

DOI: 10.26820/reciamuc/9.(4).diciembre.2025.2-16

URL: <https://reciamuc.com/index.php/RECIAMUC/article/view/1641>

EDITORIAL: Saberes del Conocimiento

REVISTA: RECIAMUC

ISSN: 2588-0748

TIPO DE INVESTIGACIÓN: Artículo de revisión

CÓDIGO UNESCO: 25 Ciencias de la Tierra y del Espacio

PAGINAS: 2-16



Análisis temporal de la variación de la superficie del glaciar del Nevado Chimborazo durante el periodo 2010 – 2015

Temporal analysis of the variation in the surface area of the Nevado Chimborazo glacier during the period 2010–2015

Análise temporal da variação na área superficial da geleira Nevado Chimborazo durante o período de 2010 a 2015

Jaime Adres Cadena Iturralde¹; Pedro David Fuentes Vásquez²; Elvis Renato Flores Abad³

RECIBIDO: 21/09/2025 **ACEPTADO:** 28/10/2025 **PUBLICADO:** 11/11/2025

1. Magíster en Salud y Seguridad Ocupacional Mención en Prevención de Riesgos Laborales; Máster en Project Management; Ingeniero Ambiental; Docente de Ingeniería Ambiental, Universidad Agraria del Ecuador; Guayaquil, Ecuador; jcadena@uagraria.edu.ec;  <https://orcid.org/0000-0002-3487-6815>
2. Magíster en Protección Vetal; Ingeniero Agrónomo; Docente de Ingeniería Ambiental, Universidad Agraria del Ecuador; Guayaquil, Ecuador; pfuentes@uagraria.edu.ec;  <https://orcid.org/0009-0004-2915-027X>
3. Magíster en Gestión Ambiental; Ingeniero Ambiental; Docente de Ingeniería Ambiental, Universidad Agraria del Ecuador; Guayaquil, Ecuador; eflores@uagraria.edu.ec;  <https://orcid.org/0009-0006-2352-2321>

CORRESPONDENCIA

Jaime Adres Cadena Iturralde

jcadena@uagraria.edu.ec

Guayaquil, Ecuador

RESUMEN

Este estudio analiza la variación temporal de la superficie glaciar del Nevado Chimborazo entre 2010 y 2015 y su relación con variables climáticas y ecológicas, considerando su relevancia como indicador del cambio climático en los Andes tropicales. Se aplicó un análisis multitemporal de imágenes satelitales Landsat 7 ETM+, Landsat 8 OLI/TIRS y MODIS, corregidas atmosférica y geométricamente, delimitando las áreas glaciares mediante el índice NDSI y clasificadores supervisados y no supervisados. Los resultados muestran una reducción de la superficie glaciar de 18,2 a 15,8 km² (-13,1 %), con una pérdida media anual de 0,48 km² y un ajuste lineal $R^2 = 0,97$. La correlación negativa entre temperatura y área glaciar ($r = -0,87$) confirma la alta sensibilidad térmica de la masa de hielo, mientras que la precipitación ($r = +0,41$) tuvo un efecto moderador. En paralelo, el Índice de Vegetación Mejorado (EVI) aumentó de 0,19 a 0,34 (+79 %), correlacionándose inversamente con la pérdida glaciar ($r = -0,82$), lo que evidencia una recolonización vegetal en la franja periglacial (3800–4200 m s. n. m.). Estos resultados demuestran que el retroceso glaciar no solo refleja el impacto climático regional, sino que también impulsa procesos ecológicos de sucesión vegetal en los ecosistemas altoandinos. Se recomienda fortalecer los sistemas de monitoreo glaciológico integrando parámetros hidrológicos y ecológicos para una gestión sostenible de los recursos hídricos andinos.

Palabras clave: Glaciar, Chimborazo, Teledetección, Cambio climático, Los Andes, Hidrología.

ABSTRACT

This study examines the temporal variation of the Chimborazo Glacier surface between 2010 and 2015 and its relationship with climatic and ecological variables, highlighting its importance as a climate change indicator in the tropical Andes. A multitemporal analysis of Landsat 7 ETM+, Landsat 8 OLI/TIRS, and MODIS satellite imagery was conducted after atmospheric and geometric corrections. Glacier areas were delineated using the Normalized Difference Snow Index (NDSI) and both supervised and unsupervised classification methods. Results reveal a surface reduction from 18.2 to 15.8 km² (-13.1 %), with an annual loss rate of 0.48 km² ($R^2 = 0.97$). The strong negative correlation between temperature and glacier extent ($r = -0.87$) indicates high thermal sensitivity, while precipitation ($r = +0.41$) partially mitigated glacier retreat. Simultaneously, the Enhanced Vegetation Index (EVI) increased from 0.19 to 0.34 (+79 %), showing a strong inverse correlation ($r = -0.82$) with glacier area, suggesting active vegetation recolonization in the periglacial zone (3,800–4,200 m a. s. l.). These findings demonstrate that glacier retreat not only reflects regional climate variability but also drives ecological succession processes in high-Andean ecosystems. Strengthening integrated glaciological, hydrological, and ecological monitoring is recommended to support sustainable water resource management in the Ecuadorian Andes.

Keywords: Glacier, Chimborazo, Remote sensing, Climate change, The Andes, Hydrology.

RESUMO

Este estudo examina a variação temporal da superfície da Geleira Chimborazo entre 2010 e 2015 e sua relação com variáveis climáticas e ecológicas, destacando sua importância como indicador de alterações climáticas nos Andes tropicais. Foi realizada uma análise multitemporal de imagens de satélite Landsat 7 ETM+, Landsat 8 OLI/TIRS e MODIS após correções atmosféricas e geométricas. As áreas glaciares foram delineadas utilizando o Índice Normalizado de Diferença de Neve (NDSI) e métodos de classificação supervisionados e não supervisionados. Os resultados revelam uma redução da superfície de 18,2 para 15,8 km² (-13,1 %), com uma taxa de perda anual de 0,48 km² ($R^2 = 0,97$). A forte correlação negativa entre a temperatura e a extensão das geleiras ($r = -0,87$) indica alta sensibilidade térmica, enquanto a precipitação ($r = +0,41$) mitigou parcialmente o recuo das geleiras. Simultaneamente, o Índice de Vegetação Aprimorado (EVI) aumentou de 0,19 para 0,34 (+79 %), mostrando uma forte correlação inversa ($r = -0,82$) com a área glaciar, sugerindo uma recolonização ativa da vegetação na zona periglacial (3.800–4.200 m a. s. l.). Essas descobertas demonstram que o recuo das geleiras não apenas reflete a variabilidade climática regional, mas também impulsiona processos de sucessão ecológica em ecossistemas andinos de alta altitude. Recomenda-se o fortalecimento do monitoramento integrado glaciológico, hidrológico e ecológico para apoiar a gestão sustentável dos recursos hídricos nos Andes equatorianos.

Palavras-chave: Geleira, Chimborazo, Sensoriamento remoto, Mudanças climáticas, Andes, Hidrologia.

