yepes & Salas, 2022; Posada-Marín *et al.*, 2023).

Además, estudios previos habían reportado que los impactos del ENOS en la precipitación en Colombia pueden exhibir un desfase temporal respecto al inicio de las condiciones del ENOS en el Pacífico (Poveda & Mesa, 1997; Poveda, Jaramillo, Gil, Quiceno & Mantilla, 2001). Aunque nuestro estudio no cuantificó este desfase para la cuenca Peñol-Guatapé, lo reconocemos como una limitación relevante y recomendamos su evaluación detallada en investigaciones futuras. Estos hallazgos exigen una interpretación más matizada de los impactos del ENOS que vaya más allá de una simple teleconexión lineal.

No obstante, este estudio abordó el ENOS como un fenómeno binario (El Niño vs. La Niña), omitiendo la diversidad de tipos de ENOS (Pacífico oriental, Pacífico central o eventos Modoki). Investigaciones recientes demuestran que estos “sabores” del ENOS ejercen impactos diferenciados sobre los extremos de precipitación y las amenazas naturales (por ejemplo, Feng, Chen & Tung, 2020; Yan, Wu, Li & Tan, 2022; Mahajan *et al.*, 2023), con implicaciones para la seguridad hídrica regional. Reconocemos esto como una limitación de nuestro trabajo, pero también como una oportunidad para que futuras investigaciones incorporen esta diversidad del ENOS en evaluaciones de riesgo para cuencas andinas tropicales.

Más allá de las implicaciones locales, los hallazgos se conectan con debates globales sobre cómo el ENOS amplifica los riesgos multiamenaza bajo el cambio climático (por ejemplo, Cai *et al.*, 2015). Estudios previos han demostrado que las fases del ENOS modulan no solo la precipitación, sino también extremos compuestos como secuencias de sequía-inundación, pérdidas agrícolas y crisis sanitarias (Singh *et al.*, 2022; Woyessa *et al.*, 2023). Al vincular las anomalías de precipitación inducidas por el ENOS con la seguridad energética en Colombia, nuestro trabajo enfatiza el papel del ENOS como un amplificador de riesgo intersectorial. Sin embargo, es importante señalar que nuestro análisis se basó en anomalías de precipitación como un proxy de primer orden para posibles impactos en la generación hidroeléctrica. Una evaluación integral requeriría incorporar variables hidrológicas, dinámicas de embalses y registros de producción energética, lo cual estaba fuera del alcance de este estudio. Por

lo tanto, reconocemos esto como una limitación metodológica y recomendamos que futuras investigaciones aborden estos vínculos con mayor detalle.

Finalmente, es importante señalar que este estudio no evaluó otras fuentes de variabilidad climática, como los ciclos solares, ni sus posibles interacciones con las fases del ENOS. Diferenciar los efectos de estos forzamientos sigue siendo un desafío para futuras investigaciones. Abordar tales complejidades, junto con la diversidad del ENOS, permitiría refinar aún más nuestra comprensión de los riesgos hidroclimáticos en regiones montañosas.

En síntesis, este estudio aporta una perspectiva localizada y orientada a la aplicación sobre los impactos del ENOS en una cuenca andina tropical. Al situar nuestros hallazgos dentro de la validación regional de conjuntos de datos de precipitación y conectarlos con debates contemporáneos sobre la diversidad del ENOS y el cambio climático, proporcionamos una contribución práctica para la gestión hídrico-energética a escala de cuenca y un puente hacia discusiones científicas más amplias sobre teleconexiones y riesgos multiamenaza. Estos hallazgos, aunque enraizados en la cuenca Peñol-Guatapé, tienen implicaciones más amplias para otras cuencas tropicales de montaña alrededor del mundo. Regiones de Asia, África y Centroamérica comparten desafíos similares de topografía compleja, fuerte sensibilidad al ENOS y dependencia de sistemas agua-energía, lo que hace que validaciones localizadas y evaluaciones de impactos del ENOS sean altamente relevantes más allá de Colombia. Al situar nuestros resultados dentro de este contexto internacional, el estudio no solo aborda una brecha de investigación a escala regional, sino que también contribuye al debate global sobre las teleconexiones océano-atmósfera y la amplificación de riesgos hidroclimáticos bajo el cambio climático.

CONCLUSIONES

Entre los conjuntos de datos de precipitación evaluados, CHIRPS resultó ser el más preciso para representar la dinámica de la precipitación en la cuenca Peñol-Guatapé, al presentar el menor error relativo y la mayor concordancia con los registros de estaciones superficiales. Esto refuerza la originalidad de nuestro estudio

como una validación localizada en una cuenca hidroenergética estratégica de los Andes, complementando análisis a escala regional con evidencia adaptada a un entorno montañoso complejo.

