

Estimación de cambios en la cobertura de nieve del Volcán Nevado del Ruiz entre 2019 y 2021 mediante imágenes Sentinel -2

Meyi Paola Bacca González¹, Paula Andrea Cardona Velásquez², Paola Andrea Ospina Sanchez³

¹Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agrarias. Maestría en Geomática

* Email:mbaccag@unal.edu.co, peardonav@unal.edu.co, pospinas@unal.edu.co

Resumen

En los últimos años, la extensión de los glaciares de montaña en los Andes tropicales han evidenciado una rápida disminución, que modifica la disponibilidad hídrica regional y demanda programas de monitoreo continuo. Este estudio cuantifica las variaciones interanuales de la cobertura de nieve del Nevado del Ruiz (Colombia) entre 2019 y 2021 mediante imágenes Sentinel-2 del instrumento MSI y el Índice de Diferencia Normalizada de Nieve (NDSI). Tras el enmascaramiento de nubes, se generaron composiciones de la mediana anual y se compararon con la mediana multianual para derivar mapas de anomalías. Se evaluaron dos umbrales (0,2 y 0,4) para discriminar la nieve total y la nieve compacta; la exactitud temática se evaluó usando 39 escenas PlanetScope y métricas derivadas de matrices de confusión. Los resultados indican una contracción de la cobertura de nieve en 2019 y una expansión relativa en 2020 y 2021. La proporción de anomalías positivas aumentó de 32,9 % en 2019 a 65,4 % en 2021, coherente con descensos de la temperatura media anual y mayores acumulados de precipitación registrados en la estación Las Brisas. El umbral 0,4 obtuvo una exactitud global de 0,70 y especificidad de 0,90, lo que lo hace más estable para mapear nieve densa; el umbral 0,2 maximizó la sensibilidad, aunque sobreestimó zonas marginales. Los resultados obtenidos concuerdan con investigaciones previas que destacan la importancia de calibrar localmente los umbrales de detección y, además, aportan evidencia para profundizar en la comprensión de la respuesta glacial a la variabilidad climática y sus repercusiones sobre los recursos hídricos locales.

Palabras clave

Anomalías, cobertura, índice espectral, monitoreo, geoespacial.

Abstract

This study presents a multitemporal evaluation of snow cover changes on the Nevado del Ruiz Volcano between 2019 and 2021, using Sentinel-2 images and the Normalized Difference Snow Index (NDSI). Annual mean NDSI values were calculated, and anomaly analysis was conducted by comparing each year to the overall median of the period. The results show fluctuations in the snow cover, with a possible recovery in 2020 and 2021, likely related to variations in temperature and precipitation. Annual NDSI values and anomaly histograms helped identify trends of snow reduction and recovery. Additionally, a visual check and confusion matrix analysis were performed, establishing that the optimal NDSI threshold for the study area is 0.4. These findings are crucial for understanding glacier dynamics in response to climatic variability and their impact on local water resources.

Mountain glaciers in the tropical Andes are retreating rapidly, altering regional hydrology and highlighting the need for systematic snow-cover monitoring. This study quantifies interannual variations in the snow extent of Nevado del Ruiz (Colombia) from 2019 to 2021 using Sentinel-2 MultiSpectral Instrument imagery and the Normalized Difference Snow Index (NDSI). Annual median NDSI composites were generated after cloud masking and were compared with the multi-annual median to obtain anomaly rasters. Two detection thresholds (0.2 and 0.4) were evaluated to distinguish total snow cover from compact snow; classification accuracy was assessed against 39 visually interpreted PlanetScope scenes through confusion-matrix metrics. Results reveal a contraction of snow cover in 2019 followed by a relative expansion in 2020 and 2021. The proportion of positive anomalies increased from 32.9 % in 2019 to 65.4 % in 2021, consistent with lower mean air temperatures and higher annual precipitation recorded at the nearby Las Brisas meteorological station. The 0.4 threshold achieved higher overall accuracy (0.70) and specificity (0.90), indicating greater reliability for mapping dense snow, whereas the 0.2 threshold maximised sensitivity but overestimated marginal snow zones. These findings corroborate previous reports of threshold variability across mountain environments and underscore the importance of locally calibrated parameters.

Keywords

Anomalies, cover, spectral index, monitoring, geospatial.

