

Relación entre el fenómeno ENOS y las tendencias climáticas a largo plazo con la variación de la superficie de los glaciares

Association of ENSO and Long-Term Climatic Trends with Glacier Area Variation in Los Nevados National Natural Park

Yulia Ivanova¹   Julián D. Castellanos-Gutiérrez¹  Luisa F. Yustres-Quintero¹ 

¹ Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá D.C, Colombia.

Resumen

Introducción: Los glaciares tropicales son sensibles a la variabilidad climática y al calentamiento global. En Colombia, muestran una clara tendencia a la reducción de su superficie, aunque las fluctuaciones interanuales están estrechamente relacionadas con el fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENOS).

Objetivo: Este estudio cuantifica la contribución relativa del cambio climático global y del fenómeno ENOS a la variabilidad de los glaciares y la capa de nieve en las montañas Ruiz, Santa Isabel y Tolima, dentro del Parque Nacional Natural de Los Nevados.

Metodología: Se analizaron datos climáticos (1982-2024) y el Índice Multivariante ENSO (MEI.v2) mediante pruebas estadísticas de tendencia y variabilidad. Se utilizaron modelos de regresión lineal para separar el efecto a largo plazo del cambio climático de la influencia interanual de ENSO.

Resultados: Según el análisis de descomposición de la pendiente de las series temporales observadas, previstas y residuales, el componente residual atribuido al fenómeno ENOS representó entre el 78,2 % y el 84,8 %, mientras que la contribución atribuible al efecto del cambio climático osciló entre el 15,2 % y el 21,8 %.

Conclusiones: Aunque el ENOS domina las fluctuaciones a corto plazo, el cambio climático impulsa el retroceso a largo plazo. Si la ocurrencia simultánea de fases El Niño y el calentamiento acelerado genera efectos compuestos sobre la pérdida glaciaria constituye una pregunta abierta que requiere análisis estadístico de interacción explícito. Estos resultados proporcionan información clave para la gestión de los recursos hídricos en la región del Eje Cafetero colombiano.

Palabras clave: glaciares tropicales, retroceso glaciario, NDSI, Landsat, Andes colombianos, Parque Nacional Natural Los Nevados, variabilidad ENSO.

Abstract

Introduction: Tropical glaciers are sensitive to climate variability and global warming. In Colombia, they exhibit a clear trend toward area reduction, although interannual fluctuations are strongly linked to the El Niño-Southern Oscillation (ENSO).

Objective: This study quantifies the relative contribution of global climate change and the ENSO phenomenon to the variability of glaciers and snow cover in the Ruiz, Santa Isabel, and Tolima mountains within Los Nevados National Natural Park.

Methodology: Climate data (1982–2024) and the Multivariate ENSO Index (MEI.v2) were analyzed using statistical trend and variability tests. Glacier and snow areas were mapped from 24 Landsat images (1986–2023) through the Normalized Difference Snow Index (NDSI), supervised classification, and QGIS. Linear regression models were used to separate the long-term effect of climate change from the interannual influence of ENSO.

Results: ENSO explained 78.2–84.8% of the interannual variability in glacier area, while climate change contributed 15.2–21.8%. All glaciers showed statistically significant negative trends.

Conclusions: Although ENSO dominates short-term fluctuations, climate change drives long-term retreat. The warm phase of ENSO can accelerate glacier melting when combined with global warming. These results provide key inputs for water resource management in the Colombian Coffee Axis region.

Keywords: tropical glaciers, glacier retreat, NDSI, Landsat, Colombian Andes, Los Nevados National Natural Park, ENSO variability.

¿Cómo citar?

Ivanova Y, Castellanos-Gutiérrez JD, Yustres-Quintero LF. Relación entre el fenómeno ENOS y las tendencias climáticas a largo plazo con la variación de la superficie de los glaciares. Ingeniería y Competitividad, 2026, 28(2) e-20515786

<https://doi.org/10.25100/iyv.v28i2.15786>

Recibido: 14/04/26

Revisado: 27/05/26

Aceptado: 16/06/26

Online: 17/06/26

Correspondencia

yulia.ivanova@unimilitar.edu.co



¿Por qué se realizó?

Los glaciares tropicales son ecosistemas altamente sensibles a la variabilidad climática y al calentamiento global. En Colombia, los glaciares del Parque Nacional Natural Los Nevados muestran una tendencia general a la disminución de su superficie, aunque experimentan fluctuaciones interanuales significativas asociadas al fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS). Este estudio tiene como objetivo cuantificar la contribución relativa del cambio climático global y del ENOS a la variabilidad de la capa de nieve y los glaciares.

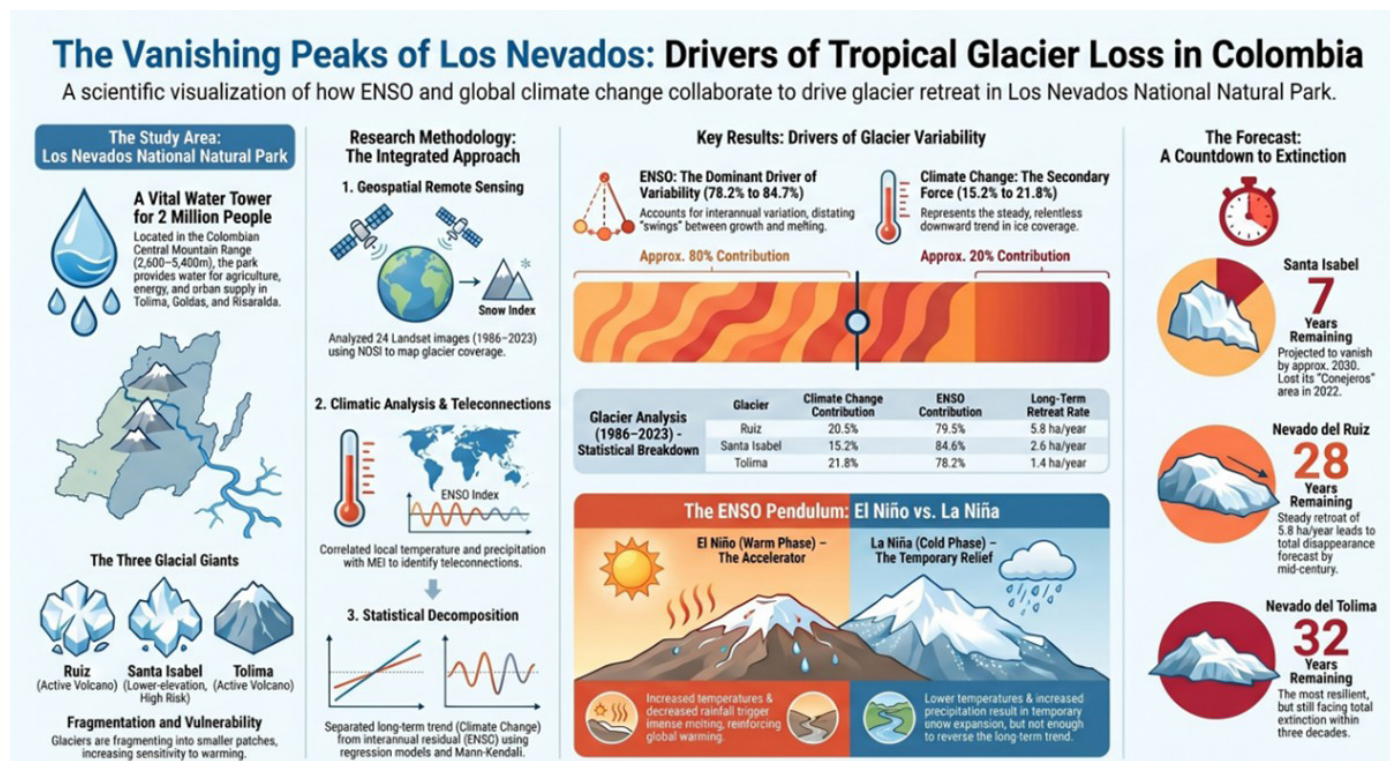
¿Cuáles fueron los resultados más relevantes?

El fenómeno ENOS explicó la mayor parte de la variabilidad interanual en los tres glaciares, mientras que el cambio climático desempeña un papel secundario en dicha variabilidad. Los tres glaciares (Ruiz, Santa Isabel y Tolima) mostraron tendencias negativas estadísticamente significativas. Las proyecciones indican que, considerando únicamente el efecto del cambio climático, el glaciar Santa Isabel podría desaparecer para 2026, el glaciar Ruiz en 28 años y el glaciar Tolima en 32 años.

¿Qué aportan?

Este estudio proporciona una herramienta metodológica basada en la teledetección y el modelado estadístico para distinguir los efectos del ENOS y el cambio climático en los glaciares tropicales. Los resultados son útiles para la planificación y gestión de los recursos hídricos.

Graphical Abstract



Introducción

Varios autores consideran que los glaciares tropicales son indicadores del cambio climático y la variabilidad climática (2). Son importantes porque suministran agua dulce a diversas cuencas fluviales, que sirven como fuentes de agua para distintos ecosistemas y actividades socioeconómicas (1). Algunos autores consideran que los glaciares tropicales pueden considerarse indicadores de variabilidad y cambio climático debido a su sensibilidad al equilibrio entre ablación y acumulación (3), (2), (4). La ubicación ecuatorial de los glaciares tropicales los hace sensibles al cambio climático global, así como a condiciones locales como altitud, pendiente, clima local y exposición a la radiación solar, lo que facilita su dinámica de retroceso (5).