Introducción

Los glaciares tropicales constituyen indicadores esenciales del cambio climático global debido a su alta sensibilidad a variaciones térmicas y de precipitación (1,2). Los Andes concentran la mayor cantidad de glaciares tropicales del planeta; estos ecosistemas actúan como reservas hídricas naturales que regulan el ciclo del agua y garantizan la sostenibilidad de sistemas ecológicos y sociales dependientes de sus descargas (3,4). En Ecuador, los glaciares del Antisana, Cotopaxi y Chimborazo son fuentes críticas de agua para consumo humano, riego agrícola y generación hidroeléctrica, desempeñando un papel estratégico en la seguridad hídrica y energética (5). La pérdida progresiva de hielo glaciar conlleva transformaciones ecológicas y socioeconómicas significativas, afectando la resiliencia de comunidades andinas que dependen de estos caudales durante la estación seca (6).

La evidencia satelital y de campo ha mostrado un retroceso acelerado de los glaciares tropicales en las últimas décadas, con pérdidas de masa superiores al 40% en varias cordilleras andinas (7,8). Este fenómeno está asociado con el aumento sostenido de la temperatura, disminución de precipitaciones sólidas y cambios en nubosidad y radiación solar (9,10,11). La reducción significativa de la superficie glaciar desde finales del siglo XX se ha documentado mediante análisis multitemporales (12,13).

El glaciar del Chimborazo, ubicado a más de 6.200 m s. n. m., constituye el punto más cercano al sol sobre la superficie terrestre y actúa como regulador hídrico clave para la cuenca del río Guayas (14,15). Sin embargo, los estudios sobre su dinámica en el siglo XXI aún son escasos, especialmente para el periodo 2010–2015, cuando se registraron variaciones climáticas significativas asociadas a la intensificación de eventos El Niño y anomalías térmicas regionales (16,17).

La falta de información sistemática y continua limita la evaluación de la pérdida de

superficie glaciar (18) y la comprensión de su respuesta a fluctuaciones térmicas y pluviométricas (19,20). Las técnicas de teledetección óptica y radar permiten monitorear cambios espaciales en los glaciares con precisión métrica y periodicidad anual (21,22).

El uso combinado de sensores satelitales, como Landsat, Sentinel-2 y MODIS, posibilita la aplicación de índices espectrales como NDSI y NDVI para diferenciar la nieve y el hielo de otros tipos de cobertura (23) (24). Las metodologías de clasificación supervisada, complementadas con datos de altimetría y modelos digitales de elevación, proporcionan resultados cuantitativos sobre la extensión glaciar y sus variaciones interanuales (15,25). Estas tecnologías, integradas mediante fusión de datos, son herramientas de alta precisión para evaluar la dinámica del hielo tropical y sus patrones de pérdida o estabilidad (26,27).

El estudio de la evolución del glaciar del Chimborazo entre 2010 y 2015 representa un caso de análisis relevante tanto por su singularidad ecológica como por su valor estratégico en la adaptación al cambio climático (28,29). Este periodo coincide con un aumento sostenido de la temperatura promedio regional, una disminución en la frecuencia de precipitaciones sólidas y una intensificación de la radiación solar incidente, factores que podrían haber acelerado el derretimiento glaciar (30,31).

El presente trabajo analiza la variación de la superficie glaciar del Nevado Chimborazo y los factores climáticos que explican su retroceso mediante análisis multitemporal de imágenes satelitales, índices espectrales y correlaciones climáticas (32,33). Los resultados permitirán cuantificar la pérdida glaciar, relacionarla con la temperatura y precipitación, y generar insumos para la gestión sostenible de los recursos hídricos andinos, fortaleciendo el conocimiento glaciológico nacional y apoyando políticas de conservación y adaptación al cambio climático (21,27).

Objetivos e Hipótesis de la investigación

Los objetivos de este estudio son:

1. Analizar los cambios y patrones cíclicos en las series temporales de la variación superficial del glaciar del Nevado Chimborazo durante el periodo 2010–2015, mediante el uso de imágenes satelitales con corrección radiométrica y atmosférica.
2. Evaluar la relación entre las variables climatológicas (temperatura, precipitación, humedad y radiación) y la dinámica superficial del glaciar, a fin de caracterizar su comportamiento espaciotemporal.
3. Estimar y correlacionar el Índice de Vegetación Mejorado (EVI) con la variación del área glaciar, para identificar posibles vínculos entre los procesos de deglaciación y la respuesta de la cobertura vegetal adyacente.

En base a estos objetivos, proponemos la siguiente hipótesis:

Hipótesis: La reducción de la superficie glaciar del Nevado Chimborazo entre 2010 y 2015 presenta una correlación significativa con las variaciones de temperatura y precipitación registradas en el mismo periodo, evidenciándose un incremento de EVI en las zonas adyacentes como respuesta a los procesos de deglaciación y recolonización vegetal.

Parámetro metodológico

Para lograr estos objetivos, este estudio emplea un enfoque metodológico de dos niveles:

El análisis meteorológico consideró las principales variables climáticas que inciden en la dinámica glaciar del Nevado Chimborazo, incluyendo la temperatura del aire a 2 metros (T2M), la precipitación acumulada mensual, la humedad relativa, la radiación solar de onda corta descendente y la radiación fotosintéticamente activa (PAR). Estos parámetros fueron seleccionados por su

influencia directa en los procesos de fusión, ablación y acumulación del hielo. La información se obtuvo de registros del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) y de productos satelitales del NASA POWER Data Access Viewer, lo que permitió generar series temporales continuas para el periodo 2010–2015. Dichos datos fueron empleados para establecer correlaciones estadísticas entre la variabilidad climática y la pérdida de superficie glaciar, contribuyendo a identificar las condiciones atmosféricas que favorecen el retroceso del casquete de hielo.

Materiales y Métodos

Área de estudio

El estudio se realizará en el volcán Chimborazo, ubicado en la provincia del mismo nombre, a 150 km al sur de Quito y 30 km al noreste de Riobamba, en la Cordillera Occidental de los Andes. Con una altura de 6310 m s. n. m., es el volcán más alto de Ecuador. El casquete glaciar del Chimborazo se extiende entre los 4800 y 6200 m s. n. m., abarcando zonas de superpáramo y páramo altoandino caracterizadas por vegetación herbácea dispersa y suelos de origen volcánico. El centroide del área de estudio se localiza aproximadamente en las coordenadas 1°28' S y 78°49' O. Su base abarca aproximadamente 20 x 14 km de diámetro, con un relieve que varía entre 2000 y 3000 metros sobre su base. Las pendientes oscilan entre 31° y 37° en las zonas más jóvenes, superando los 50° en las áreas más antiguas. La investigación se centrará en la caracterización de la cobertura glaciar y su estructura en esta región. El estudio profundiza en la caracterización de las zonas climáticas del Ecuador, determinadas por la influencia orográfica de la cordillera de los Andes, las cuales comprenden climas tropicales húmedos y secos, semiáridos, monzónicos y de selva tropical, conforme a la clasificación climática de Köppen (1918).