1. Introducción

El clima es un factor ambiental clave que influye en diversos aspectos de un territorio, generando anomalías que afectan a los sistemas humanos y naturales (IDEAM, 2020). La temperatura y la precipitación son determinantes en estos cambios, especialmente en áreas sensibles como los nevados. El aumento de la temperatura acelera el derretimiento de los glaciares, mientras que la disminución de las precipitaciones en forma de nieve reduce la acumulación de hielo, afectando el balance hídrico y los ecosistemas (Paz Aedo et al., 2011). Estos procesos, impulsados tanto por la variabilidad climática como por el impacto antrópico, tienen efectos cada vez más visibles en los recursos hídricos y las actividades humanas que dependen de ellos.

La dinámica de la capa de nieve en las regiones montañosas afecta el equilibrio energético, el balance de masa de los glaciares y la modelización de la escorrentía del deshielo (Rathore et al., 2018). El deshielo influye en gran parte del caudal de las cuencas hidrálicas, y el aumento de la temperatura reduce la disponibilidad de agua dulce, afectando tanto a los ecosistemas como a las comunidades (Paz Aedo et al., 2011). En Colombia, la reducción de los glaciares ha sido cada vez más evidente en las últimas décadas. De acuerdo con el IDEAM (2024), la extensión glaciar en el país disminuyó de 350 km² a mediados del siglo XIX a apenas 36,1 km² en 2019. Por su parte, el estudio de Salas-Pérez et al. (2017) reporta que el área glaciar del Volcán Nevado del Ruiz se redujo en un 78,4% entre 1999 y 2016. En particular, el glaciar del Volcán Nevado del Ruiz, ubicado en la cordillera Central, tiene una altitud de 5.321 m.s.n.m. y es fuente de varios ríos importantes, como el Gualí, Lagunillas y Recio (SGC, 2020).

En el caso colombiano, Salas-Pérez et al. (2017) estimaron la pérdida de nieve en el Nevado del Ruiz utilizando imágenes satelitales Landsat entre 1999 y 2016, concluyendo que la tendencia de deshielo podría llevar a la pérdida total de su área glaciar para 2027, así mismo (Salas-Pérez et al., 2019) analizó el impacto de fenómenos climáticos como El Niño-Oscilación del Sur en la dinámica glaciar del Nevado del Ruiz, identificando tendencias históricas de retroceso y eventos específicos que han influido en su cobertura de nieve. Las imágenes satelitales son herramientas eficaces para identificar anomalías ambientales, facilitando la toma de decisiones en la gestión de recursos naturales (Shen et al., 2015; Lillesand et al., 2015).

Para monitorear los cambios en la capa de nieve, se han utilizado diversos índices de diferencia normalizados, como el NDSI (Sharma et al., 2014; Rathore et al., 2018; Hall et al., 2002). Estos índices han mostrado ser más efectivos que las tecnologías convencionales de detección de cambios, pues permiten diferenciar el hielo de nubes y otras superficies (Sood et al., 2020). Bousbaa et al. (2024) utilizaron teledetección con imágenes de Sentinel-2 y MODIS para ajustar el umbral de NDSI en zonas montañosas del sur del Mediterráneo, encontrando que el umbral local de 0.2 era preciso sobre el global de 0.4. Poussin et al. (2023) también estudiaron el NDSI en Suiza, donde observaron que el umbral global de 0.4 no siempre era el más adecuado, ya que subestimaba la extensión de la nieve y los umbrales óptimos variaban espacialmente.