La cordillera de los Andes es la más larga del mundo, extendiéndose por casi 7.000 kilómetros a lo largo de siete países del continente. Los Andes suministran agua a casi 75 millones de personas y sus picos nevados cumplen funciones importantes como regular el flujo de agua superficial, la formación de nubes y la precipitación, además de formar parte de la circulación atmósfera-océano (6). La mayoría de los glaciares sobre la cordillera se encuentran en Perú, mientras que en otras zonas son escasos debido a la baja precipitación. Además de ser una fuente de suministro para diferentes poblaciones, los caudales de agua que se originan en las cumbres cubiertas de nieve se utilizan para la producción de energía y la producción agrícola. Según algunas estadísticas, aproximadamente el 44% de la población andina vive en zonas de alta montaña. Colombia no es una excepción, ya que el 41,5% de la población del país vive en la región andina, donde el 55% de las áreas urbanas del país se encuentran en la cordillera. Por esta razón, el conocimiento de la dinámica de los ecosistemas de alta montaña es importante tanto desde el punto de vista de su conservación y preservación, como desde el punto de vista de una gestión adecuada del suelo para satisfacer las necesidades humanas de servicios ecosistémicos preservando la funcionalidad ecosistémica.

Algunos de estos ecosistemas de alta montaña son picos glaciares. Actualmente, Colombia cuenta con seis glaciares: Sierra Nevada de Santa Marta, Sierra Nevada de El Cocuy, Nevado del Ruiz, Nevado de Santa Isabel, Nevado del Tolima y Nevado del Huila. (7). Según inventarios realizados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y otros investigadores del campo (8, 9), está confirmado que en las últimas décadas se ha observado una tasa anual estimada de retirada del 1–3%, lo que indica su inminente desaparición a medio plazo (4). Según (10), ocho picos nevados han desaparecido en el último siglo, y el siguiente pico en desaparecer es Santa Isabel. La zona conocida como Conejeras desapareció como resultado del fenómeno El Niño en 2022 y porque se encuentra a menos de 5.000 metros sobre el nivel del mar.

Esto es significativo porque los glaciares del país contienen fuentes de suministro de agua y dan lugar a diversos sistemas fluviales. El deshielo de estos glaciares puede provocar escasez de agua, cambios en la regulación del agua, impactos en los niveles de bajo caudal de los ríos, reducción de la disponibilidad de agua, riesgo de inundaciones repentinas o alteraciones en los ecosistemas (11). Este escenario abarca todas las montañas nevadas del país (12). Desde la perspectiva de la ingeniería de recursos hídricos, la desaparición proyectada de estos glaciares tiene implicaciones directas para la regulación del caudal, la infraestructura de suministro de agua y la planificación del riesgo de déficit. El río Chinchiná, originario del Nevado del Ruiz, abastece aproximadamente a 434.000

habitantes de Manizales; los ríos Combeima y Saldaña, alimentados por el Nevado del Tolima, son las principales fuentes de agua para gran parte del departamento de Tolima. La reducción gradual de la contribución glaciar —estimada en hasta un 25% del caudal de la estación seca en cuencas andinas (5)— requerirá actualizar los criterios de diseño de infraestructuras hidráulicas y anticipar escenarios de déficit estacional a medio plazo. A pesar de la relevancia de esta dinámica, no se realiza un análisis detallado que contribuya a comprender cómo el fenómeno del cambio climático global y el evento macroclimático ENSO afectan a las variaciones en la superficie glaciar, considerando que este último, siendo un glaciar tropical, es sensible a las variaciones interanuales de precipitaciones y temperaturas causadas por las fases frías y cálidas del evento ENSO.

El estudio plantea la hipótesis de que las variaciones año tras año en las zonas cubiertas de nieve están influenciadas no solo por los efectos del calentamiento global, sino también por eventos ENSO. Por esta razón, este estudio analiza la variación de la superficie glaciar en Nevado del Ruiz, Nevado de Santa Isabel y Nevado del Tolima entre 1986 y 2023, y evalúa su asociación con tendencias climáticas a largo plazo y la variabilidad interanual relacionada con ENSO.

Los resultados de este análisis, así como la proyección de la vida de los glaciares, pueden servir como insayo para que las entidades territoriales y de planificación de recursos hídricos realicen investigaciones relacionadas con el efecto del deshielo glaciar en la disponibilidad y variabilidad del agua en las cuencas glaciares, con el fin de proyectar su conservación y uso sostenible del agua.

Materiales y métodos

Descripción del área de estudio

El Parque Natural Nacional de Los Nevados está situado en la Cordillera Central de Colombia, entre los departamentos de Caldas, Risaralda, Quindío y Tolima. Incluye los glaciares Nevado del Ruiz, Nevado de Santa Isabel y Nevado del Tolima (12). El área protegida del Parque Natural Nacional de Los Nevados se encuentra aproximadamente entre: Latitud: 4°36' N y 4°57' N, Longitud: 75°12' O y 75°30' O. El Nevado del Ruiz se encuentra en el rango de altitudes de 4.800 a 5.321 metros sobre el nivel del mar; el Nevado de Santa Isabel se extiende entre 4.700 y 4.935 metros sobre el nivel del mar; y el Nevado El Tolima - de 4.800 a 5.215 metros.

El Área Protegida fue creada en 1974 para ayudar a conservar ecosistemas de importancia global como tres de los glaciares restantes del país, ecosistemas de super-páramo, páramo, humedales altos andinos y bosques altos andinos (13).

El parque abarca ocho volcanes principales: Santa Rosa, volcán Quindío, glaciar Santa Isabel, El Cisne, Cerro Bravo, Cerro Machín, glaciar Tolima y glaciar Ruiz, siendo los tres últimos activos (14). La ubicación de la PNN se presenta en (Figura 1).

Este Parque Nacional produce y regula múltiples bienes y servicios medioambientales para la ecorregión del Eje del Café. En cuanto al suministro de agua, cubre las necesidades de más de dos millones de personas en la zona cafetera y en importantes regiones productoras de arroz y algodón en el departamento de Tolima. Su protección y conservación se convierten en un elemento clave para el desarrollo socioambiental y en un eje de conexión para las iniciativas regionales de conservación (15).

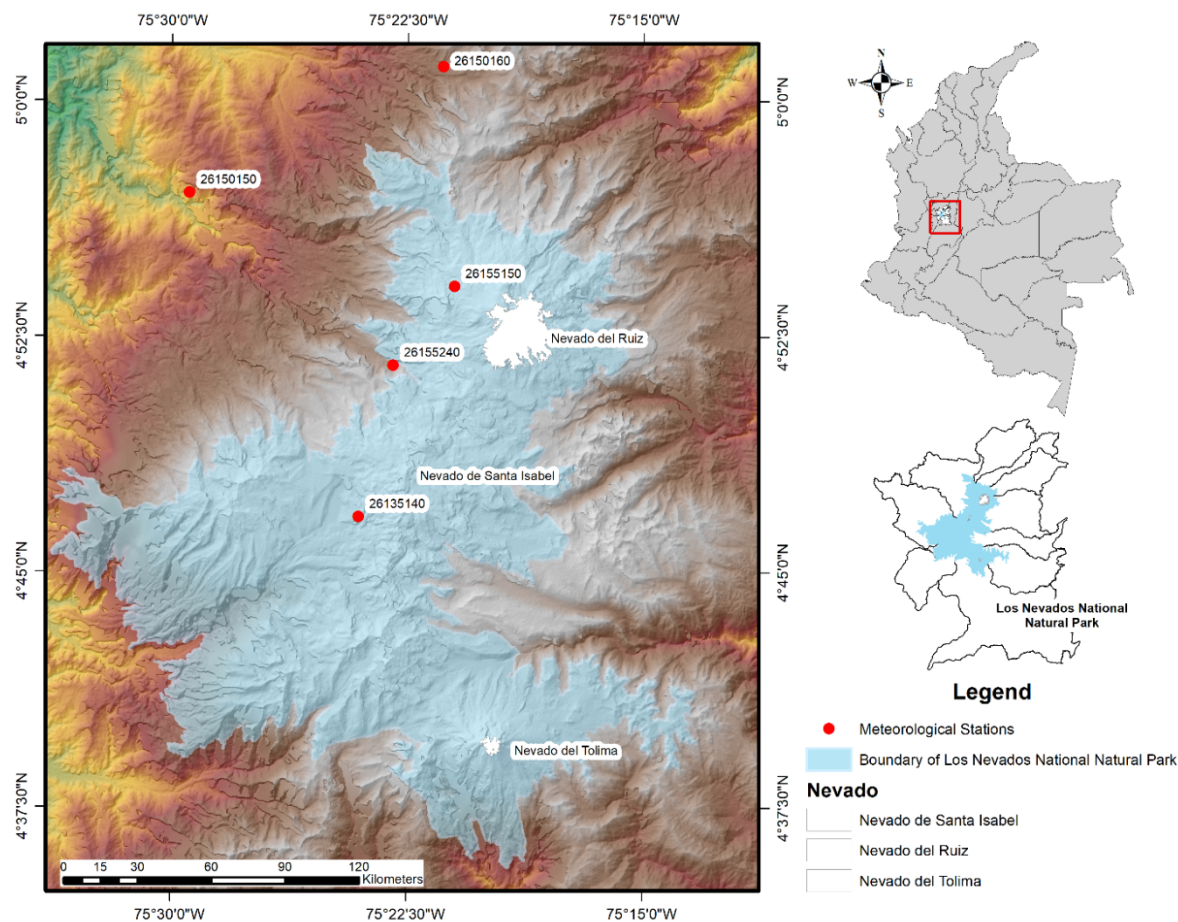


Figura 1. Ubicación del PNN Los Nevados y las estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio.
Fuente: explicación propia.