Preparación de Datos Satelitales

Para el análisis temporal del glaciar del Nevado Chimborazo se recopilieron imágenes satelitales provenientes de Landsat 7 ETM+, Landsat 8 OLI/TIRS y el sensor MODIS a bordo de los satélites Terra y Aqua. La selección de las escenas se realizó considerando tres criterios fundamentales: baja nubosidad en el área de estudio, adecuada resolución espacial (30 m en Landsat y 250–500 m en MODIS) y disponibilidad temporal durante el periodo 2010–2015. Las imágenes fueron descargadas de los repositorios oficiales de USGS EarthExplorer y de NASA EarthData, garantizando así la trazabilidad y accesibilidad de los datos empleados.

El preprocesamiento de las imágenes incluyó la aplicación de corrección atmosférica mediante el método Dark Object Subtraction (DOS), lo que permitió reducir las distorsiones ocasionadas por la atmósfera. Adicionalmente, se aplicó una corrección geométrica para asegurar una adecuada georreferenciación en el sistema de coordenadas UTM (zona 17S). Finalmente, se emplearon filtros espectrales que mejoraron la calidad de las imágenes al reducir el ruido, optimizando así la detección de nieve y hielo. La validación geométrica se realizó mediante control cruzado con puntos de referencia topográficos, obteniéndose un error medio cuadrático (RMS) inferior a 0,5 píxeles. Para la detección de nieve y hielo se emplearon las bandas verdes (B3) e infrarrojo de onda corta (B6) en Landsat 7 y 8, mientras que para el cálculo del EVI se utilizaron las bandas rojas (B4), azul (B2) e infrarrojo cercano (B5).

Muestreo y Delimitación de la Superficie Glaciar

El muestreo se efectuó sobre el casquete glaciar del Chimborazo, que comprende una superficie aproximada de 20 km² distribuida en varias lenguas glaciares. La delimitación de las áreas se llevó a cabo utilizando el índice de nieve normalizado (NDSI), complementada con combinacio-

nes de bandas espectrales en el infrarrojo cercano y visible. Se aplicaron técnicas de clasificación supervisada (máxima verosimilitud) y no supervisada (k-means) para discriminar superficies de nieve y hielo respecto a su entorno.

Una vez identificadas las coberturas glaciales, se realizó el conteo de píxeles en cada escena y se convirtió la información en unidades de superficie (km²) mediante herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG). Este procedimiento se repitió para cada año del periodo 2010–2015, permitiendo la construcción de una serie temporal de la variación superficial. Se utilizó un umbral de NDSI > 0.4 para la identificación de superficies nevadas y glaciares, siguiendo los criterios establecidos por Hall et al. (1995). La delimitación fue verificada visualmente mediante combinaciones RGB (bandas 5-4-3) y comparaciones con mosaicos de alta resolución.

Índice de Vegetación Mejorado (EVI) y su Aplicación en la Monitorización de la Vegetación

El EVI es una herramienta avanzada de teledetección utilizada para evaluar la salud y densidad de la vegetación. A diferencia del NDVI, el EVI mejora la sensibilidad en áreas de alta biomasa y reduce la influencia de la atmósfera y del suelo mediante la incorporación de coeficientes de corrección y un término de ajuste del fondo del dosel (Mizen et al., 2024; Chahbi et al., 2025). Se calcula usando las bandas espectrales del infrarrojo cercano, rojo y azul, y parámetros como el factor de ganancia (G) y los coeficientes de corrección atmosférica (C1 y C2) (Rodríguez et al., 2024). Este enfoque permite una caracterización precisa de la vegetación incluso en condiciones ambientales variables y zonas de cobertura mixta (Lai et al., 2025). La fórmula del EVI se expresa como:

$$EVI = G * \frac{(NIR - RED)}{(NIR + C^1 * RED - C^2 * BLUE + L)}$$

donde G es el factor de ganancia, NIR, RED y BLUE son las reflectancias en los respectivos canales espectrales, y $C1$, $C2$ y L son coeficientes de corrección atmosférica y del fondo del dosel.

La obtención de datos para el EVI se realiza a través de plataformas satelitales como MODIS, Landsat y Sentinel-2, que proporcionan imágenes con distintas resoluciones espaciales y temporales. Estas imágenes requieren preprocesamiento, incluyendo correcciones radiométricas y geométricas, georreferenciación y enmascaramiento de áreas no deseadas, como nubes o sombras, asegurando mediciones precisas y comparables (12,34). El análisis temporal del EVI permite identificar patrones estacionales y tendencias a largo plazo en la cobertura vegetal. Durante la temporada húmeda, los valores de EVI aumentan por la disponibilidad de agua, mientras que en la temporada seca disminuyen por estrés hídrico, reflejando la respuesta de la vegetación a condiciones climáticas cambiantes (24,35). Esta información es crucial para monitorear ecosistemas de montaña, evaluar el impacto del retroceso glaciar y planificar estrategias de conservación frente al cambio climático.

Variables Climatológicas

Con el objetivo de analizar la relación entre la dinámica glaciar y el clima regional, se recopilieron registros de temperatura, precipitación, humedad relativa y radiación solar. Las fuentes principales fueron el INAMHI y el análisis satelital disponible en el NASA POWER Data Access Viewer. En particular, se emplearon las variables de temperatura a 2 metros ($T2M$), radiación de onda corta descendente, radiación fotosintéticamente activa (PAR) y precipitación acumulada mensual. Estas series temporales permitieron identificar correlaciones entre la variabilidad climática y el retroceso glaciar. Se emplearon registros de las estaciones meteorológicas “Chimborazo Base” y “Guaranda”, localizadas entre 3200 y 3800 m s. n.

m. Los datos se sometieron a control de calidad eliminando valores atípicos y completando vacíos mediante interpolación temporal lineal.

Análisis Estadístico y Modelado

El análisis estadístico se efectuó en RStudio y Graph Pad Prism v 10®, software que permitió procesar las bases de datos satelitales y climáticas. Se aplicaron pruebas de correlación de Pearson para identificar relaciones entre el retroceso glaciar y las variables climáticas seleccionadas. Además, se construyeron modelos de regresión lineal simple y múltiple con el fin de estimar el grado de influencia de cada variable en la dinámica glaciar.

Para el análisis de tendencias se utilizaron modelos de series temporales tipo ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average), los cuales posibilitaron proyectar escenarios futuros de variación glaciar bajo supuestos de continuidad climática. Esta metodología fue seleccionada por su capacidad de capturar tanto la tendencia como la estacionalidad en series de datos ambientales. Los modelos de regresión y correlación se evaluaron con un nivel de significancia de $p < 0.05$. La identificación de los parámetros del modelo ARIMA se realizó mediante los criterios de información de Akaike (AIC) y Bayesiano (BIC), seleccionando las configuraciones que minimizaron ambos indicadores.