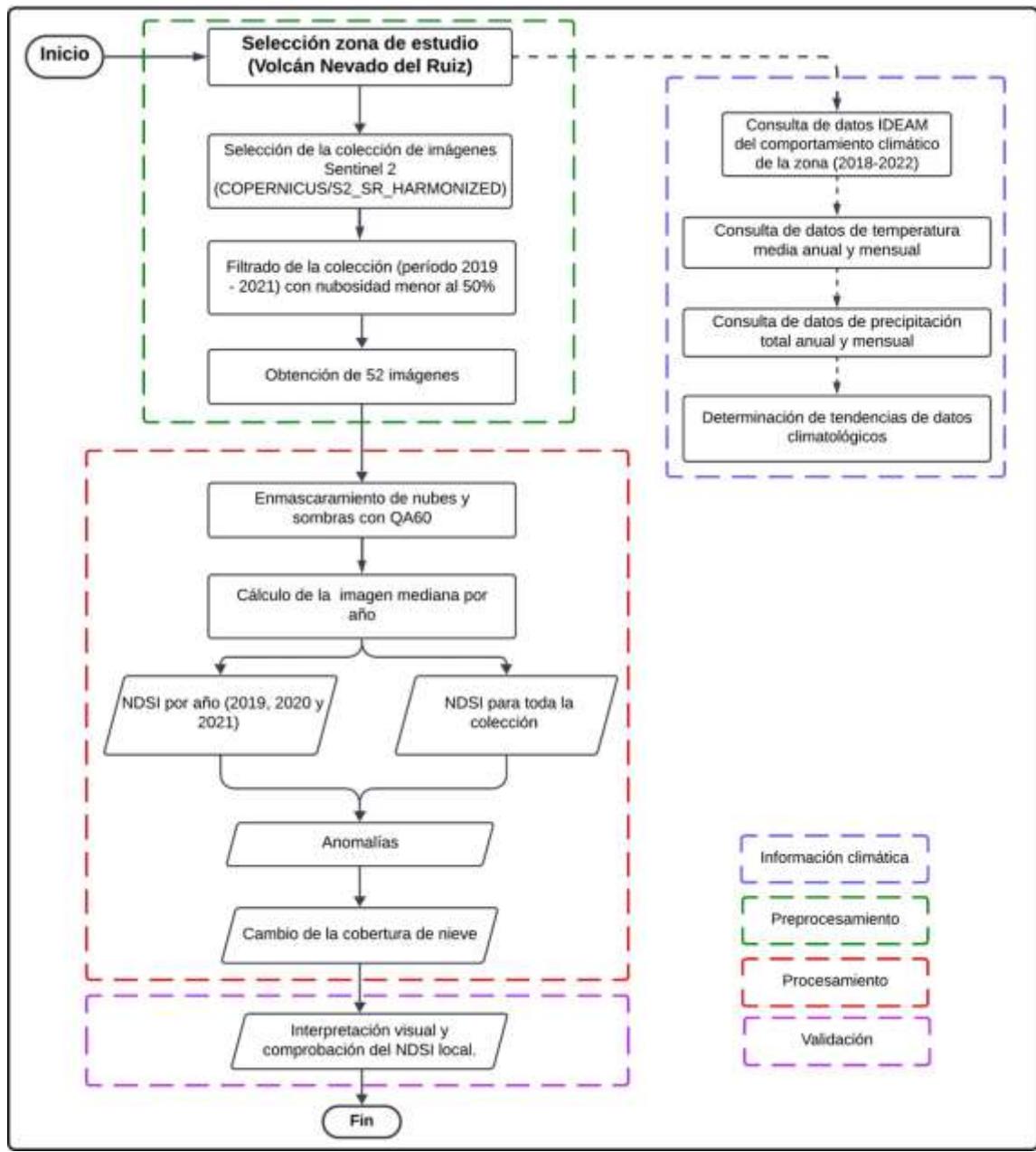
A pesar de los avances en el uso de índices como el NDSI para el monitoreo de glaciares en distintas regiones del mundo, en el contexto colombiano existe un vacío de investigación a partir del año 2016 en la aplicación de estas herramientas para evaluar de manera multitemporal los cambios en la cobertura de nieve de los nevados, particularmente en el Nevado del Ruiz. Aunque estudios previos han estimado la pérdida de nieve a largo plazo utilizando imágenes de Landsat, como el trabajo de Salas-Pérez et al. (2017), no se ha explorado con suficiente detalle el comportamiento anual de la capa de nieve ni se han evaluado las anomalías mediante umbrales locales del NDSI ajustados a las condiciones específicas de este glaciar. Este vacío de conocimiento limita la capacidad de comprender la dinámica interanual de la capa de nieve y su relación con factores climáticos como la temperatura y la precipitación, lo cual es fundamental para la gestión de recursos hídricos y la planificación ambiental. Este estudio busca llenar este vacío mediante el análisis multitemporal de la cobertura de nieve del Nevado del Ruiz entre 2018 y 2021, utilizando imágenes de Sentinel2 y el Índice Normalizado de Diferencia de Nieve (NDSI) para calcular y analizar las anomalías en la capa de nieve, con el fin de mejorar el monitoreo de la dinámica glaciar en respuesta a los cambios climáticos.

2. Materiales y métodos

En este estudio, se implementó una metodología sistemática (Figura 1) que combina técnicas de análisis multitemporal, procesamiento de imágenes y análisis de datos climáticos para evaluar los cambios en la cobertura de nieve del Volcán Nevado del Ruiz. La metodología se desarrolló en tres etapas principales: pre-procesamiento, procesamiento y validación de datos.

Figura 1.

Diagrama de flujo del proceso de estudio de la cobertura de nieve del Volcán Nevado del Ruiz por medio del análisis de anomalías y datos climáticos.