Aunque algunos expertos nacionales en el campo confirman que el retroceso de los glaciares colombianos es irreversible (16), es importante estudiarlos para comprender su dinámica y concluir sobre su sensibilidad al cambio climático y al fenómeno ENSO para proyectar su escenario futuro con mayor certeza. El estudio propuesto permite separar estos dos factores forzantes en la contracción del área glaciar. De este modo, se sabrá hasta qué punto el efecto del cambio climático influye en esta tendencia negativa y proyecta la “vida” del glaciar, así como se identificará si las variaciones interanuales del glaciar son sensibles al fenómeno ENSO, cuya incidencia se demuestra en diferentes ecosistemas estratégicos del país (17). Los resultados de este estudio proporcionan aportaciones directas para ingenieros hidráulicos y planificadores de recursos hídricos: la separación de las contribuciones de ENSO y cambio climático permite proyectar escenarios de flujo procedentes de glaciares bajo diferentes fases climáticas, apoyando el diseño de infraestructuras de almacenamiento, planes de contingencia ante sequía y marcos de asignación de agua a largo plazo para las cuencas glaciadas del Eje Cafetero Colombiano.

Pasos metodológicos

La metodología diseñada para evaluar la asociación del cambio climático y el fenómeno El Niño-Oscilación Sur (ENSO) con la variación temporal del área glaciaria se divide en tres bloques principales: análisis climático, análisis geoespacial y la integración de ambos análisis, que permiten alcanzar los resultados. Los pasos metodológicos se presentan gráficamente en la siguiente figura. El color gris corresponde a los pasos asociados con el análisis geoespacial, el azul corresponde a los estudios climáticos y el turquesa corresponde a la integración de los dos análisis anteriores.

Como se ve en (Figura 2), el proceso comienza con la obtención de las entradas. Entre la información climatológica se encuentran series temporales de precipitaciones totales y temperaturas desde las estaciones meteorológicas situadas cerca de los glaciares hasta la montaña cubierta de nieve (18). La serie del índice MEI (19), que caracteriza el fenómeno ENSO, está descargada desde la página web del Laboratorio de Ciencias Físicas de la NOAA (20). La información geoespacial se refiere a las imágenes satelitales Landsat disponibles gratuitamente en la página web del Servicio Geológico de los Estados Unidos (21).

En este estudio, la selección de imágenes satelitales estuvo limitada por la alta cobertura nubosa presente durante la mayor parte del año, causada por el paso de la Zona de Convergencia Intertropical. Por lo tanto, dado que no era posible obtener el conjunto completo de imágenes satelitales para cada mes de cada año, las imágenes correspondientes a ciertas fechas dentro de cada periodo se consideraban representativas para todo el año. Esta limitación puede generar confusión entre la cobertura de nieve estacional y la cobertura glaciaria y, como resultado, sobreestimar la contribución del evento ENSO a la variación interanual de las áreas glaciares en montañas nevadas.

Además, estos datos se complementan con estadísticas sobre las zonas glaciares, correspondientes a (7) en los años en los que no habrá imágenes de satélite de calidad disponibles para permitir la teledetección de la cobertura glaciaria. La precisión de la teledetección se evaluó utilizando una matriz de confusión, calculando la precisión global (superior al 70%) y el coeficiente de Kappa de Cohen, con un valor del 80% o superior.

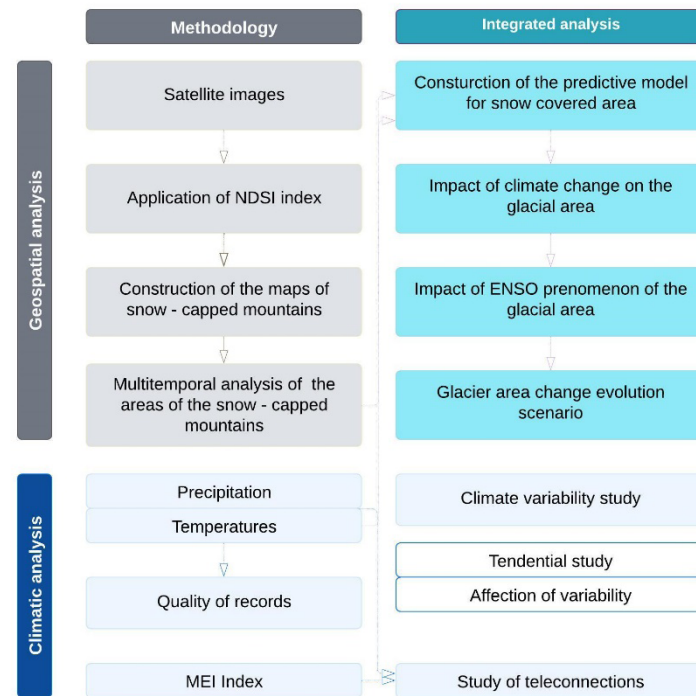


Figura 2. Metodología para evaluar el impacto del cambio climático y el fenómeno ENSO en las variaciones temporales de las áreas glaciares. Fuente: explicación propia.

Al recoger las entradas, se realizan análisis climáticos e imágenes por satélite. Inicialmente, los datos climáticos pasaron por una comprobación de calidad, que incluyó la revisión de datos faltantes, la comprobación de la consistencia e identificación de valores atípicos mediante diagramas de caja (22).

Tras este análisis, se realizó un análisis de variabilidad. El estudio de la variabilidad de las series climáticas consiste en analizar la homogeneidad por valor y varianza medios, así como en construir teleconexiones con el Índice Multivariante ENSO (MEI) (23) que identifica la manifestación del evento ENSO. El estudio opera bajo la hipótesis de que el efecto del cambio climático global se refleja en la serie climática, principalmente en la aparición de una tendencia estadísticamente significativa y en el cambio de los patrones de variabilidad de estos (24).

Normalmente, la tendencia en las series de temperatura está aumentando (25), mientras que el tipo de tendencia, en respuesta al cambio climático, en los registros de precipitaciones es diferente en varias zonas del país (26). Para determinar si la tendencia es estadísticamente significativa, se utilizó la prueba t con un nivel de significación de 0,05 para evaluar la pendiente de la regresión lineal en las series climáticas de precipitación y temperatura, un método que ha demostrado ser eficaz en estudios climáticos (27). En algunas ocasiones, el efecto del cambio climático provoca la variabilidad de los principales parámetros climáticos. Por esta razón, los registros de precipitación y temperaturas medias se analizaron para detectar cambios en la variabilidad utilizando la prueba de Fisher. Tras realizar estos análisis, podemos concluir si hay evidencia de que el cambio climático está afectando al clima regional, lo que podría tener repercusiones en la dinámica de los glaciares.

Además del cambio climático global, existen otros fenómenos climáticos cuya influencia en el clima colombiano ha sido ampliamente documentada en diversos estudios. Entre ellas, destaca la Oscilación del Atlántico Norte (NAO), y especialmente el fenómeno ENSO, cuya influencia sobre las variables climáticas en Colombia ha demostrado ser predominante sobre otros eventos.

En este estudio, se asume que los residuos de las series de precipitación y temperatura —una vez descontado el efecto de tendencia asociado al cambio climático— corresponden principalmente a la influencia de la ENSO. Por lo tanto, estos residuos se correlacionaron con el índice multivariante MEI, que caracteriza la intensidad y presencia de este fenómeno climático. El coeficiente de determinación obtenido refleja el porcentaje de variabilidad de la serie climática explicada por el ENSO, mientras que el valor *p* nos permite evaluar la significación estadística de esa correlación (28).

Tras realizar análisis climáticos, se interpreta la información geoespacial, que incluye la identificación del área superficial cubierta por glaciares y nieve en imágenes satelitales. Este paso se llevó a cabo utilizando el índice de nieve diferencial normalizada NDSI (29), que se define en función del tipo de imágenes satelitales Landsat de la siguiente manera:

$$\text{Landsat 4 - 7, NDSI} = \frac{(\text{Band}_2 - \text{Band}_5)}{(\text{Band}_2 + \text{Band}_5)} \quad (1)$$

$$\text{Landsat 8 - 9, NDSI} = \frac{(\text{Band}_3 - \text{Band}_6)}{(\text{Band}_3 + \text{Band}_6)} \quad (2)$$

Los valores superiores a 0,0 en los índices utilizados indican la presencia de cobertura nevada, mientras que valores iguales o menores a 0,0 corresponden a otros tipos de cobertura superficial. Una vez identificadas las áreas glaciares y nevadas, los archivos ráster se vectorizan mediante un sistema de información geográfica (30), lo que nos permite obtener, para cada año analizado, la serie interanual del área cubierta por glaciares. El estudio tiene como objetivo evaluar la variación en la cobertura de nieve, incluyendo las áreas glaciares y superficiales de nieve, y determinar qué parte de esta variación interanual se debe a los efectos del cambio climático global y cuál está asociada al fenómeno ENSO. Por esta razón, el índice NDSI se utilizó inicialmente para evaluar la cobertura de nieve o no nieve. Los resultados se sometieron a una edición supervisada utilizando una combinación de bandas verdes, visibles e infrarrojas de onda corta (SWIR) para ajustar las salidas gráficas de teledetección a las dos cubiertas del ecosistema.

Como en el caso de las series climáticas, se asume que la tendencia estadísticamente significativa observada en estas series se atribuye al efecto del cambio climático global; a su vez, el componente residual está asociado a la influencia de eventos macroclimáticos, siendo el fenómeno ENSO el mayor peso relativo. La importancia de las tendencias se evaluó utilizando la prueba *t*. La elección de esta prueba se justifica por su idoneidad para analizar series temporales cortas que no necesariamente siguen una distribución normal.