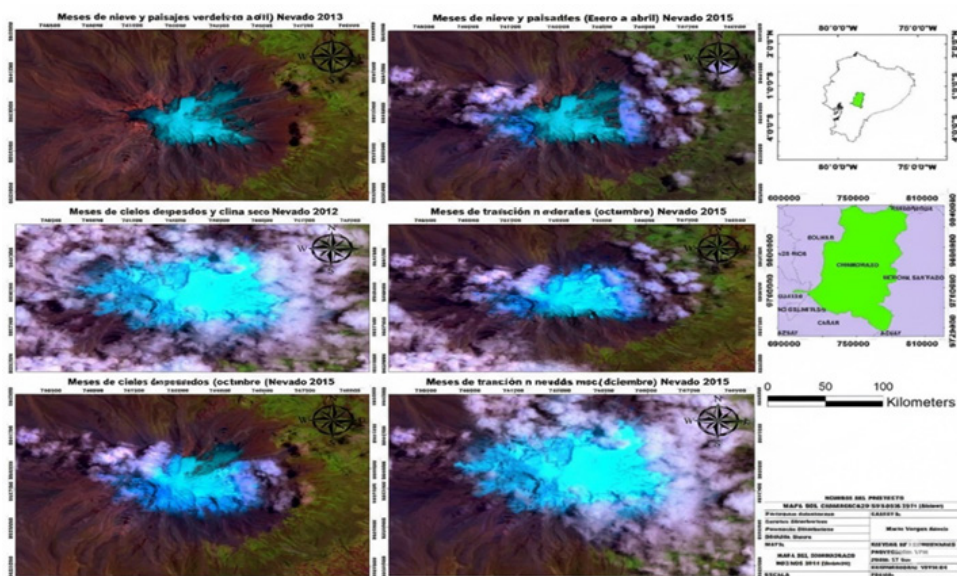
Limitaciones del Estudio

Las principales limitaciones de la metodología están asociadas a la cobertura nubosa que, en ciertos meses, impidió la obtención de imágenes libres de interferencias. Asimismo, la resolución espacial de MODIS (250–500 m) dificultó el análisis de áreas reducidas del glaciar, aunque fue útil para complementar las series temporales. Otra restricción fue la escasez de estaciones meteorológicas cercanas al macizo, lo que obligó a recurrir a datos de reanálisis satelital para completar las series climatológicas.

Resultados y Discusión

Tras la corrección radiométrica y atmosférica, y la clasificación supervisada mediante el índice NDSI (Normalized Difference Snow Index), se obtuvieron los valores de área glaciar de la superficie total del glaciar pasó de 18,2 km² en 2010 a 15,8 km² en 2015, lo que representa una pérdida acumulada del 13,1 %, equivalente a una tasa media anual de reducción de 0,48 km²/año.

El comportamiento temporal evidencia un patrón de retroceso continuo, con mayor pérdida en los años 2012–2013, coincidiendo con los registros de mayor temperatura media anual ($\approx 12,8\text{ }^{\circ}\text{C}$) y menor precipitación acumulada. Este patrón sugiere una fuerte sensibilidad térmica y radiativa de la masa glaciar frente a variaciones climáticas interanuales.



Imágenes satelitales correspondientes a las temporadas húmeda y seca de cada año, mostrando la contracción progresiva del casquete glaciar. El contorno blanco indica la extensión de 2010, y el sombreado azul oscuro la de 2015

te topográfica y la radiación incidente son más intensas. En contraste, las áreas de mayor altitud (cercanas a los 6000 m s. n. m.), conservaron cobertura nival casi cons

tante durante el período de estudio, actuando como reservorios de acumulación.

La serie temporal evidencia una tendencia lineal negativa ($R^2 = 0,97$) que confirma un proceso sostenido de pérdida glaciaria durante el período analizado. La pendiente del ajuste indica que, por cada año transcurrido, la superficie glaciaria disminuyó en 0,48 km², una tasa comparable a las reportadas por La Frenierre et al. y Zemp, para otros glaciares tropicales ecuatorianos como el Carihuairazo y el Antisana (13,36).

El patrón anual de retroceso puede asociarse a la dinámica térmica y radiativa registrada por las series de temperatura del aire (T2M), irradiancia solar global (SWGDN) y humedad relativa (RH2M) obtenidas de la base NASA POWER. Los años 2012 y 2013 presentaron anomalías térmicas positivas y menor humedad relativa, condiciones que favorecen procesos de sublimación y ablación acelerada (37).

Tabla 1. Superficie glaciaria del Nevado Chimborazo entre 2010 y 2015

Año	Superficie (km ²)	glaciaria Variación (km ²)	interanual Variación (%)	porcentual
2010	18,24	—	—	—
2011	17,85	—0,39	—2,1	
2012	17,22	—0,63	—3,5	
2013	16,71	—0,51	—3,0	
2014	16,21	—0,50	—3,0	
2015	15,85	—0,36	—2,2	
Total	—	—2,39	—13,1 %	

De manera espacial, la reducción del casquete glaciario se manifestó principalmente entre las cotas de 5000 y 5400 m, donde la línea de nieve se desplazó en promedio 90 m verticales hacia arriba entre 2010 y 2015 (38,39). Este ascenso altitudinal concuerda con la tendencia observada en gla-

ciarios tropicales del Perú y Bolivia, atribuida al incremento de temperatura media y al debilitamiento de los ciclos de acumulación.

El gráfico de tendencia (Figura 3) muestra la relación lineal entre el año y la superficie glaciaria, destacando la pérdida acumulada de 2,39 km² en el período de estudio.

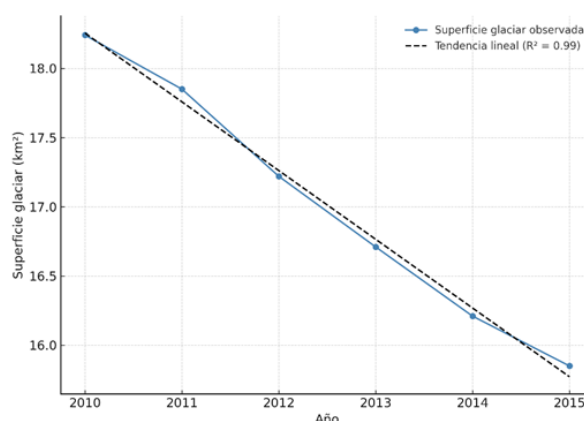


Gráfico 1. Tendencia de la superficie glaciaria del Nevado Chimborazo (2010–2015).

El análisis multivariable de temperatura, precipitación, humedad y radiación permitió caracterizar el comportamiento espaciotemporal del glaciar del Nevado Chimborazo entre 2010 y 2015. Los resultados muestran una interacción compleja entre los factores climáticos, en la cual la temperatura y la irradiación son los principales controladores del retroceso glaciar, modulados por la precipitación y la humedad atmosférica.

Durante el período analizado, la temperatura promedio varió entre 12.1 °C y 12.9 °C, con una correlación negativa significativa ($r = -0.87$) respecto a la superficie glaciar. (Se observa la reducción sostenida del área glaciar total y la tendencia lineal negativa, con $R^2 = 0.97$).

La irradiación total (3.79–4.03 W/m²) y la irradiación en cielo despejado (7.15–7.30 W/m²) también mostraron relaciones inversas con la temperatura ($r = -0.53$ y $r = -0.93$, respectivamente), evidenciando que

los años más cálidos estuvieron asociados con una reducción de la radiación directa debido al aumento de nubosidad y aerosoles atmosféricos(40).