2.1. Área de Estudio

El estudio se lleva a cabo en el Volcán Nevado del Ruiz (Figura 2), un volcán activo ubicado en la Cordillera Central de los Andes colombianos. Tiene una altitud de 5,321 metros sobre el nivel del mar, y es reconocido por su importancia geológica, climática y ambiental Servicio Geológico Colombiano (2020). Se encuentra en la intersección de los departamentos de Caldas y Tolima, y es fuente de varios ríos significativos como el Gualí, Lagunilla y Recio.

El área de análisis comprende las coordenadas geográficas delimitadas por el sistema de referencia WGS84, abarcando un rango entre 4.9515°N y -75.2487°W. Esta zona es representativa de los glaciares tropicales en los Andes, los cuales son especialmente sensibles a los cambios climáticos, convirtiéndose en un lugar clave para estudiar la dinámica de cobertura de nieve y los impactos ambientales relacionados.

Figura 2.
Área de estudio

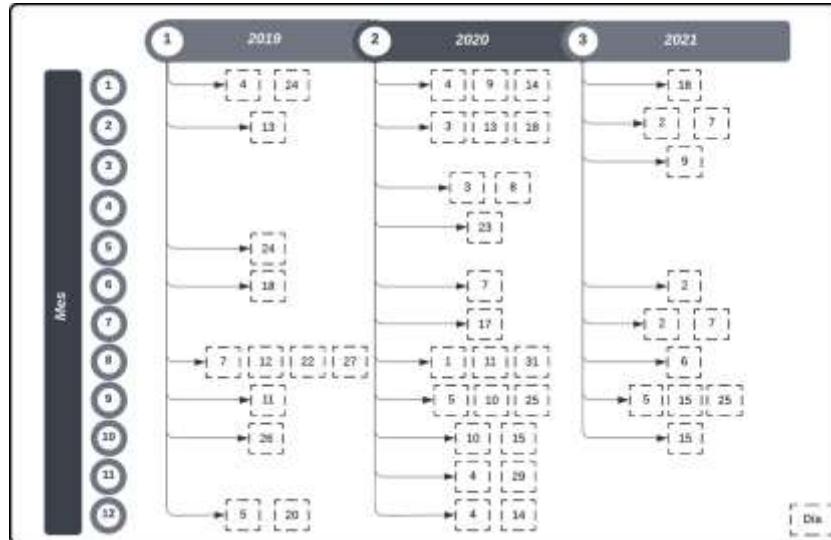


2.2. Preprocesamiento de datos

Para este estudio se empleó la plataforma Google Earth Engine (GEE) para acceder y analizar las colecciones de imágenes Sentinel-2 disponibles. Se utilizó la colección COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED, que contiene imágenes procesadas al nivel 2A. Este nivel incluye correcciones atmosféricas absolutas para obtener reflectancias de superficie y una máscara de nubes generada automáticamente. Se identificó un total de 49 imágenes para el área de estudio, cubriendo un período temporal desde enero de 2019 a octubre de 2021 (Figura 3).

Figura 3.

Distribución mensual de imágenes disponibles por año en la colección COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED de Sentinel-2 en Google EarthEngine, cobertura de nubes menor al 50%. Los valores dentro de cada cuadro indican el número de imágenes disponibles por mes.



Se aplicó un filtro de cobertura de nubes del 50%, utilizando la banda QA60 de la colección, la cual proporciona información sobre la calidad de los píxeles. Los bits 10 y 11 de esta banda se emplearon para identificar sombras de nubes y nubes, respectivamente. Con esta información, se generó una máscara binaria que asigna el valor de 0 a los píxeles afectados por nubes o sombras (excluidos del análisis) y el valor de 1 a los píxeles sin interferencias, que fueron procesados.

Los datos de precipitación total anual y mensual, así como de temperatura media, fueron obtenidos de la estación meteorológica Las Brisas - AUT [26155150], ubicada en Manizales a aproximadamente 30 km del área de estudio. Esta estación es la más cercana al Volcán Nevado del Ruiz y permanece activa, lo que garantiza la continuidad de los registros. Los datos, correspondientes al período

del 01-01-2018 al 01-01-2022, fueron descargados de la plataforma 'Consulta y Descarga de Datos Hidrometeorológicos' del IDEAM. Esta información complementó el análisis de las imágenes satelitales, permitiendo establecer una posible relación entre los cambios en la cobertura de nieve con las condiciones climáticas observadas.