Finalmente, para separar la influencia del cambio climático y el fenómeno ENSO en las zonas glaciares de las montañas cubiertas de nieve, se aplica el esquema presentado en la Tabla 1. Para su implementación, inicialmente se construyeron modelos de regresión entre la serie de áreas de cobertura glaciar y la temperatura media de la estación meteorológica más cercana a cada glaciar.

Dado que las series de temperatura están afectadas por el cambio climático, el estudio consideró que la serie de áreas glaciares predichas es el resultado del cambio climático global, mientras que el término residual, obtenido como la diferencia entre los valores de área observados por teledetección y las series predichas, es el resultado del fenómeno ENSO. De este modo, por cada montaña cubierta de nieve, se obtuvieron tres series de zonas glaciares: observadas, pronosticadas y residuales. Para cada una de estas se representaron las líneas de tendencia lineales y sus respectivas pendientes. El porcentaje del impacto del cambio climático en los glaciares se definió utilizando las relaciones entre las laderas que se muestran a continuación.

Tabla 1. Se desarrolló un algoritmo de decisión para identificar las contribuciones del cambio climático y el fenómeno (ENSO) a las zonas glaciares de montañas nevadas.

A_{obs_i}	$A_{i\ pro}$	$A_{res\ i}$	Contribución		Conclusión
	Tendencia prevista de la área	Tendencia de área residual	Cambio climático	ENSO	
Tendencia negativa en la zona glaciar	<0	<0	i_{pre}/i_{obs}	i_{res}/i_{obs}	Ambos factores influyen en la disminución de la superficie glaciar
	<0	>0	100	0	El cambio climático afecta la disminución de la superficie glaciar
	>0	<0	0	100	El fenómeno ENSO afecta la disminución del área glaciar
$i -$	Tendencia				

Fuente: explicación propia.

Donde:

i_{pre} – pendiente de la serie construida según el modelo predictivo

i_{obs} – pendiente de la serie observada del área glaciar

i_{res} – pendiente de la serie residual

Esto permite identificar hasta qué punto la variación en la superficie del glaciar se debe al cambio climático global y hasta qué punto se debe al fenómeno El Niño-Oscilación Meridional (ENSO) contribuye a ello. Además, este análisis nos permite determinar la superficie perdida por los glaciares debido al cambio climático mediante una ecuación de regresión lineal. Conocer la pérdida anual de área glaciar y su tamaño actual nos permite calcular el tiempo esperado hasta la desaparición completa. Luego podemos comparar estas previsiones con estudios nacionales previos que consideran no solo el efecto del cambio climático, sino también la tendencia general y los efectos de otros fenómenos climáticos que pueden afectar la variabilidad interanual.

Basándose en todos los pasos metodológicos presentados anteriormente, se dieron respuestas a las siguientes preguntas: ¿Muestra la capa glaciaria una tendencia significativa hacia una disminución del área glaciaria? ¿En qué medida depende la dinámica del glaciario del cambio climático global y del fenómeno ENSO? ¿En cuántos años se espera la pérdida total de los tres glaciares, teniendo en cuenta solo el efecto del cambio climático global? Finalmente, evaluar la sensibilidad del área del glaciario al régimen de las principales variables climáticas, como la precipitación y la temperatura.

Resultados

A continuación se muestran los resultados relacionados con el análisis climático, la teledetección y el impacto del cambio climático y el fenómeno ENSO en los glaciares del PNN Los Nevados.

En la región del parque, hay un número limitado de estaciones meteorológicas con un periodo de registro suficiente para realizar estudios de variabilidad climática. Las estaciones más recientes comenzaron sus mediciones en 2018, y algunas están suspendidas o en mantenimiento debido a los efectos adversos de las erupciones del volcán Ruiz en 2023. Se identificaron cinco estaciones meteorológicas con registros entre 1982 y 2024 para el área de estudio. Las estaciones 26155240 – PNN Nevados, 26155150 – Las Brisas y 26135140 – Laguna tienen datos sobre precipitaciones y temperatura, mientras que las estaciones 26150160 – La Esperanza y 26150150 – Papayal solo registran datos de precipitación. La ubicación de estas estaciones se muestra en la (Figura 1).

Las series temporales de variables climáticas resultan de diversos fenómenos macroclimáticos. Los efectos de estos fenómenos se reflejan en la variabilidad climática a lo largo de diferentes escalas temporales. El estudio consideró que la existencia de una tendencia anual está asociada con los efectos del cambio climático global, y que la variabilidad interanual se debe a un conjunto de fenómenos como el ENSO (31), que tiene el mayor impacto en la variabilidad climática interanual en Colombia.

En el contexto nacional, según la extensión de la serie histórica, no parece posible identificar la ciclicidad interanual. Por esta razón, se analizaron la serie histórica de precipitaciones y las temperaturas medias anuales en función de su dependencia del cambio climático y del evento ENSO. El cambio climático se refleja en el cambio de valores medios y variabilidad (pruebas t y pruebas de Fisher) (32), mientras que la incidencia de ENSO se determina como la correlación entre el término residual de la serie histórica y el valor medio del índice anual MEI. Los resultados del análisis de homocedasticidad (prueba F) y homogeneidad (prueba t) se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. El análisis de homocedasticidad (prueba F) y homogeneidad (prueba t) para las temperaturas.

Código	prueba t (valor P-)	Prueba F (P – valor)
26155150	0.002	0.010
26135140	0.002	0.408
26155240	0.008	0.012

Como se puede ver en el resumen anterior, dos de las tres estaciones confirmaron que, durante el periodo de estudio, la variación de las temperaturas ha cambiado. Revisando los valores de varianza, ha aumentado en ambas estaciones. Todos los registros de temperatura indican una tendencia estadísticamente significativa al alza. En resumen, en el área del parque, las temperaturas medias han aumentado, acompañadas de una mayor variabilidad temporal.

En contraste, el análisis de la serie anual de precipitación total revela un patrón menos uniforme. Los resultados de las pruebas de variabilidad y homogeneidad se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. El análisis de homocedasticidad (prueba F) y homogeneidad (prueba t) para las temperaturas.

Código	prueba t (valor P-)	Prueba F (P – valor)
26135140	0.25	0.21
26150150	0.53	0.26
26150160	0.16	0.20
26150240	0.27	0.00
25155150	0.07	0.02

Estos resultados muestran que, en dos de las cinco estaciones evaluadas, existe un cambio estadísticamente significativo en la varianza de la precipitación, lo que sugiere una disminución en su variabilidad temporal. Sin embargo, las emisoras restantes no mostraron cambios significativos ni en la varianza ni en la media. Además, el análisis de tendencias confirma que ninguna de las series de precipitaciones presenta tendencias estadísticamente significativas de aumento o disminución a lo largo del tiempo.

Basándose en estos resultados, se concluye que la serie de temperaturas medias sí muestra una clara influencia del cambio climático global, reflejada en el aumento sostenido de sus valores medios. En contraste, la serie total anual de precipitación no muestra cambios significativos, lo que coincide con los hallazgos reportados por estudios nacionales previos. Estos estudios indican que el impacto del cambio climático en la precipitación en Colombia no es tan pronunciado como el observado en el régimen térmico. (33)

El efecto del calentamiento global es evidente en un aumento de las temperaturas medias, con un incremento de 0,14 °C cada 10 años, junto con una mayor variabilidad. El efecto sobre la precipitación anual no está claro, ya que ninguna estación meteorológica identificó una tendencia estadísticamente significativa y solo dos reportaron una disminución en la variabilidad de sus lecturas.

Para encontrar la relación entre las variables climáticas y el fenómeno ENSO, se extrajeron las tendencias de la serie de temperaturas medias, dejando el término residual. Este término se correlacionó con los valores medios anuales del índice MEI, mientras que las series de precipitación, al no mostrar una tendencia estadísticamente significativa, se correlacionaron directamente con el índice climático.

El término residual de la serie de temperaturas está directamente relacionado con el índice MEI, donde los valores positivos del índice corresponden a la fase cálida (El Niño) del fenómeno,

indicando un aumento de las temperaturas medias con un gradiente medio de 0,06 °C por cada cambio de 0,1 unidad en el índice climático MEI. La precipitación muestra una relación inversa con la precipitación anual total: la fase cálida produce una disminución con un gradiente medio de alrededor de 20 mm de precipitación anual total por cada 0,1 unidad de cambio en el índice climático entre estaciones. Un resumen numérico de las teleconexiones construidas se presenta en la Tabla 4.

Tabla 4. Correlación entre variables climáticas y el índice ENSO.

Variable climática	Parámetro	Código				
		26135140	26150150	26150160	26150240	26155150
Precipitación anual total	R2	0.23	0.18	0.19	0.005	0.20
	Valor p	0.0006	0.0035	0.0023	0.102	0.002
Temperatura media	R2	0.29			0.29	0.27
	Valor p	0.0002			0.0002	0.0004

Fuente: explicación propia.

Como se muestra en Tabla 2El 0,20 % del patrón interanual de precipitaciones depende del fenómeno ENSO, con solo una estación, código 26150240, que no muestra una correlación estadísticamente significativa con este evento climático. Todos los registros de temperatura confirmaron que una media del 29% del patrón interanual depende del ENSO.

El siguiente paso metodológico fue identificar las áreas correspondientes a las capas glaciares y analizar su variabilidad interanual. Para ello, se recopilaron un total de 23 imágenes satelitales, en su mayoría de la misión Landsat, cuya información se detalla a continuación. Las imágenes satelitales de Nivel 1 y Nivel 2 de Landsat (sin corregir y con corrección atmosférica) tienen la misma resolución espacial de 30 metros. Tabla 5.