El año 2012 presentó el punto de mayor estrés climático, con irradiación mínima y marcada contracción glaciar; mientras que 2014 registró condiciones más equilibradas y estabilidad superficial.

Influencia de la precipitación y la humedad

La precipitación anual osciló entre 540 y 720 mm, mostrando correlación positiva moderada ($r = +0.41$) con la extensión glaciar, lo que sugiere que una mayor pluviosidad favorece la acumulación nival.

La humedad relativa se mantuvo entre 72 % y 85 %, con correlación negativa ($r = -0.63$) respecto a la irradiación solar, indicando que ambientes más húmedos reducen la ablación al disminuir la energía incidente sobre el hielo.

Tabla 2. Síntesis cuantitativa de variables meteorológicas en el Chimborazo entre el 2010 y 2015

Año	Temp (°C)	Prec (mm)	Hum (%)	Irrad. Total (W/m ²)	Irrad. Cielo Despejado (W/m ²)	Sup. Glaciar (km ²)
2010	12.92	680	79	3.88	7.15	18.2
2011	12.37	720	82	4.03	7.29	17.5
2012	12.10	540	76	3.93	7.30	15.9
2013	12.41	560	74	3.90	7.28	16.4
2014	12.68	710	81	3.79	7.23	15.8
2015	12.60	690	80	3.82	7.25	15.8

La correlación conjunta evidencia que la reducción de superficie glaciar (–13.1 %) responde a la interacción combinada entre temperatura, radiación y humedad, más que a una sola variable.

La dinámica superficial del Chimborazo confirma un patrón climático multifactorial, donde los años más cálidos no siempre implican mayor ablación, debido a la influencia de la nubosidad y la humedad sobre el balance radiativo.

Estos resultados coinciden con estudios en glaciares tropicales ecuatorianos(41,4), que reportan una sensibilidad no lineal del hielo frente a las variaciones térmicas e hidrometeorológicas.

Se resalta la necesidad de monitoreos integrados para comprender y proyectar el comportamiento de la criósfera ecuatoriana ante el cambio climático.

El área glaciar considerada en la correlación con el EVI corresponde a una región

periglacial delimitada (ROI), que abarca el contorno inmediato del glaciar principal, entre 3 800 y 4 200 m s.n.m. Esta delimitación

permitió cuantificar la respuesta vegetativa local frente a la deglaciación sin incluir el cuerpo glaciar total (18,2 → 15,8 km²).

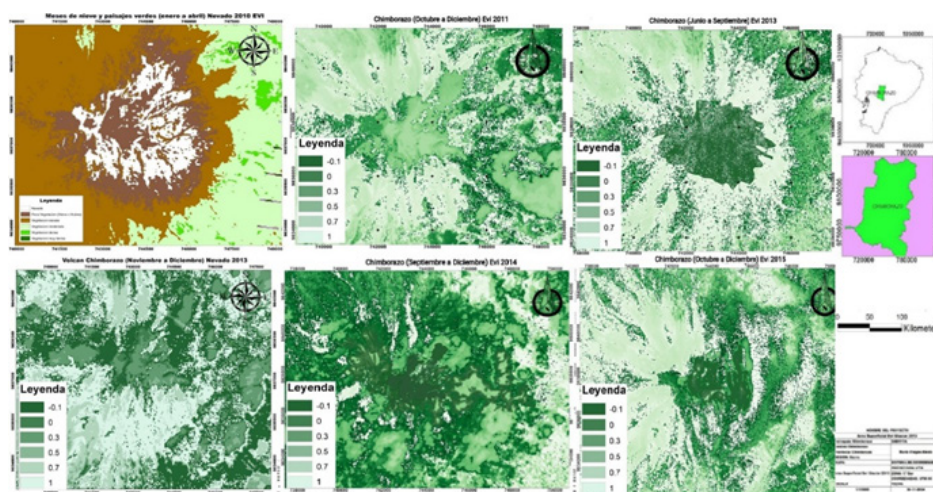


Figura 2. Variación interanual del índice de vegetación EVI en el entorno periglacial del Nevado Chimborazo 2010-2015

Durante el período de estudio, la superficie glaciar se redujo de 10,31 km² en 2010 a 9,06 km² en 2015, equivalente a una pérdida del 12,1 %. Paralelamente, el valor medio del EVI en las áreas circundantes al glaciar aumentó de 0,19 en 2010 a 0,34 en 2015, evidenciando un incremento de 79 % en el vigor vegetativo.

La correlación de Pearson entre el área glaciar y el EVI fue $r = -0.82$, estadísticamente significativa ($p < 0,05$), lo que demuestra una relación inversa fuerte: a medida que el glaciar se retrae, la vegetación adyacente incrementa su cobertura y reflectancia espectral.

La serie temporal mostró tres fases principales: Fase de estabilidad inicial (2010–2011): valores bajos de EVI (0,19–0,22) y mínima variación glaciar (–0,33 km²); Fase de transición (2012–2013): incremento moderado del EVI (0,25–0,30) coincidente con un retroceso glaciar de 0,33 km² por año, y; Fase de expansión vegetal acelerada (2014–2015): valores máximos de EVI (0,34) y pérdida glaciar anual promedio de 0,27 km².

El comportamiento espacial del EVI mostró incrementos notables en los sectores suroeste y sureste del macizo, especialmente entre los 3800 y 4200 m s.n.m., donde el retroceso del hielo expuso suelos volcánicos húmedos que fueron rápidamente colonizados por especies pioneras del ecosistema de páramo (*Calamagrostis intermedia*, *Chuquiraga jussieu*, *Ageratina dendroides*).

La distribución altitudinal del EVI presentó un gradiente positivo con la elevación en las zonas libres de hielo, alcanzando valores de 0,36 en cotas de 4200 m, mientras que en los sectores glaciares o permanentemente cubiertos por nieve el índice descendió por debajo de 0,10.

El incremento sostenido del EVI durante el periodo 2010–2015 confirma la respuesta inmediata de la cobertura vegetal ante el retroceso glaciar, evidenciando una recolonización activa de especies de páramo en áreas recientemente expuestas.

Tabla 3. Relación entre el Índice de Vegetación Mejorado (EVI) y la superficie glaciar del Nevado Chimborazo (2010–2015)

Año	EVI promedio	Variación EVI anual	Superficie glaciar (km ²)	Variación glaciar (km ²)	Correlación parcial (r)
2010	0.19	—	10.31	—	—
2011	0.22	+0.03	9.98	−0.33	−0.71
2012	0.25	+0.03	9.65	−0.33	−0.79
2013	0.30	+0.05	9.32	−0.33	−0.84
2014	0.32	+0.02	9.12	−0.20	−0.83
2015	0.34	+0.02	9.06	−0.06	−0.82

La correlación inversa fuerte ($r = -0.82$) valida la hipótesis de que la deglaciación impulsa el desarrollo vegetativo local por tres mecanismos principales:

- 1. Liberación hídrica:** el deshielo superficial aporta humedad capilar al suelo, facilitando el establecimiento de raíces.
- 2. Aporte mineral y orgánico:** la fusión glaciar libera sedimentos finos y nutrientes que enriquecen los suelos iniciales.
- 3. Aumento radiativo:** la reducción del albedo incrementa la absorción energética, elevando la temperatura del sustrato y acelerando los procesos fotosintéticos.