2.3. Procesamiento de datos

Una vez que las imágenes fueron filtradas y enmascaradas, se construyó una mosaico a partir de la estimación de la mediana de las imágenes de todo el periodo, y también se estimó la mediana de cada año.

Posteriormente, se calculó el Índice Normalizado de Diferencia de Nieve (NDSI) para la mediana total y las medianas anuales a partir de la fórmula (1):

$$NDSI = \frac{\rho_{Green} - \rho_{SWIR}}{\rho_{Green} + \rho_{SWIR}} \quad (1)$$

Se establecieron dos rangos con diferentes umbrales para clasificar el comportamiento del índice NDSI, como se presenta en la Tabla 1. Los umbrales seleccionados se basaron en estudios previos realizados por Bousbaa et al. (2024) y Poussin et al. (2023), quienes sugirieron valores adaptados a las condiciones específicas de glaciares en diferentes regiones del mundo.

Tabla 1.

Rango de umbrales para la clasificación del NDSI

Umbral 0.2		Umbral 0.4	
Rango	Descripción	Rango	Descripción
-0.1 -> 0.2	No nieve	-0.1 -> 0.4	No nieve
0.2 -> 1.0	Nieve	0.4 -> 1.0	Nieve

Para identificar las anomalías de la presencia de nieve dentro del período de estudio, se calculó previamente la diferencia entre el NDSI mediana total (2019-2021) y el NDSI mediana anual y se aplicó la fórmula (2). Este cálculo generó una imagen de anomalías, representando las variaciones de la cobertura de nieve respecto a la mediana general.

$$\text{Anomalía} = \text{med_anual}(NDSI) - \text{med_anual_total}(NDSI) \quad (2)$$

Donde,

med_anual(NDSI) : Valor de la mediana del NDSI por año med anual total
(NDSI): Valor de la mediana del NDSI de toda la serie temporal

Para el análisis, se consideró que las anomalías positivas indican un aumento en la cobertura de nieve respecto a la mediana de toda la serie temporal, mientras que las anomalías negativas representan una disminución. Se generaron histogramas para identificar la distribución de los valores del índice NDSI y de las anomalías en las imágenes procesadas.

2.4. Validación de datos

La validación de la clasificación de cobertura de nieve utilizando los umbrales de 0.2 y 0.4 del NDSI, y se llevó a cabo mediante interpretación visual apoyado en imágenes satelitales PlanetScope, las cuales cuentan con una resolución espacial de 4.7 metros. Este proceso buscó evaluar la capacidad de los umbrales seleccionados para distinguir entre zonas con y sin nieve en el área de estudio.

Para garantizar la representatividad de los datos, se seleccionaron 39 puntos de validación de manera aleatoria dentro de la región analizada. En cada uno de estos sitios, las autoras realizaron una verificación visual detallada para determinar si los píxeles correspondían a áreas con o sin nieve. Este procedimiento permitió evaluar la eficacia de los umbrales propuestos mediante una comparación cualitativa entre las clasificaciones automáticas generadas a partir del NDSI y las observaciones realizadas sobre las imágenes PlanetScope. El proceso de validación se diseñó para determinar el umbral del NDSI adecuado para la zona de estudio.

Las evaluación del umbral más confiable para la discriminación de coberturas de nieve se llevó a cabo por medio de métricas derivadas de las matrices de confusión.

3. Resultados

Los resultados del presente estudio incluyen la evaluación de la exactitud de los umbrales seleccionados para estimar el índice NDSI, la identificación de patrones de cobertura de nieve en el período analizado y las anomalías observadas respecto a la mediana anual total. Estos resultados proporcionan una base sólida para interpretar los cambios en la dinámica de la nieve en el Volcán Nevado del Ruiz y sus posibles implicaciones ambientales.

3.1. Análisis Climático y NDSI

El análisis de temperatura y precipitación realizado sobre los datos de la estación meteorológica Las Brisas - AUT [26155150], evidenció una marcada estacionalidad en las precipitaciones con picos en abril y octubre entre 2018 y 2021 (Figura 4A). Estos picos se asocian a las temporadas de lluvias bimodales características de la región andina. En 2019 se registraron valores anómalamente bajos, sugiriendo un posible déficit hídrico en el área de estudio. Los años 2018 y 2021 tuvieron los mayores acumulados de precipitación (Figura 4B), mientras que 2019 mostró el nivel más bajo. Esto explica en parte la menor cobertura de nieve observada en 2019.