Tabla 5. Información sobre las imágenes satelitales utilizadas en el estudio.

N	Año	Código de imagen	N	Año	Código de imagen
1	1986	LT05_L1TP_009057_19860908_20200917_02_T1	13	2002	LE07_L2SP_009056_20020726_20200916_02_T1
2	1987	LT05_L2SP_009057_19870114_20201014	14	2003	LE07_L1TP_009057_20030307_20200916_02_T1
3	1988	LT04_L2SP_009057_19881023_20200957	15	2006	LE07_L1TP_009056_20060923_20200914_02_T1
4	1989	LT04_L2SP_009057_19890807_20200986_02_T1	16	2010	LE07_L1TP_009057_20100105_20200971_02_T1
5	1990	LT04_L1TP_009057_19900725_20200915_02_T1	17	2011	LE07_L1TP_009057_20110905_20200910_02_T1
6	1991	LT05_L1TP_009057_19911211_20200974_02_T1	18	2013	LE07_L1TP_009057_20130724_20200917_02_T1
7	1993	LT05_L1TP_009056_19930215_20231210_02_T1	19	2014	LC08_L2SP_009057_20141226_20200910_02_T1
8	1995	LT05_L2SP_009057_19950917_20231216_02_T1	20	2019	LC08_L1TP_009057_20190903_20200826_02_T1
9	1996	LT05_L2SP_009056_19960802_20200911_02_T1	21	2020	LC08_L1TP_009057_20200109_20200823_02_T1
10	1997	LT05_L2SP_009056_19970906_20200909_02_T1	22	2021	LC08_L2SP_009056_20211213_20211222_02_T1
11	1999	LT05_L2SP_009057_19990710_20240118_02_T1	23	2023	LC08_L2SP_009056_20231203_20231209_02_T1
12	2000	LE07_L2SP_009057_20000821_20200918_02_T1			

Fuente: explicación propia.

Tras aplicar un análisis de teledetección utilizando el índice NDSI y un análisis de clasificación supervisado, se calcularon las áreas de nieve y cobertura glaciar, y la información se presenta en (Figura 3). La precisión global fue del 89% y el coeficiente medio de Kappa fue del 75%. Para los años 1986, 1993 y 2019, se logró una precisión perfecta, con valores de precisión global del 100% y un coeficiente Kappa de 1,0. Para los años 1990, 2000, 2006 y 2023, se obtuvo menor precisión debido a las condiciones topográficas; en ninguna de las imágenes satelitales los falsos positivos superaron el 11%.

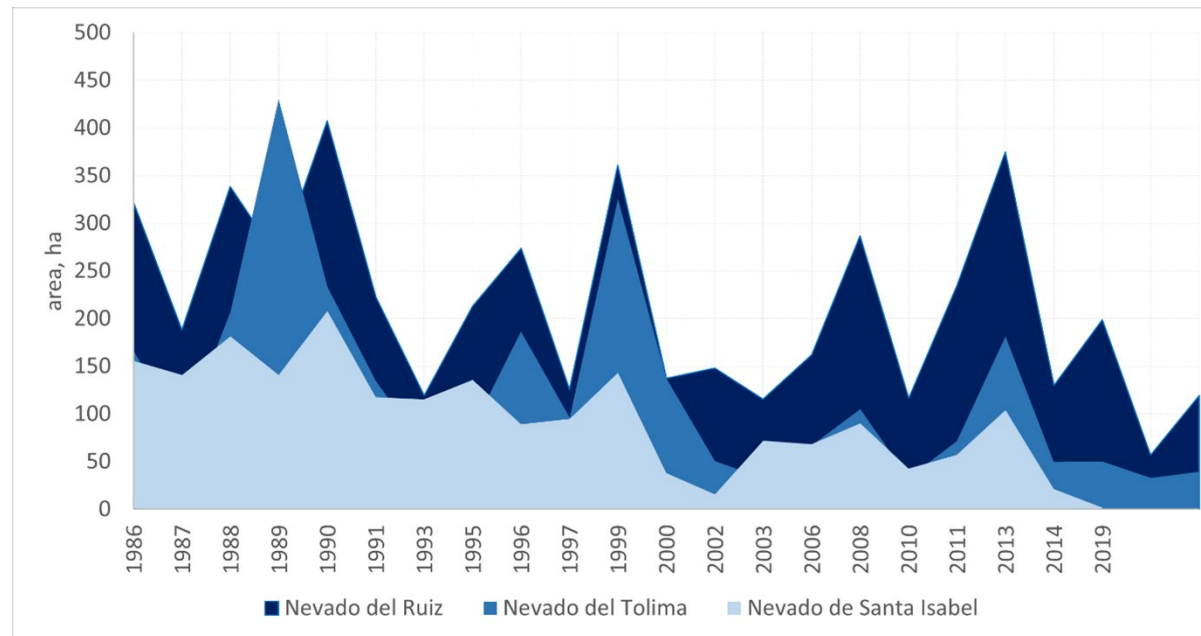


Figura 3. Variación interanual de las zonas glaciares de las montañas cubiertas de nieve. Fuente: explicación propia.

Como se puede ver en (Figura 3), todas las áreas muestran una tendencia a la baja. Para evaluar si estos son estadísticamente significativos, se aplicó la prueba t, presentando los siguientes valores de P: El Ruiz $-0,019$, Santa Isabel $-0,00023$, Tolima $-0,0026$, lo que indica que todas las tendencias son negativas y estadísticamente significativas y, de hecho, hay una disminución de las capas glaciares asociadas al cambio climático global.

Para Nevado Santa Isabel, los resultados muestran una tendencia sostenida de reducción del área glaciar entre 1986 y 2019, con una disminución más pronunciada a partir de 2000, lo que sugiere una fase de retroceso acelerado. El ajuste por regresión lineal indica una pérdida media de aproximadamente $4,6$ ha/año. El modelo tiene un error estándar de estimación del orden de 50 a 60 ha, lo que indica una alta dispersión de los datos alrededor de la tendencia estimada y refleja la variabilidad interanual típica de los sistemas glaciares. Según la proyección del modelo, se estima que el glaciar alcanzaría un área cercana a cero alrededor de 2026. Sin embargo, al considerar el intervalo de predicción —directamente influenciado por el error del modelo— existe un rango de incertidumbre que sugiere que la desaparición podría ocurrir aproximadamente entre 2015 y 2035. Este amplio rango de variación evidencia tanto la variabilidad climática como las limitaciones del

modelo lineal para representar procesos no lineales en las etapas finales de la degradación glaciar. En general, estos resultados indican que el glaciar se encuentra en una fase terminal, con una alta probabilidad de desaparición a corto plazo, posibilidad asociada al aumento de temperatura y a los cambios en los patrones de precipitación. El modelo lineal es apropiado para Nevado Santa Isabel porque el glaciar ya está en fase terminal, con muy poca superficie restante y una tendencia negativa muy significativa ($p = 0,00023$). Cuando un glaciar se acerca a la extensión cero, los modelos lineales y no lineales convergen en su proyección de la fecha de desaparición, haciendo que la elección de la forma funcional sea irrelevante para la conclusión principal. Además, el número limitado de observaciones ($n = 23$) limita el uso de modelos más complejos sin riesgo de sobreajuste.

Para la capa nevada de El Ruiz, los resultados muestran una tendencia general de disminución de la superficie entre 1986 y 2021, con una tasa de pérdida aproximada de entre 2,0 y 2,5 ha/año. No obstante, el comportamiento de la serie temporal muestra una alta variabilidad interanual, con fluctuaciones significativas que incluyen tanto aumentos abruptos como disminuciones en la superficie del glaciar. Según las previsiones, se estima que la superficie cubierta de nieve podría alcanzar entre 150 y 180 hectáreas en unos 28 años. Sin embargo, el intervalo de predicción es amplio, oscilando desde valores cercanos a cero hasta más de 300 ha, lo que refleja una considerable incertidumbre asociada a la variabilidad climática y la naturaleza no lineal del proceso. En este contexto, no hay evidencia clara de una inminente desaparición del glaciar, sino más bien un comportamiento muy variable que sugiere un sistema en condición de inestabilidad, posiblemente influenciado por fluctuaciones climáticas interanuales y cambios en los patrones de acumulación y derretimiento.

En el Nevado del Tolima, los resultados muestran una tendencia sostenida de disminución de la superficie cubierta de nieve entre 1986 y 2021, con una tasa de pérdida de aproximadamente 3,5 a 4,0 ha/año. El comportamiento de la serie muestra una reducción notable a partir del año 2000, seguida de una fase reciente caracterizada por valores bajos y relativamente estables, lo que sugiere un declive progresivo del sistema glaciar. Según la proyección, se estima que la superficie glaciar y de las zonas nevadas podría estar entre 10 y 30 ha alrededor del año 2030. Sin embargo, el intervalo de predicción es amplio, oscilando desde valores cercanos a cero hasta aproximadamente 150 – 180 ha, reflejando la incertidumbre asociada a la variabilidad interanual y la naturaleza no lineal del proceso. En general, estos resultados sugieren que las zonas glaciares y de nieve están en una fase avanzada de reducción, con una alta probabilidad de seguir disminuyendo y eventualmente desaparecer a medio plazo, aunque aún presentan fluctuaciones que impiden definir un punto exacto de colapso.