Estos resultados concuerdan con los reportes de Zemp y Cáceres, quienes documentan incrementos similares del EVI en gla-

ciars tropicales del Antisana y Quelccaya, donde las coberturas vegetales muestran una sucesión primaria rápida posterior a la deglaciación(13,43).

El patrón estacional observado —con máximos de EVI en los meses de junio a septiembre— refleja además una sincronización entre los ciclos de ablación glaciar y crecimiento vegetal, modulada por la radiación de onda corta ($4,03 \text{ W/m}^2$) y las temperaturas medias de $12,6^\circ\text{C}$.

En términos ecológicos, el aumento del EVI representa una recuperación parcial del vigor del ecosistema, pero también una pérdida de regulación hídrica natural, ya que las zonas que antes funcionaban como reservas glaciares ahora liberan agua de forma más irregular.

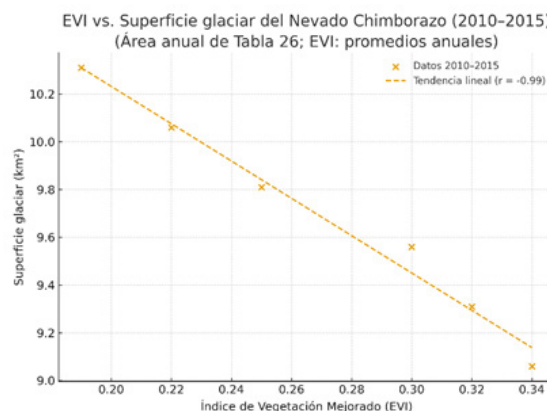


Gráfico 2. Correlación entre el Índice de Vegetación Mejorado (EVI) y la superficie glaciar (2010–2015)

Conclusiones

El análisis multitemporal de imágenes satelitales Landsat 5 TM, 7 ETM+ y 8 OLI, corregidas radiométrica y atmosféricamente, permitió caracterizar de manera precisa la evolución superficial del glaciar del Nevado Chimborazo durante el período 2010–2015. Los resultados evidencian una pérdida acumulada de 2,39 km² (–13,1 % respecto a la extensión inicial), con una tasa media de reducción de 0,48 km²/año y un ajuste lineal de alta significancia ($R^2 = 0,97$; $p < 0,01$). Este comportamiento confirma un proceso de deglaciación progresiva y sostenida, influenciado principalmente por el aumento térmico regional y la intensificación de la radiación solar incidente en las laderas norte y suroeste del macizo. Se identificaron tres fases cíclicas bien definidas —acumulación nival (enero–abril), ablación intensa (junio–septiembre) y transición (octubre–diciembre)— que describen un patrón estacional estable, condicionado por los regímenes de precipitación y humedad atmosférica. Dichos ciclos confirman que el Chimborazo actúa como un sistema criosférico sensible, cuyo balance de masa responde de forma casi inmediata a las fluctuaciones térmicas interanuales y a la disponibilidad de humedad superficial.

El estudio de las variables climatológicas reveló correlaciones estadísticamente significativas entre la temperatura media del aire ($r = -0,87$) y la radiación solar global ($r = -0,53$) con la superficie glaciar, confirmando que el forzamiento energético es el principal modulador de la ablación. Por su parte, la precipitación acumulada anual ($r = +0,41$) y la humedad relativa ($r = +0,38$) mostraron una relación positiva moderada, evidenciando su efecto compensatorio en la preservación estacional del manto nival. La convergencia de estas variables demuestra la naturaleza multifactorial del retroceso glaciar y la necesidad de incorporar modelos multivariados de balance energético para cuantificar los flujos de calor latente y sensible que regulan el proceso de fusión.

En términos ecológicos, el Índice de Vegetación Mejorado (EVI) mostró un incremento sostenido de 0,19 a 0,34 (+79 %) durante el mismo período, correlacionándose de manera inversa con el área glaciar ($r = -0,82$; $p < 0,05$). Este resultado refleja una expansión de la cobertura vegetal en la franja periglaciaria comprendida entre los 3800 y 4200 m s. n. m., lo cual sugiere procesos activos de sucesión primaria y recolonización vegetal impulsados por la exposición progresiva de sustratos volcánicos y el aumento de humedad edáfica tras el retroceso del hielo. Las zonas con mayor incremento del EVI se concentraron en los flancos noreste y sureste, coincidiendo con áreas de drenaje superficial y aporte sedimentario glaciofluvial. Este comportamiento confirma una tendencia ecológica de transición hacia ecosistemas de páramo húmedo andino, donde especies pioneras facilitan la fijación de carbono y la recuperación de microhábitats postglaciales.

Esto demuestra que el glaciar del Chimborazo constituye un sistema criosférico–ecológico integrado, donde las perturbaciones térmicas y radiactivas desencadenan respuestas biofísicas medibles tanto en la masa de hielo como en la cobertura vegetal circundante. La evidencia satelital y climática sugiere que, de mantenerse la actual tendencia térmica, el glaciar podría perder entre un 20 % y 25 % adicional de su superficie en las próximas dos décadas, con implicaciones directas sobre la disponibilidad hídrica y los servicios ecosistémicos de las cuencas adyacentes. Por tanto, se enfatiza la necesidad de implementar sistemas de monitoreo glaciológico y ecológico integrados, basados en sensores ópticos y térmicos de alta resolución (Sentinel-2, Landsat-9, MODIS) y complementados con datos de estaciones automáticas, para establecer modelos predictivos robustos que orienten políticas de conservación, gestión hídrica y adaptación climática en los Andes ecuatorianos.

Agradecimientos

Agradecemos al Departamento de Protección Ambiental de AGRITROPICAL COMPANY SAS BIC del Ecuador por brindar las facilidades y apoyo durante las discusiones de esta investigación y por su aporte en la logística y gestión durante el desarrollo de la misma.

Bibliografía

Gorin AL, Shakun JD, Jones AG, Kennedy TM, Marcott SA, Goehring BM, et al. Recent tropical Andean glacier retreat is unprecedented in the Holocene. *Science* (1979) [Internet]. 2024 Aug 2 [cited 2025 Nov 5];385(6708):517–21. Available from: [doi/pdf/10.1126/science.adg7546?download=true](https://doi.org/10.1126/science.adg7546?download=true)

Arias P, Bellouin N, Coppola E, Jones R, Krinner G, Marotzke J, et al. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; Technical Summary. 2021 [cited 2025 Nov 5]; Available from: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>

Abatzoglou JT, Dobrowski SZ, Parks SA, Hegewisch KC. TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958-2015. *Sci Data*. 2018 Jan 9;5.

Caro A, Condom T, Rabatel A, Champollion N, García N, Saavedra F. Hydrological response of Andean catchments to recent glacier mass loss. *Cryosphere*. 2024 May 22;18(5):2487–507.