Se observa que las temperaturas medias mensuales tienden a mantenerse relativamente estables a lo largo del año, con pequeñas fluctuaciones estacionales (Figura 4C). Sin embargo, las temperaturas en 2021 parecen ser más bajas en comparación con los otros años, lo que podría indicar un enfriamiento relativo durante ese período. Respecto a la temperatura media anual, se puede observar una tendencia decreciente a lo largo de los años (Figura 4D), comenzando cerca de los 18 °C en 2018 y descendiendo a aproximadamente 15 °C en 2021, lo que sugiere una disminución continua de las temperaturas en este periodo.

Figura 4.

Variación Temporal del 2018 al 2021 de la precipitación A) total mensual y B) total anual y de la temperatura media C) mensual y D) anual de la estación climatológica las Brisas.

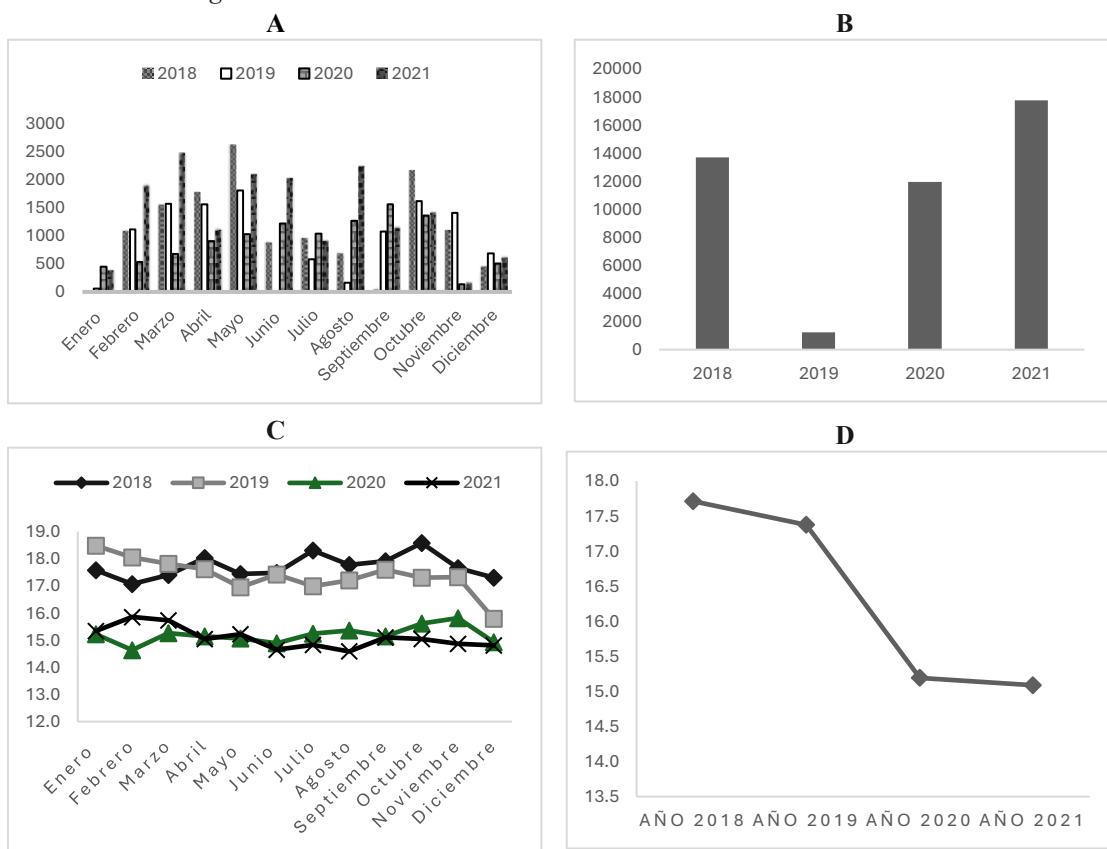
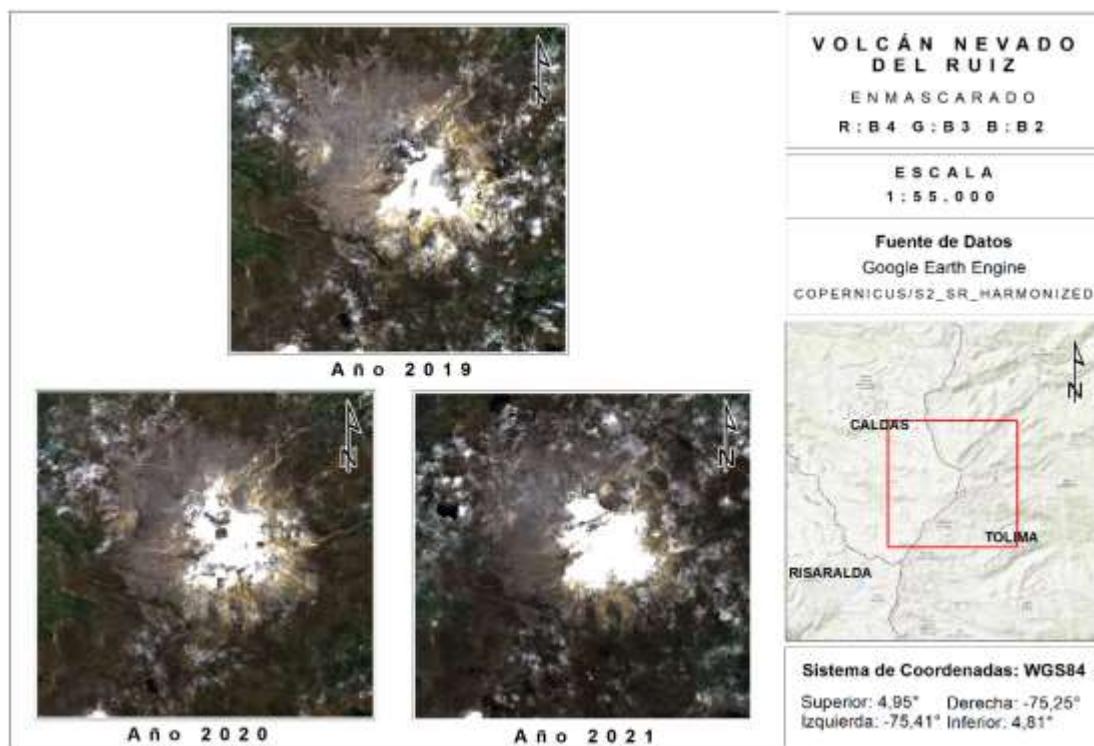