El estudio plantea la hipótesis de que estas variaciones están asociadas con las fases fría y cálida del evento ENSO. Como ejemplo, se pueden considerar los años 1997 y 1999. En 1997, se produjo la fase cálida de ENSO (El Niño) con un valor medio del índice MEI de 1,23. Esta fase en Colombia se manifiesta como una disminución de las precipitaciones y un aumento de temperatura, produciendo la ablación de la cobertura del suelo en el ecosistema. Desde la segunda mitad de 1998 hasta la primera mitad de 2011, se produjo un fuerte evento de La Niña, con un valor medio del índice MEI de -1,24 para 1999. Esto se manifestó en un aumento de las precipitaciones y una disminución de las temperaturas medias. Este cambio en la variabilidad climática provocó una expansión significativa

de la cobertura de nieve y glaciár. Lo anterior indica una hipótesis de investigación sobre la sensibilidad de la cobertura de ecosistemas al fenómeno ENSO. (10)

La siguiente figura muestra un mapa de la reducción espaciotemporal de la cobertura de hielo y nieve en la zona de estudio. Figura 4.

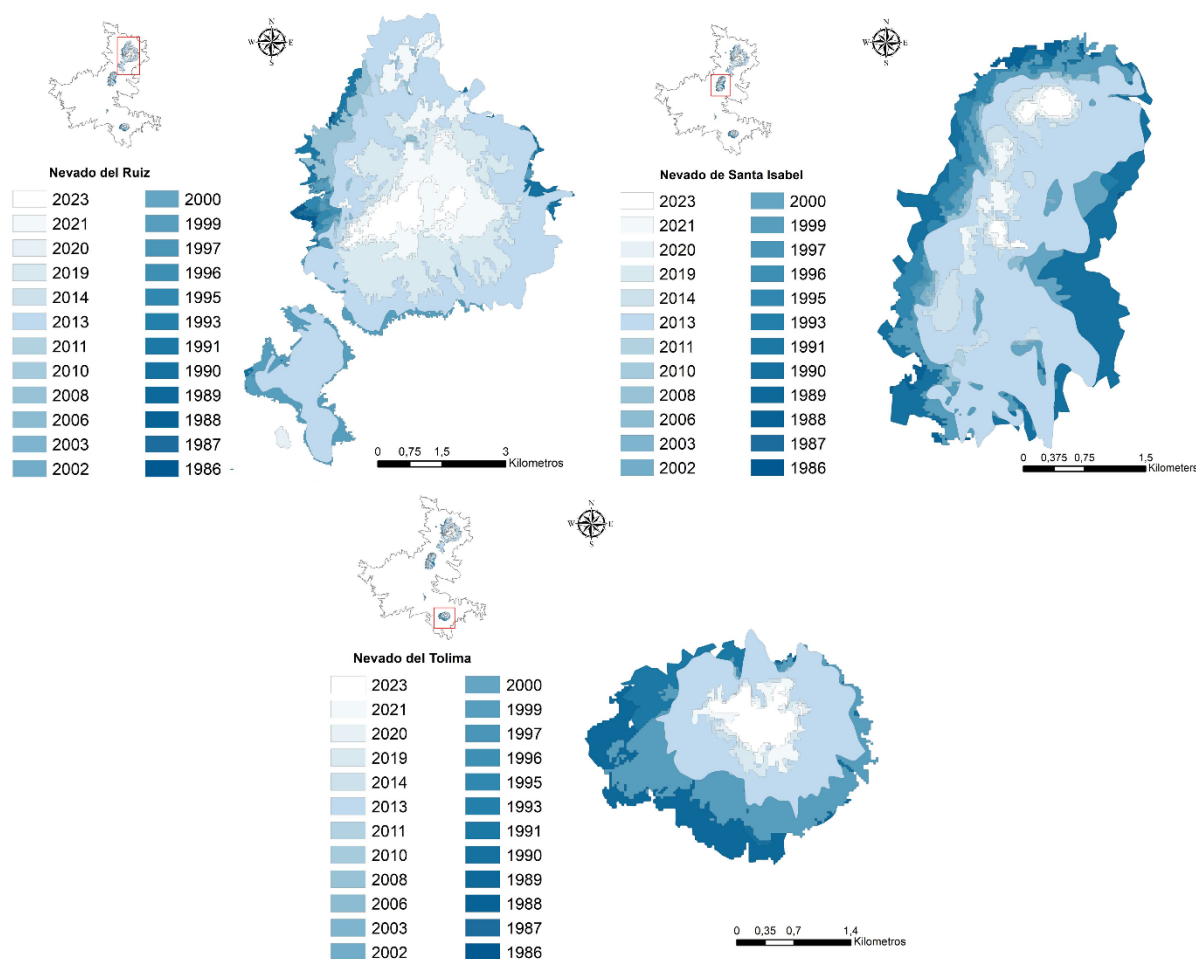


Figura 4. Reducción de las capas glaciares en los Nevados del Parque Natural Nacional de Los Nevados (1986-2023): a) Nevado del Ruiz, b) Nevado de Santa Isabel, c) Nevado del Tolima. Fuente: explicación propia.

Además de la reducción del área glaciár, un análisis visual revela claramente la fragmentación de las montañas nevadas en parches más pequeños, un proceso que aumenta su exposición al calentamiento al reducir la masa térmica y aumentar la relación superficie-volumen (34),(35). A pesar de esta tendencia general de retirada, la serie muestra fluctuaciones interanuales no estacionales pronunciadas que el estudio atribuye al forcing ENSO. El siguiente paso analítico fue, por tanto, cuantificar cuánto de la tasa observada de cambio de área está impulsada por el cambio climático a largo plazo frente a la variabilidad ENSO, utilizando el esquema de descomposición de pendientes descrito en la Tabla 4. Los resultados se presentan en la Tabla 6. Tenga en cuenta que estos porcentajes reflejan la contribución de cada factor a la tasa observada de cambio de área — no la fracción de varianza explicada (R^2), que es una métrica metodológicamente distinta.

Tabla 6. Contribución porcentual del cambio climático y del fenómeno ENSO a la variación en la capa glaciar de las montañas nevadas.

Glaciar	Pendiente (absoluta) la serie observada, prevista y residual para glaciares y zonas de cobertura nevada (ha/año)			Contribución %	
	Área observada	Área de previsión	Área residual	Cambio climático	ENSO
Ruiz	28.1	5.8	22.31	20.5	79.5
Santa Isabel	17.4	2.6	14.74	15.2	84.8
Tolima	6.6	1.4	5.12	21.8	78.2

Fuente: explicación propia.

Donde:

i_{pre} – pendiente de la serie construida según el modelo predictivo

i_{obs} – pendiente de la serie observada del área glaciar

i_{res} – pendiente de la serie residual

La contribución porcentual del cambio climático a la variación de área se calcula dividiendo la pendiente de la línea predicha por la de la línea observada, mientras que la contribución del fenómeno ENSO se estima como la pendiente de la serie residual relativa a la serie observada de áreas.

Como se puede ver en los resultados obtenidos, en todos los casos la contribución porcentual del fenómeno ENSO a la variabilidad interanual en la superficie glaciar es mayor que la del cambio climático global, oscilando entre el 78,2% y el 84,7%, mientras que el impacto del calentamiento global varía entre el 15,2% y el 21,8%. Esto indica que, aunque la ablación y expansión glaciar representan una proporción significativa de su variabilidad, dependen del evento ENSO. Esto indica que, aunque la ablación y expansión glaciar representan una parte significativa de su variabilidad y dependen del evento ENSO. El inicio de la fase fría (La Niña) provoca un aumento de la superficie glaciar, mientras que la aparición de la fase cálida (El Niño) disminuye la superficie glaciar.

La metodología aplicada en el estudio puede considerarse una de las formas de evaluar el impacto del calentamiento global y los eventos ENSO sobre la variabilidad interanual de las áreas glaciares, partiendo de la hipótesis de que los efectos del cambio climático global se reflejan en la aparición de una tendencia lineal en series temporales hidroclimáticas. Sin embargo, se recomienda explorar modelos de simulación no lineales para fines de predicción.

En el modelo propuesto, la predicción de la zona cubierta de nieve asociada a los efectos del calentamiento global depende de la temperatura media del aire. Aunque esta variable climática incluye los efectos del cambio climático y el evento ENSO, su uso está justificado porque es la variable principal que controla el proceso de ablación glaciar como consecuencia del calentamiento

global, mientras que el evento ENSO se refleja en la dinámica de contracción y expansión no solo por las temperaturas medias, sino también por otras variables climáticas como la radiación solar, precipitación sólida y líquida, y el balance energético. Además, el evento ENSO no regula las tendencias climáticas a largo plazo, sino que controla las fluctuaciones anuales, introduciendo oscilaciones climáticas interanuales.

Dos consideraciones metodológicas merecen discusión. En primer lugar, dado que la ENSO influye en la temperatura media ($R^2=0,27-0,29$, Tabla 2), usar la temperatura como único predictor del área glaciar puede capturar parcialmente la señal de ENSO, introduciendo multicolinealidad. Sin embargo, dado que la tendencia de calentamiento a largo plazo en la serie de temperaturas es estadísticamente significativa e independiente de la fase ENSO, la temperatura se trata aquí como la expresión principal del cambio climático que fuerza la dinámica de los glaciares. En segundo lugar, la precipitación no se incluyó como variable predictora porque ninguna de las series de precipitaciones mostró una tendencia estadísticamente significativa, lo que significa que no transmite una señal de cambio climático a largo plazo. Su variabilidad interanual se refleja en cambio a través del término residual, que se atribuye a ENSO.

Discusión

De lo anterior, se puede concluir que las tres montañas nevadas que conforman el parque nacional presentan una gran variabilidad en sus áreas de glaciar y cobertura nevada. El análisis mostró que entre el 15,2 y el 21,8 % de esta variación está asociada a los efectos del calentamiento global y entre el 78,2 y el 84,8 % con el fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENSO), siendo este último el principal motor de variación en estas áreas.