Los resultados confirman que el ENOS ejerce una influencia determinante en la hidroclimatología de la cuenca, donde El Niño produce reducciones severas en la precipitación—en algunos casos superiores al 30% durante las temporadas secas—mientras que La Niña incrementa la precipitación y el riesgo de inundaciones. Estas dinámicas plantean desafíos duales para la producción hidroeléctrica y la seguridad hídrica, lo que resalta la necesidad de estrategias de manejo adaptativo que integren datos de alta resolución para mejorar la anticipación de extremos climáticos en cuencas tropicales de montaña vulnerables.

Más allá del caso local, estos hallazgos tienen implicaciones amplias para otras regiones sensibles al ENOS, donde la variabilidad de la precipitación amenaza tanto los ecosistemas como la infraestructura hídrica y energética estratégica. Al situar este trabajo junto con validaciones regionales y vincularlo con debates internacionales sobre teleconexiones, destacamos la relevancia de las evaluaciones a escala de cuenca para el análisis global del riesgo hidroclimático.

Finalmente, este estudio reconoce como limitación metodológica el tratamiento del ENOS como un fenómeno binario. Investigaciones futuras deberían abordar la diversidad del ENOS y su interacción con el cambio climático, así como incorporar evaluaciones estacionales y multiamenaza de sequías, inundaciones y movimientos en masa en cuencas andinas. Avanzar en esta dirección no solo permitirá perfeccionar las estrategias locales de gestión del riesgo, sino también fortalecer la contribución de las cuencas de montaña tropicales al diálogo global sobre variabilidad climática y eventos extremos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Dirección de Investigación de la Institución Universitaria Digital de Antioquia por su apoyo durante el desarrollo de este trabajo.

FINANCIACIÓN

Este trabajo fue financiado por la Convocatoria Interna de Investigación 2023 de la Institución Universitaria Digital de Antioquia.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: J.A.P-M; Metodología: J.A.P-M, S.A.S-M, M.K.T-M; Validación: J.A.P-M, S.A.S-M; Análisis: J.A.P-M, S.A.S-M, M.K.T-M; Investigación: J.A.P-M, S.A.S-M, M.K.T-M; Redacción del manuscrito: J.A.P-M, S.A.S-M, M.K.T-M; Revisión y edición: S.A.S-M, M.K.T-M; Gestión del proyecto: J.A.P-M. Todos los autores han leído y aprobado la versión publicada del manuscrito.

REFERENCIAS

- Aguirre Ramírez, N. J., Palacio Baena, J., & Ramírez Restrepo, J. J. (2007). Características limnológicas del embalse el Peñol-Guatapé, Colombia. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 6(10), 53-66.
- Amjad, M., Yilmaz, M. T., Yucel, I., & Yilmaz, K. K. (2020). Performance evaluation of satellite- and model-based precipitation products over varying climate and complex topography. *Journal of Hydrology*, 584, 124707. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124707>
- Amjad, M., Shahzad, N., & Hassan, W. U. (2025). Accuracy assessment of potential alternatives to observed precipitation for extremes over complex topography. *Theoretical and Applied Climatology*, 156(1), 42. <https://doi.org/10.1007/s00704-024-05232-x>
- An, D., Eggeling, J., Zhang, L., He, H., Sapkota, A., Wang, Y. C., & Gao, C. (2023). Extreme precipitation patterns in the Asia-Pacific region and its correlation with El Niño-Southern Oscillation (ENSO). *Scientific Reports*, 13(1), 11068. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-38317-0> PMID:37422491 PMCID:PMC10329631
- Arias, P. A., Bellouin, N., Coppola, E., Jones, R. G., Krinner, G., Marotzke, J., *et al.* (2021). Technical summary. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, *et al.* (Eds.), *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 33–144). Cambridge University Press.
- Beck, H. E., Van Dijk, A. I., Levizzani, V., Schellekens, J., Miralles, D. G., Martens, B., & De Roo, A. (2017). MSWEP: 3-hourly 0.25 global gridded precipitation (1979–2015) by merging gauge, satellite, and reanalysis data. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(1), 589–615. <https://doi.org/10.5194/hess-21-589-2017>
- Becker, A., Finger, P., Meyer-Christoffer, A., Rudolf, B., Schamm, K., Schneider, U., & Ziese, M. (2013). A description of the global land-surface precipitation data products of the Global Precipitation Climatology Centre with sample applications including centennial (trend) analysis from 1901–present. *Earth System Science Data*, 5(1), 71–99. <https://doi.org/10.5194/essd-5-71-2013>
- Bolaños, S., Salazar, J. F., Betancur, T., & Werner, M. (2021). GRACE reveals depletion of water storage in northwestern South America between ENSO extremes. *Journal of Hydrology*, 596, 125687. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125687>
- Builes-Jaramillo, A., Yepes, J., & Salas, H. D. (2022). The Orinoco Low-Level Jet and its association with the hydroclimatology of Northern South America. *Journal of Hydrometeorology*, 23(2), 209–223. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-21-0073.1>
- Cai, W., Wang, G., Santoso, A., McPhaden, M. J., Wu, L., Jin, F. F., ... & Guilyardi, E. (2015). Increased frequency of extreme La Niña events under greenhouse warming. *Nature Climate Change*, 5(2), 132–137. <https://doi.org/10.1038/nclimate2492>
- Cai, W., McPhaden, M. J., Grimm, A. M., Rodrigues, R. R., Taschetto, A. S., Garreaud, R. D., ... & 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>
- Cai, W., Ng, B., Wang, G., Santoso, A., Wu, L., & Yang, K. (2022). Increased ENSO Sea surface