Figura 5.

Imagen mediana por año enmascarada en color natural con stretch desviación estándar en base 2.5



Los resultados muestran un declive potencial en el tamaño del glaciar, en línea con la tendencia histórica de derretimiento en los Andes tropicales.

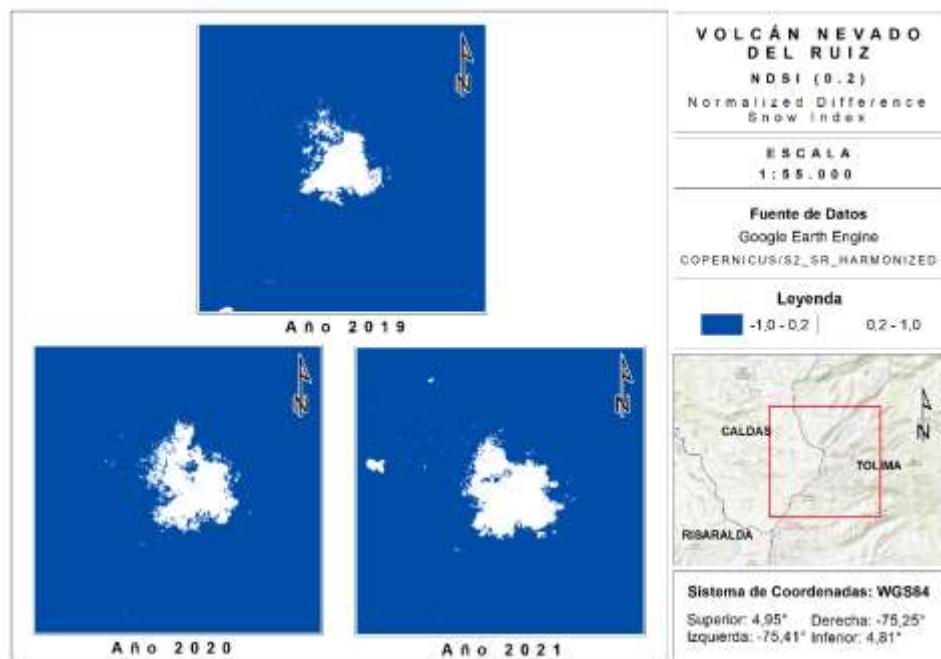
En 2020 se observa una mayor área de nieve en la cima del volcán en comparación con 2019, con un área blanca más prominente, parece haber recuperado algo de área en la cima. Esto podría deberse a condiciones climáticas específicas, como inviernos más fríos o períodos de mayor precipitación en forma de nieve. Las áreas verdes alrededor del volcán parecen haberse expandido ligeramente, lo que sugiere mayor vegetación en las zonas más bajas.