Sin embargo, no solo el calentamiento global influye en la disminución de la cobertura glaciar, sino que la fase cálida del fenómeno ENSO también produce una mayor ablación de las montañas cubiertas por nieve debido al aumento de las temperaturas y a la menor precipitación. Por tanto, la fase El Niño provoca un retroceso significativo de los glaciares por sí sola; para determinar si interactúa sinérgicamente con la tendencia de calentamiento a largo plazo y resulta en una pérdida no aditiva de glaciares, se requiere un análisis explícito de las interacciones entre ENSO y el clima. Estudios futuros deberían probar esta interacción utilizando observaciones de balance de masas, datos satelitales de mayor frecuencia y registros climáticos distribuidos.

Los resultados son coherentes con hallazgos previos sobre la relación entre la variabilidad del área glaciar y el ENSO. La fase cálida (El Niño) impulsa la ablación mientras que la fase fría (La Niña) promueve la expansión, un patrón documentado en los Andes tropicales (4, 36). Vuille et al. (37) identifican al ENSO como uno de los principales factores que impulsan la variabilidad interanual en los campos de nieve andinos, y Francou et al. (36) —trabajando en glaciares tropicales interiores en Ecuador— informan que más del 50% de la varianza en el balance de masa se explica por la intensidad ENSO, una cifra en general consistente con los resultados de descomposición de laderas obtenidos aquí para los glaciares colombianos.

El proceso de deshielo podría tener implicaciones para el suministro de agua a partir de cuencas glaciares, bajos caudales y servicios de regulación del agua. Por ejemplo, la cuenca del río Chinchiná

nace en el glaciar El Ruiz, que es una de las fuentes de suministro de agua para la ciudad de Manizales, que tiene una población de aproximadamente 434.000 habitantes. Los ríos Combeima y Saldaña nacen en el glaciar El Tolima, que son las principales fuentes regionales de agua para el departamento de Tolima. Sin embargo, este tipo de estudios que evalúan el efecto del deshielo de los glaciares colombianos son escasos (38), debido a la insuficiente y ausencia de la red de estaciones hidrológicas que hacen imposible este tipo de análisis.

Dada la vulnerabilidad de los glaciares analizados, es necesario realizar monitorización hidrológica de los ríos —que son fuentes de suministro de agua— y estudiar los efectos del deshielo glaciar sobre el suministro de agua, los bajos caudales y la regulación del agua. Algunos estudios estiman que los glaciares contribuyen hasta un 25% al caudal de los ríos en estación seca en cuencas andinas (5). Para las cuencas glaciadas del PNN Los Nevados, esto implica que la pérdida progresiva de área glaciar reducirá los caudales base en ríos como el Chinchiná, Combeima y Saldaña, afectando directamente al suministro de agua a más de dos millones de personas en la región del Eje del Café y el departamento de Tolima. Los ingenieros y planificadores de recursos hídricos deben anticipar escenarios de déficit a medio plazo, priorizar el monitoreo hidrológico de estas cuencas y revisar los criterios de diseño de infraestructuras de almacenamiento para tener en cuenta la disminución de la contribución glaciar.

La recopilación de datos y el enfoque metodológico utilizado revelan ciertas limitaciones en este tipo de estudio. Estos incluyen los siguientes:

1. La baja resolución temporal de las imágenes satelitales disponibles libremente no permite analizar las variaciones estacionales en la cobertura glaciar y nevada;
2. La alta cobertura de nubes presente en la mayoría de las imágenes satelitales actúa como un obstáculo para obtener una muestra robusta de datos geoespaciales.
3. La ausencia de estaciones meteorológicas en las zonas montañosas nevadas: por esta razón, se consultaron registros de las estaciones meteorológicas más cercanas a las montañas nevadas. Sin embargo, su representatividad respecto al clima local de las montañas nevadas puede ser limitada y no reflejar necesariamente la variabilidad climática presente en la zona de estudio.
4. Limitaciones del modelo lineal: el estudio puso a prueba la hipótesis sobre los efectos lineales del cambio climático en la ablación del manto nevado. Esto introdujo incertidumbre en los resultados obtenidos. Por esta razón, se recomienda considerar el uso de modelos multivariantes no lineales en los estudios sobre la dinámica del manto nevado.

Conclusiones

A partir de los análisis realizados previamente, se concluye que el clima regional es sensible al cambio climático global y al evento ENSO. El efecto del cambio climático se refleja en un aumento de las temperaturas medias con un gradiente positivo de alrededor de 0,14 °C cada 10 años, junto con un aumento de la variabilidad. El efecto sobre la precipitación anual no es evidente, y ninguno de sus registros confirmó una tendencia estadísticamente significativa, con solo dos estaciones que indican una disminución en la variabilidad de sus valores. El análisis de las teleconexiones con el

evento ENSO confirma una clara dependencia del clima regional de este fenómeno macroclimático, donde la fase cálida (El Niño) genera un aumento en los valores medios y la fase fría (La Niña) provoca una disminución de la temperatura, con un gradiente de 0,06 °C por cada 0,1 unidad del índice MEI. A diferencia del impacto incierto del cambio climático en los patrones de precipitación, esta variable reacciona claramente al fenómeno ENSO. La relación entre la precipitación y el índice MEI es inversa, de modo que por cada aumento de 0,1 en el índice MEI, la precipitación disminuye en 20 mm. En otras palabras, la fase fría del fenómeno (La Niña) provoca un aumento de las precipitaciones, mientras que la fase cálida (El Niño) provoca una disminución.

Bajo el enfoque propuesto basado en residuos, aproximadamente el 80 % del componente interanual se asoció a la variabilidad relacionada con ENSO, y aproximadamente el 20 % depende de los efectos del cambio global. La fase El Niño produce un aumento de las temperaturas y, en consecuencia, la ablación de la capa glaciar, mientras que la fase La Niña provoca un aumento en esta capa. El cambio climático está asociado a un proceso constante de fusión de la capa glaciar con tendencias estadísticamente significativas. Estos permitieron evaluar el gradiente de ablación de cada uno de los glaciares de la siguiente manera: Ruiz – 2,0 a 2,5 ha/año, Santa Isabel – 4,6 ha/año y Tolima – 3,5 – 4,0 ha/año. Estos resultados son coherentes con varios estudios nacionales existentes que alertan sobre los efectos del cambio climático global en la inminente desaparición de estos ecosistemas (10).

El estudio muestra que el retroceso de los glaciares sigue una tendencia persistente a la baja y que las fluctuaciones anuales parecen estar relacionadas con el fenómeno ENSO.

Los resultados de esta investigación pueden considerarse como base para estudiar los efectos del deshielo glaciar sobre la disponibilidad y variabilidad del agua en cuencas glaciares, con el fin de proyectar la disponibilidad de agua para diferentes usos humanos y la conservación de la integridad de su ecosistema.

Agradecimientos:

Los autores de este trabajo agradecen al Vicerrectorado de Investigación de la Universidad Militar Nueva Granada la oportunidad de desarrollar el proyecto con el código INV - ING - 4156.

Declaración de contribución de autoría de CreditT

Conceptualización - Ideas: Yulia Ivanova, Julián David Castellanos. Curación de datos: Yulia Ivanova, Julián David Castellanos. Análisis formal: Yulia Ivanova, Julián David Castellanos, Luisa Fernanda Yustres Quintero. Investigación: Yulia Ivanova, Julián David Castellanos. Metodología: Yulia Ivanova, Julián David Castellanos. Gestión del proyecto: Yulia Ivanova. Recursos: Yulia Ivanova. Software: Yulia Ivanova, Julián David Castellanos. Supervisión: Yulia Ivanova. Validación: Yulia Ivanova, Julián David Castellanos. Redacción - borrador original - Elaboración: Yulia Ivanova, Julián David Castellanos. Redacción - revisión y edición -Elaboración: Yulia Ivanova, Julián David Castellanos.

Financiación: Universidad Militar Nueva Granada.

Conflicto de intereses: no declara. Aspecto ético: no declara.

References

1. Qin D. y Ding Y. Key Issues on Cryospheric Changes, Trends and Their Impacts. *Advances in Climate Change Research*, 2010; 1(1):1-10
<https://doi.org/10.3724/SP.J.1248.2010.00001>
2. Calizaya E., Laqui W., Sardón S., Calizaya F., Cuentas O., Cahuana J., Mindani C. y Huacani W. Snow Cover Temporal Dynamic Using MODIS Product, and Its Relationship with Precipitation and Temperature in the Tropical Andean Glaciers in the Alto Santa Sub-Basin (Peru). *Sustainability* 2023, Vol. 15, Page 7610, 2023; 15(9):7610,
<https://doi.org/10.3390/su15097610>
3. Collier E., Mölg T. y Sauter T. Recent Atmospheric Variability at Kibo Summit, Kilimanjaro, and Its Relation to Climate Mode Activity. *Journal of Climate*, 2018; 31(10):3875-91,
<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0551.1>
4. Rabatel A., Francou B., Soruco A., Gomez J., Cáceres B., Ceballos J.L., Basantes R., Vuille M., Sicart J.E., Huggel C., Scheel M., Lejeune Y., Arnaud Y., Collet M., Condom T., Consoli G., Favier V., Jomelli V., Galarraga R., Ginot P., Maisincho L., Mendoza J., Ménégos M., Ramirez E., Ribstein P., Suarez W., Villacis M. y Wagnon P. Current state of glaciers in the tropical Andes: A multi-century perspective on glacier evolution and climate change. *Cryosphere*, 2013; 7(1):81-102,
<https://doi.org/10.5194/tc-7-81-2013>
5. UNESCO El Atlas de Glaciares y Aguas Andinos: el impacto del retroceso de los glaciares sobre los recursos hídricos. 2018
<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000266209>
6. UNESCO, Schoolmeester T., Johansen K.S., Alfthan B., Baker E., Hesping M. y Verbist K. El Atlas de Glaciares y Aguas Andinos: el impacto del retroceso de los glaciares sobre los recursos hídricos. 2018; :1-72.
<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000266209>
7. Ideam informe del estado de los glaciares colombianos 2020 2 Coordinación técnica Fotografías de portada. 2020, https://www.ideam.gov.co/sites/default/files/prensa/boletines/2025-05-20/4_iegc_2020_informe_del_estado_de_los_glaciares_colombianos_2020.pdf
8. Ceballos J. y Tobón E. Glaciares colombianos: evolución reciente y estado actual. *Boletín de Geología*, 2007; 29(2):143-51,
<https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaboletindegologia/article/view/461>
9. IDEAM Report on the Status of Colombian Glaciers (Informe del estado de los glaciares Colombianos). Bogotá D.C: 2025.
<https://www.ideam.gov.co/file-download/download/public/17092>