- temperature variability under four IPCC emission scenarios. *Nature Climate Change*, 12(3), 228-231. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01282-z>
- Dai, A., & Wigley, T. M. L. (2000). Global patterns of ENSO-induced precipitation. *Geophysical Research Letters*, 27(9), 1283-1286. <https://doi.org/10.1029/1999GL011140>
- Duque-Escobar, G. (2007). Amenazas naturales en los Andes de Colombia. Departamento de Matemáticas y Estadística.
- Emberson, R., Kirschbaum, D., & Stanley, T. (2021). Global connections between El Niño and landslide impacts. *Nature communications*, 12(1), 2262. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22398-4> PMID:33859185 PMCID:PMC8050240
- Emerton, R., Cloke, H. L., Stephens, E. M., Zsoter, E., Woolnough, S. J., & Pappenberger, F. (2017). Complex picture for likelihood of ENSO-driven flood hazard. *Nature communications*, 8(1), 14796. <https://doi.org/10.1038/ncomms14796> PMID:28294113 PMCID:PMC5355947
- Feng, Y., Chen, X., & Tung, K. K. (2020). ENSO diversity and the recent appearance of Central Pacific ENSO. *Climate Dynamics*, 54(1), 413-433. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-05005-7>
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., ... & Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific data*, 2(1), 1-21. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66> PMID:26646728 PMCID:PMC4672685
- Gao, J., Zhao, J., Hou, P., & Wang, H. (2022). Effects of ENSO on hydrological process and hydropower across the Lancang-Mekong River Basin. *River*, 1(2), 172-188. <https://doi.org/10.1002/rvr.2.25>
- Hafizi, H., & Sorman, A. A. (2022). Assessment of 13 gridded precipitation datasets for hydrological modeling in a mountainous basin. *Atmosphere*, 13(1), 143. <https://doi.org/10.3390/atmos13010143>
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., ... & Thépaut, J. N. (2020). The ERA5-Land global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999-2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Holmgren, M., Scheffer, M., Ezcurra, E., Gutiérrez, J. R., & Mohren, G. M. (2001). El Niño effects on the dynamics of terrestrial ecosystems. *Trends in Ecology & Evolution*, 16(2), 89-94. [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(00\)02052-8](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(00)02052-8) PMID:11165707
- Jiménez-Sánchez, G., Markowski, P. M., Jewtoukoff, V., Young, G. S., & Stensrud, D. J. (2019). The Orinoco low-level jet: An investigation of its characteristics and evolution using the WRF model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(20), 10696-10711. <https://doi.org/10.1029/2019JD030934>
- Kim, K., Chowdhury, R., Pant, P., Yamashita, E., & Ghimire, J. (2021). Assessment of ENSO risks to support transportation resilience. *Progress in disaster science*, 12, 100196. <https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2021.100196>
- Lin, J., & Qian, T. (2019). A new picture of the global impacts of El Niño-Southern oscillation. *Scientific reports*, 9(1), 17543. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-54090-5> PMID:31772238 PMCID:PMC6879734
- López-Bermeo, C., Montoya, R. D., Caro-Lopera, F. J., & Díaz-García, J. A. (2022). Validation of the accuracy of the CHIRPS precipitation dataset at representing climate variability in a tropical mountainous region of South America. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 127, 103184. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2022.103184>
- Mahajan, S., Passarella, L. S., Tang, Q., Keen, N. D., Caldwell, P. M., van Roekel, L. P., & Golaz, J. C. (2023). ENSO diversity and the simulation of its teleconnections to winter precipitation extremes over the US in high resolution earth system models. *Geophysical Research Letters*, 50(11), e2022GL102657. <https://doi.org/10.1029/2022GL102657>
- McPhaden, M. J., Zebiak, S. E., & Glantz, M. H. (2006). ENSO as an integrating concept in earth science. *science*, 314(5806), 1740-1745. <https://doi.org/10.1126/science.1132588> PMID:17170296