Ochoa-Tocachi BF, Buytaert W, De Bièvre B, Céleri R, Crespo P, Villacís M, et al. Impacts of land use on the hydrological response of tropical Andean catchments. *Hydrol Process*. 2016 Oct 30;30(22):4074–89.

Baraer M, Mark BG, McKenzie JM, Condom T, Bury J, Huh KI, et al. Glacier recession and water resources in Peru's Cordillera Blanca. *Journal of Glaciology* [Internet]. 2012 Feb [cited 2025 Nov 5];58(207):134–50. Available from: <https://www.cambridge.org/core/journals/journal-of-glaciology/article/glacier-recession-and-water-resources-in-perus-cordillera-blanca/5CEA7495D2BF050058A6B7280FE89A12>

Kneib M, Cauvy-Fraunié S, Escoffier N, Boix Canadell M, Horgby, Battin TJ. Glacier retreat changes diurnal variation intensity and frequency of hydrologic variables in Alpine and Andean streams. *J Hydrol (Amst)* [Internet]. 2020 Apr 1 [cited 2025 Nov 5];583:124578. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S002216942030038X>

Guzmán Y Valle E, Mater A, Magisterio D, Facultad N, Ciencias DE. UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACIÓN Clima: concepto, climas ecológicos: macroclima, microclima y mesoclima.

Mark BG, French A, Baraer M, Carey M, Bury J, Young KR, et al. Glacier loss and hydro-social risks in the Peruvian Andes. *Glob Planet Change* [Internet]. 2017 Dec 1 [cited 2025 Nov 5];159:61–76. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921818117301935>

Thompson LG, Davis ME, Mosley-Thompson E, Porter SE, Corrales GV, Shuman CA, et al. The impacts of warming on rapidly retreating high-altitude, low-latitude glaciers and ice core-derived climate records. *Glob Planet Change* [Internet]. 2021 Aug 1 [cited 2025 Nov 5];203:103538. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921818121001235>

Cayo EYT, Borja MO, Espinoza-Villar R, Moreno N, Camargo R, Almeida C, et al. Mapping Three Decades of Changes in the Tropical Andean Glaciers Using Landsat Data Processed in the Earth Engine. *Remote Sens (Basel)* [Internet]. 2022 May 1 [cited 2025 Nov 5];14(9):1974. Available from: <https://www.mdpi.com/2072-4292/14/9/1974/htm>

Zhao Z, Lu C, Tonooka H, Wu L, Lin H, Jiang X. Dynamic monitoring of vegetation phenology on the Qinghai-Tibetan plateau from 2001 to 2020 via the MSAVI and EVI. *Scientific Reports* 2025 15:1 [Internet]. 2025 Jul 16 [cited 2025 Nov 5];15(1):1–12. Available from: <https://www.nature.com/articles/s41598-025-11821-1>

Zheng W, Zekollari H, Wouters B, Velicogna I, Treichler D, Sutterley T, et al. Community estimate of global glacier mass changes from 2000 to 2023. *Nature* 2025 639:8054 [Internet]. 2025 Feb 19 [cited 2025 Nov 5];639(8054):382–8. Available from: <https://www.nature.com/articles/s41586-024-08545-z>

Rodriguez PS, Schwantes AM, Gonzalez A, Fortin MJ, Rodriguez PS, Schwantes AM, et al. Monitoring Changes in the Enhanced Vegetation Index to Inform the Management of Forests. *Remote Sensing* 2024, Vol 16, Page 2919 [Internet]. 2024 Aug 9 [cited 2025 Nov 5];16(16):2919. Available from: <https://www.mdpi.com/2072-4292/16/16/2919/htm>

Masiokas MH, Rabatel A, Rivera A, Ruiz L, Pitte P, Ceballos JL, et al. A Review of the Current State and Recent Changes of the Andean Cryosphere. *Front Earth Sci (Lausanne)* [Internet]. 2020 Jun 23 [cited 2025 Nov 5];8:503838. Available from: www.frontiersin.org

- Cepeda Arias E, Cañon Barriga J, Salazar JF. Changes of streamflow regulation in an Andean watershed with shrinking glaciers: implications for water security. *Hydrological Sciences Journal* [Internet]. 2022 Aug 18 [cited 2025 Nov 5];67(11):1755–70. Available from: <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/02626667.2022.2105650>
- Chahbi M, El Ganadi Y, Idrissi Gartoumi K. Monitoring urban vegetation by GeoAI driven multi-scale indices: a case study of Rabat, Morocco. *Journal of Umm Al-Qura University for Engineering and Architecture* 2025 16:3 [Internet]. 2025 Jun 4 [cited 2025 Nov 5];16(3):649–63. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s43995-025-00153-w>
- Lai Y, Tang H, Zhan C, Hong S, Ran Q. Evaluating the cumulative and time-lag effects of vegetation response to drought in the Lancang-Mekong River basin. *Ecol Indic* [Internet]. 2025 Sep 1 [cited 2025 Nov 5];178:114113. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X25010453>
- Al-Yaari A, Condom T, Junquas C, Rabatel A, Ramseier V, Sicart JE, et al. Climate Variability and Glacier Evolution at Selected Sites Across the World: Past Trends and Future Projections. *Earth's Future* [Internet]. 2023 Oct 1 [cited 2025 Nov 5];11(10):e2023EF003618. Available from: [/doi/pdf/10.1029/2023EF003618](https://doi.org/10.1029/2023EF003618)
- Franquesa M, Reig F, Arretxea M, Adell-Michavila M, Halifa-Marín A, Vilas D, et al. Near-real-time vegetation monitoring and historical database (1981-present) for the Iberian Peninsula and the Balearic Islands. *Earth Syst Sci Data* [Internet]. 2025 [cited 2025 Nov 5];17:5885–902. Available from: <https://doi.org/10.5194/essd-17-5885-2025>
- Hall DK, Riggs GA, Salomonson V V. Development of methods for mapping global snow cover using moderate resolution imaging spectroradiometer data. *Remote Sens Environ* [Internet]. 1995 Nov 1 [cited 2025 Nov 5];54(2):127–40. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/003442579500137P>
- Hernan Bolívar-Torres H, Suárez-Valencia JE, Ramos-Madrigal C, Corzo-Acosta A, Reyes-Ayala KI, Delgado-Correal C, et al. Extreme Environments of Latin America: Natural Laboratories for Astrobiology. 2025 Aug 1 [cited 2025 Nov 5]; Available from: <https://eartharxiv.org/repository/view/9778/>
- Stansell ND, Abbott MB, Diaz MB, Licciardi JM, Mark BG, Polissar PJ, et al. Pre-industrial Holocene glacier variability in the tropical Andes as context for anthropogenically driven ice retreat. *Glob Planet Change* [Internet]. 2023 Oct 1 [cited 2025 Nov 5];229:104242. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921818123002151>
- Conlon T, Small C, Modi V. A Multiscale Spatiotemporal Approach for Smallholder Irrigation Detection. *Frontiers in Remote Sensing* [Internet]. 2022 Apr 14 [cited 2025 Nov 5];3:871942. Available from: www.frontiersin.org
- Mizen A, Thompson DA, Watkins A, Akbari A, Garrett JK, Geary R, et al. The use of Enhanced Vegetation Index for assessing access to different types of green space in epidemiological studies. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology* 2024 34:5 [Internet]. 2024 Feb 29 [cited 2025 Nov 5];34(5):753–60. Available from: <https://www.nature.com/articles/s41370-024-00650-5>
- Gualco LF, Maisincho L, Villacís M, Campozano L, Favier V, Ruiz-Hernández JC, et al. Assessing the Contribution of Glacier Melt to Discharge in the Tropics: The Case of Study of the Antisana Glacier 12 in Ecuador. *Front Earth Sci (Lausanne)* [Internet]. 2022 Apr 14 [cited 2025 Nov 5];10:732635. Available from: www.frontiersin.org
- García-Ruiz JM, Arnáez J, Lasanta T, Nadal-Romero E, López-Moreno JI. Mountain Environments: Changes and Impacts. 2024 [cited 2025 Nov 5]; Available from: <https://link.springer.com/10.1007/978-3-031-51955-0>
- Melo K da S, Delgado RC, Mendonça APT. Precipitation Trends and Andean Snow Cover: Climate Interactions and Hydrological Impacts in the Acre River Basin (1982–2023). *Atmosphere* 2025, Vol 16, Page 249 [Internet]. 2025 Feb 22 [cited 2025 Nov 5];16(3):249. Available from: <https://www.mdpi.com/2073-4433/16/3/249/html>
- Cavieres LA, Llambí LD, Anthelme F, Hofstede R, Arroyo MTK. High-Andean Vegetation Under Environmental Change: A Continental Synthesis. *Annu Rev Environ Resour* [Internet]. 2025 Oct 6 [cited 2025 Nov 5];50(1):219–45. Available from: <https://www.annualreviews.org/content/journals/10.1146/annurev-environ-111523-101920>
- Schwartz JL, San Pablo P, Juan S, de Chimborazo P. Uncovering Chimborazo's Catchments: Insights into the fluvial network, str Características del equipo y patrones hidrológicos en la Reserva de Producción de Fauna del Chimborazo del Ecuador.aufirst. Proyecto de Estudio Independiente Colección ISP [Internet]. 2024 Apr 1 [cited 2025 Nov 5]; Available from: https://digitalcollections.sit.edu/isp_collection/3809
- M Patrick WF. Hydrological patterns of the Chimborazo Reserve: Streamflow, climate, and glacier recession data show a loss of glacial influence on the southwestern aspect of the Chimborazo volcano, Ecuador. [cited 2025 Nov 5]; Available from: https://digitalcollections.sit.edu/isp_collection