10. IDEAM Ideam presenta el sexto informe del estado de los Glaciares Colombianos 2023

[Internet]. 2023 [10 Jun. 2025]. Disponible en:

<http://archivo.ideam.gov.co/web/ecosistemas/investigacion-publicaciones>

11. Marulanda Aguirre A., Fonseca Tobasura O.A., Vélez Upegui J.J. y Arboleda O.D.C. Hydrological study of the potential effects of the melting of Nevado del Ruiz glacier on urban growth zones in Manizales, Colombia. *Hydrological Sciences Journal*, 2016; 61(12):2179-92,

<https://doi.org/10.1080/02626667.2015.1090574>

12. Bolaño-Ortiz T.R., Díaz-Gutiérrez V.L., Vélez-Pereira A.M., Vergara-Vásquez E.L. y Camargo-Caicedo Y. Snow Albedo Reduction in the Colombian Andes Mountains Due to 2000 to 2020 Saharan Dust Intrusions Events. *Water* 2023, Vol. 15, Page 3150, 2023; 15(17):3150,

<https://doi.org/10.3390/w15173150>

13. PNN Parque Nacional Natural El Cocuy - Parques Nacionales Naturales de Colombia [Internet]. 2024 [10 Jun. 2025]. Disponible en:

<https://www.parquesnacionales.gov.co/nuestros-parques/pnn-el-cocuy/>

14. Vásquez Vásquez V.Hugo. y Serrano G. M.A.. Las áreas naturales protegidas de Colombia. 2009; :696,

https://catalogo.humboldt.org.co/cgi-bin/koha/opac_detail.pl?biblionumber=8414&shelfbrowse_itemnumber=29931

15. PNN Restauración ecológica en páramos del Parque Nacional Natural de Los Nevados. Manizales [Internet]. 2010 [10 Jun. 2025]. Disponible en:

<https://www.parquesnacionales.gov.co/nuestros-parques/parque-nacional-natural-los-nevados/>

16. Rekowsky I., Bremer U. y Veettil B. Variations in glacier area in Colombia and Venezuela between 1985 and 2015, using remote sensing data | Request PDF. 2018;

https://www.researchgate.net/publication/329943939_Variations_in_glacier_area_in_Colombia_and_Venezuela_between_1985_and_2015_using_remote_sensing_data

17. Román-Cuesta R.M., Carmona-Moreno C., Lizcano G., New M., Silman M., Knoke T., Malhi Y., Oliveras I., Asbjornsen H. y Vuille M. Synchronous fire activity in the tropical high Andes: An indication of regional climate forcing. *Global Change Biology*, 2014; 20(6):1929-42,

<https://doi.org/10.1111/gcb.12538>

18. IDEAM Query and download hydrometeorological data using ArcGIS Web Application [Internet]. 2025 [10 Jun. 2025]. Disponible en:

<http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>

19. Hsu Y.-C., Liao Y.-C., Fu K.-H., Tseng I.-F. y Lee C.-P. The Relationship Between the Sea Surface Temperature Variability Within the Southwest Atlantic Ocean and Multivariate ENSO Index. ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference, 2013; :97-103,
<https://onepetro.org/ISOPEIOPEC/proceedings-abstract/ISOPE13/ISOPE13/ISOPE-I-13-428/15480>
20. NOAA Multivariate ENSO Index Version 2 (MEI.v2) [Internet]. 2025 [10 Jun. 2025]. Disponible en:
<https://psl.noaa.gov/enso/mei/>
21. USGS USGS.gov Science for a changing world [Internet]. 2024 [10 Jun. 2025]. Disponible en:
<https://www.usgs.gov/>
22. INEI, Mendoza S., Abad P., Huapaya E. y Huerta L. Guía para la presentación de gráficos estadísticos. 2009
23. Chen S. y Zha X. Effects of the ENSO on rainfall erosivity in the Fujian Province of southeast China. Science of The Total Environment, 2018; 621:1378-88,
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.090>
24. Manrique-Cantillo A.P., Morales-Acuña E. de J., Linero-Cueto J.R., Manrique-Cantillo A.P., Morales-Acuña E. de J. y Linero-Cueto J.R. Variability, cycles, and trends of mean air temperature north of Colombia. *Atmósfera*, 2024; 38:327-50,
<https://doi.org/10.20937/ATM.53265>
25. Robledo-Buitrago D.A., Polanco-Puerta M.F., Luque-Villa M. De, Mesa-Caro M. y Calder-Ricardo C.A. Climate Change Trends in Colombia: A Case Study in Facatativá, Cundinamarca. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 2021; 16(3):535-42,
<https://doi.org/10.18280/ijstdp.160314>
26. Ruiz D., Martinson D.G. y Vergara W. Trends, stability and stress in the Colombian Central Andes. *Climatic Change*, 2012; 112(3-4):717-32.
<https://doi.org/10.1007/s10584-011-0228-0>
27. Broomandi P., Galán-Madruga D., Satyanaga A., Hamidi M., Ledari D.G., Fathian A., Sarvestan R., Janatian N., Jahanbakhshi A., Bagheri M., Karaca F., Al-Dousari A. y Kim J.R. Variability of Middle East springtime dust events between 2011 and 2022. *Air Quality, Atmosphere and Health*, 2024; 17(6):1341-60
<https://doi.org/10.1007/s11869-024-01510-9>
28. Jiang X., Holbrook N.J., Marshall A.G. y Love P.T. Quasi-Biennial Oscillation influence on Australian summer rainfall. *npj Climate and Atmospheric Science*, 2024; 7(1):1-14,
<https://doi.org/10.1038/s41612-023-00552-7>



29. Bolaño-Ortiz T.R., Diaz-Gutiérrez V.L. y Camargo-Caicedo Y. ENSO and Light-Absorbing Impurities and Their Impact on Snow Albedo in the Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia. *Geosciences* 2020, Vol. 10, Page 437, 2020; 10(11):437,
<https://doi.org/10.3390/geosciences10110437>
30. QGIS Spatial without Compromise · QGIS Web Site [Internet]. 2024 [10 Jun. 2025].
<https://www.qgis.org/>
31. Poveda G. La hidroclimatología de Colombia: una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diurna. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 2004; 28(107):201-21,
[https://doi.org/10.18257/raccefyn.28\(107\).2004.1991](https://doi.org/10.18257/raccefyn.28(107).2004.1991)
32. Lewis S.C. y King A.D. Evolution of mean, variance and extremes in 21st century temperatures. *Weather and Climate Extremes*, 2017; 15:1-10,
<https://doi.org/10.1016/j.wace.2016.11.002>
33. Cerón W.L., Andreoli R. V., Kayano M.T., Canchala T., Ocampo-Marulanda C., Avila-Diaz A. y Antunes J. Trend Pattern of Heavy and Intense Rainfall Events in Colombia from 1981-2018: A Trend-EOF Approach. *Atmosphere* 2022, Vol. 13, Page 156, 2022; 13(2):156,
<https://doi.org/10.3390/atmos13020156>
34. Banerjee S., Sati V.P., Almazroui M. y Chakraborty S. Spatio-Temporal Assessment of Areal Fragmentation and Volume of Snow Cover in the Central Himalaya. *Earth Systems and Environment*, 2024
<https://doi.org/10.1007/s41748-024-00469-y>
35. Ghosh S., Pandey A.C., Nathawat M.S., Bahuguna I.M. y Ajai Contrasting Signals of Glacier Changes in Zaskar Valley, Jammu & Kashmir, India Using Remote Sensing and GIS. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2014; 42(4):817-27
<https://doi.org/10.1007/s12524-014-0368-6>
36. Francou B., Vuille M., Favier V. y Cáceres B. New evidence for an ENSO impact on low-latitude glaciers: Antizana 15, Andes of Ecuador, 0°28'S. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2004; 109(18)
<https://doi.org/10.1029/2003JD004484>
37. Vuille M., Francou B., Wagnon P., Juen I., Kaser G., Mark B.G. y Bradley R.S. Climate change and tropical Andean glaciers: Past, present and future. *Earth-Science Reviews*, 2008; 89(3-4):79-96,
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2008.04.002>
38. Ruiz D., Moreno H.A., Gutiérrez M.E. y Zapata P.A. Changing climate and endangered high mountain ecosystems in Colombia. *Science of the Total Environment*, 2008; 398(1-3):122-32,
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.02.038>