- Mishra, V. (2020). Long-term (1870–2018) drought reconstruction in context of surface water security in India. *Journal of Hydrology*, 580, 124228. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124228>
- Montini, T. L., Jones, C., & Carvalho, L. M. (2019). The South American low-level jet: A new climatology, variability, and changes. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(3), 1200-1218. <https://doi.org/10.1029/2018JD029634>
- Muñoz, E., Poveda, G., Arbeláez, M. P., & Vélez, I. D. (2021). Spatiotemporal dynamics of dengue in Colombia in relation to the combined effects of local climate and ENSO. *Acta Tropica*, 224, 106136. <https://doi.org/10.1016/j.actatropica.2021.106136> PMID:34555353
- Muñoz-Sabater, J., Dutra, E., Agustí-Panareda, A., Albergel, C., Arduini, G., Balsamo, G., ... & Thépaut, J. N. (2021). ERA5-Land-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth system science data*, 13(9), 4349-4383. <https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021>
- Muza, O. (2017). El Nino-Southern Oscillation influences on food security. *Journal of Sustainable Development*, 10(5), 268-279. <https://doi.org/10.5539/jsd.v10n5p268>
- Nadeem, M. U., Anjum, M. N., Afzal, A., Azam, M., Hussain, F., Usman, M., ... & Majeed, F. (2022). Assessment of multi-Satellite precipitation products over the Himalayan mountains of Pakistan, South Asia. *Sustainability*, 14(14), 8490. <https://doi.org/10.3390/su14148490>
- Ng, J. Y., Turner, S. W., & Galelli, S. (2017). Influence of El Niño Southern Oscillation on global hydropower production. *Environmental Research Letters*, 12(3), 034010. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa5ef8>
- Nguyen, P., Ombadi, M., Sorooshian, S., Hsu, K., AghaKouchak, A., Braithwaite, D., ... & Thorstensen, A. R. (2018). The PERSIANN family of global satellite precipitation data: A review and evaluation of products. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(11), 5801-5816. <https://doi.org/10.5194/hess-22-5801-2018>
- Peña-Guerrero, M. D., Umirbekov, A., Tarasova, L., & Müller, D. (2022). Comparing the performance of high-resolution global precipitation products across topographic and climatic gradients of Central Asia. *International Journal of Climatology*, 42(11), 5554-5569. <https://doi.org/10.1002/joc.7548>
- Posada-Marín, J. A., Rendón, A. M., Salazar, J. F., Mejía, J. F., & Villegas, J. C. (2019). WRF downscaling improves ERA-Interim representation of precipitation around a tropical Andean valley during El Niño: implications for GCM-scale simulation of precipitation over complex terrain. *Climate Dynamics*, 52, 3609-3629. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4403-0>
- Posada-Marín, J. A., Arias, P. A., Jaramillo, F., & Salazar, J. F. (2023). Global impacts of El Niño on terrestrial moisture recycling. *Geophysical Research Letters*, 50(10), e2023GL103147. <https://doi.org/10.1029/2023GL103147>
- Poveda, G., & Mesa, O. J. (1997). Feedbacks between hydrological processes in tropical South America and large-scale ocean-atmospheric phenomena. *Journal of climate*, 10(10), 2690-2702. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1997\)010<2690:FBHPIT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1997)010<2690:FBHPIT>2.0.CO;2)
- Poveda, G., Jaramillo, A., Gil, M. M., Quiceno, N., & Mantilla, R. I. (2001). Seasonally 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., Mesa, O. J., & Waylen, P. R. (2003). Nonlinear forecasting of river flows in Colombia based upon ENSO and its associated economic value for hydropower generation. *Climate and water: transboundary challenges in the Americas*, 351-371. https://doi.org/10.1007/978-94-015-1250-3_15
- Poveda, G., Álvarez, D. M., & Rueda, O. 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. *Climate Dynamics*, 36, 2233-2249. <https://doi.org/10.1007/s00382-010-0931-y>