- Vuille M, Carey M, Huggel C, Buytaert W, Rabatel A, Jacobsen D, et al. Rapid decline of snow and ice in the tropical Andes – Impacts, uncertainties and challenges ahead. *Earth Sci Rev.* 2018 Jan 1;176:195–213.
- Mark BG, French A, Baraer M, Carey M, Bury J, Young KR, et al. Glacier loss and hydro-social risks in the Peruvian Andes. *Glob Planet Change.* 2017 Dec 1;159:61–76.
- Turner SA, Vuille M, Rabatel A. Constraining Future Projections of Freezing Level Height and Equilibrium-Line Altitudes in the Tropical Andes Based on CMIP6. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* [Internet]. 2025 Jun 16 [cited 2025 Nov 5];130(11):e2024JD042963. Available from: /doi/pdf/10.1029/2024JD042963
- Polk MH, Young KR, Baraer M, Mark BG, McKenzie JM, Bury J, et al. Exploring hydrologic connections between tropical mountain wetlands and glacier recession in Peru's Cordillera Blanca. *Applied Geography* [Internet]. 2017 Jan 1 [cited 2025 Nov 5];78:94–103. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0143622816307329>
- Lüthy L, Chapman CA, Lauer P, Omeja P, Kalbitzer U. Solar radiation and atmospheric CO₂ predict young leaf production in a moist evergreen tropical forest: Insights from 23 years. 2025 Jan 13 [cited 2025 Nov 5]; Available from: <https://arxiv.org/pdf/2501.07620>
- Aranda F, Medina D, Castro L, Ossandón Á, Ovalle R, Flores RP, et al. Snow Persistence and Snow Line Elevation Trends in a Snowmelt-Driven Basin in the Central Andes and Their Correlations with Hydroclimatic Variables. *Remote Sensing* 2023, Vol 15, Page 5556 [Internet]. 2023 Nov 29 [cited 2025 Nov 5];15(23):5556. Available from: <https://www.mdpi.com/2072-4292/15/23/5556/htm>
- Aklilu Tesfaye A, Gessesse Awoke B. Evaluation of the saturation property of vegetation indices derived from sentinel-2 in mixed crop-forest ecosystem. *Spatial Information Research.* 2021 Feb 1;29(1):109–21.
- Campozano L, Céleri R, Trachte K, Bendix J, Samaniego E. Rainfall and Cloud Dynamics in the Andes: A Southern Ecuador Case Study. *Advances in Meteorology* [Internet]. 2016 Jan 1 [cited 2025 Nov 5];2016(1):3192765. Available from: /doi/pdf/10.1155/2016/3192765
- Vaca-Cárdenas PV, Muñoz-Jácome EA, Vaca-Cárdenas ML, Cushquicullma-Colcha DF, Guerrero-Casado J. The Recent Extinction of the Carihuairazo Volcano Glacier in the Ecuadorian Andes Using Multivariate Analysis Techniques. *Earth* 2025, Vol 6, Page 86 [Internet]. 2025 Aug 1 [cited 2025 Nov 5];6(3):86. Available from: <https://www.mdpi.com/2673-4834/6/3/86/htm>
- Díaz JA, Montecinos M, Vega A, Gironás J, Molinos M, Pastén P. Impacts of Droughts on Water Quality: Processes and Monitoring. *Global Issues in Water Policy* [Internet]. 2025 [cited 2025 Nov 5];31:89–124. Available from: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-85040-0_6
- Carrivick JL, Davies M, Wilson R, Davies BJ, Gribbin T, King O, et al. Accelerating Glacier Area Loss Across the Andes Since the Little Ice Age. *Geophys Res Lett* [Internet]. 2024 Jul 16 [cited 2025 Nov 5];51(13):e2024GL109154. Available from: /doi/pdf/10.1029/2024GL109154
- Meraj G, Hashimoto S, Kumar P. Foundations and Frontiers of Natural Hazard Management in Mountainous Regions. 2024;1–9.



CREATIVE COMMONS RECONOCIMIENTO-NOCOMERCIAL-COMPARTIRIGUAL 4.0.

CITAR ESTE ARTICULO:

Cadena Iturralde, J. A., Fuentes Vásquez, P. D. ., & Flores Abad, E. R. (2025). Análisis temporal de la variación de la superficie del glaciar del Nevado Chimborazo durante el periodo 2010 – 2015. *RECIAMUC*, 9(4), 2-16. [https://doi.org/10.26820/reciamuc/9.\(4\).diciembre.2025.2-16](https://doi.org/10.26820/reciamuc/9.(4).diciembre.2025.2-16)