- Valencia, S., Marín, D. E., Gómez, D., Hoyos, N., Salazar, J. F., & Villegas, J. C. (2023). Spatio-temporal assessment of Gridded precipitation products across topographic and climatic gradients in Colombia. *Atmospheric Research*, 285, 106643. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2023.106643>
- Vicente-Serrano, S. M., Aguilar, E., Martínez, R., Martín-Hernández, N., Azorin-Molina, C., Sánchez-Lorenzo, A., ... & Nieto, R. (2017). The complex influence of ENSO on droughts in Ecuador. *Climate Dynamics*, 48, 405-427. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3082-y>
- Sazib, N., Mladenova, L. E., & Bolten, J. D. (2020). Assessing the impact of ENSO on agriculture over Africa using earth observation data. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4, 509914. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.509914>
- Sierra, J. P., Arias, P. A., Durán-Quesada, A. M., Tapias, K. A., Vieira, S. C., & Martínez, J. A. (2021). The Choco low-level jet: past, present and future. *Climate Dynamics*, 56, 2667-2692. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05611-w>
- Singh, J., Ashfaq, M., Skinner, C. B., Anderson, W. B., Mishra, V., & Singh, D. (2022). Enhanced risk of concurrent regional droughts with increased ENSO variability and warming. *Nature Climate Change*, 12(2), 163-170. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01276-3>
- Skofronick-Jackson, G., Petersen, W. A., Berg, W., Kidd, C., Stocker, E. F., Kirschbaum, D. B., ... & Wilheit, T. (2017). The Global Precipitation Measurement (GPM) mission for science and society. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(8), 1679-1695. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00306.1> PMID:31359880 PMCID:PMC6662228
- Sun, X., Renard, B., Thyer, M., Westra, S., & Lang, M. (2015). A global analysis of the asymmetric effect of ENSO on extreme precipitation. *Journal of Hydrology*, 530, 51-65. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.09.016>
- Vega, J., Barco, J., & Hidalgo, C. (2024). Space-time analysis of the relationship between landslides occurrence, precipitation variability and ENSO in the Tropical Andean Mountain region in Colombia. *Landslides*, 1-22. <https://doi.org/10.1007/s10346-024-02225-9>
- Veldkamp, T. I., Wada, Y., de Moel, H., Kumm, M., Eisner, S., Aerts, J. C., & Ward, P. J. (2015). Changing mechanism of global water scarcity events: Impacts of socioeconomic changes and inter-annual hydro-climatic variability. *Global Environmental Change*, 32, 18-29. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.02.011>
- Vilímek, V., Hanzlík, J., Sládek, I., Šandov, M., & Santillán, N. (2013). The share of landslides in the occurrence of natural hazards and the significance of El Niño in the Cordillera Blanca and Cordillera Negra Mountains, Peru. *Landslides: global risk preparedness*, 133-148. https://doi.org/10.1007/978-3-642-22087-6_9
- Wang, C. (2007). Variability of the Caribbean low-level jet and its relations to climate. *Climate dynamics*, 29, 411-422. <https://doi.org/10.1007/s00382-007-0243-z>
- Woyessa, A., Siebert, A., Owusu, A., Cousin, R., Dinku, T., & Thomson, M. C. (2023). El Niño and other climatic drivers of epidemic malaria in Ethiopia: new tools for national health adaptation plans. *Malaria Journal*, 22(1), 195. <https://doi.org/10.1186/s12936-023-04621-3> PMID:37355627 PMCID:PMC10290321
- Yan, Y., Wu, H., Gu, G., Ward, P. J., Luo, L., Li, X., ... & Tao, J. (2020). Exploring the ENSO impact on Basin-scale floods using hydrological simulations and TRMM precipitation. *Geophysical research letters*, 47(22), e2020GL089476. <https://doi.org/10.1029/2020GL089476>
- Yan, Z., Wu, B., Li, T., & Tan, G. (2022). Mechanisms determining diversity of ENSO-driven equatorial precipitation anomalies. *Journal of Climate*, 35(3), 923-939. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-21-0363.1>
- Yang, X., Wu, J., Liu, J., & Ye, X. (2021). Changes of extreme precipitation and possible influence of ENSO events in a humid basin in China. *Atmosphere*, 12(11), 1522. <https://doi.org/10.3390/atmos12111522>