En 2021 el área cubierta por nieve es aún mayor que en los años anteriores, destacándose significativamente, lo que podría estar relacionado con condiciones climáticas favorables para la acumulación de nieve o hielo en el glaciar. Sin embargo, es importante considerar que esto podría ser un fenómeno temporal y no necesariamente indicar una reversión en la tendencia de derretimiento glacial a largo plazo. Las áreas marrones y verdes alrededor son similares a las observadas en los años anteriores, pero con un aumento en la extensión del área blanca en la cima.

A partir del NDSI con umbral de 0,2, ver Figura 6, se pudo observar que, en 2019 el Nevado del Ruiz presentó una cobertura amplia de nieve, indicando condiciones relativamente estables. En 2020, la extensión de nieve fue mayor, especialmente en las áreas superiores del glaciar, lo que sugiere una recuperación parcial debido a un posible incremento en las precipitaciones. En 2021, se registró la mayor extensión de nieve del período analizado, mostrando una cobertura más uniforme en la cima del volcán.

Figura 6.

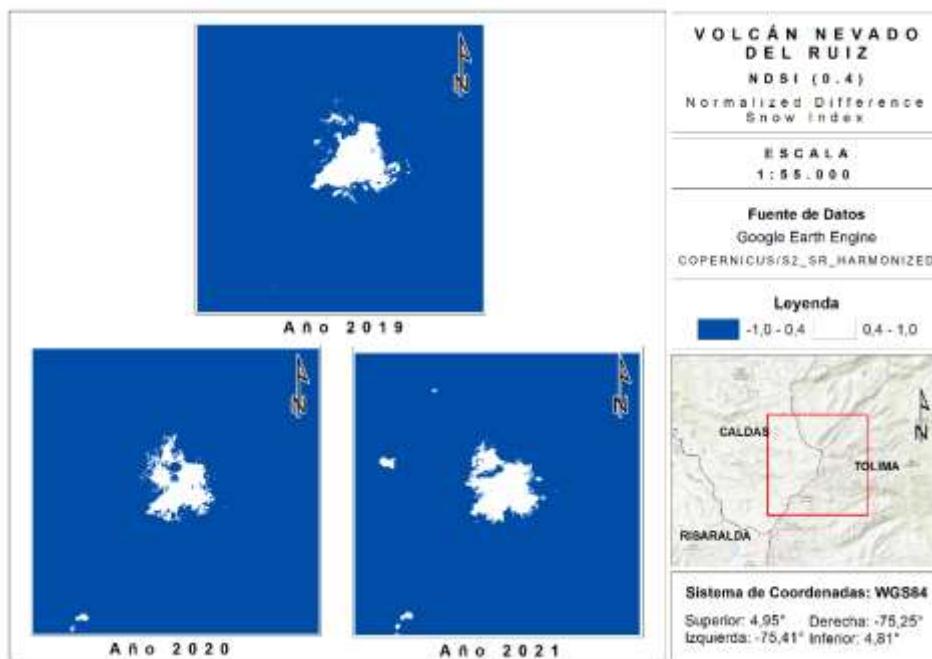
Índice Diferencial Normalizado de Nieve (0.2) para la imagen mediana de cada año



A su vez, en el umbral de 0,4 (Figura 7), se observa que, en 2019 el área cubierta por nieve densa o pura se concentró en las partes centrales y protegidas del glaciar. En 2020, estas áreas se fragmentaron ligeramente, pero se vio una recuperación significativa respecto a años anteriores. En 2021, la cobertura de nieve densa se incrementó notablemente, reflejando una mejora sustancial en las condiciones glaciales.

Figura 7.

Índice Diferencial Normalizado de Nieve (0.4) para la imagen mediana de cada año



Los histogramas reflejan cambios en la distribución de valores del NDSI. Respecto al año 2019, ver Figura 8A, para el umbral de 0,2, ver Figura 8C, el 3,03% del área total (4.491 km^2) fue clasificado como nieve. La mayoría de los píxeles (96,97%) presentaron valores menores a 0,2, reflejando condiciones de nieve menos compacta o la ausencia de nieve en grandes áreas. En este año el, con el umbral de 0,4, solo el 2,31% del área total (3.423 km^2) fue clasificado como nieve densa (Figura 8B). Esto muestra que este umbral es más restrictivo, capturando principalmente nieve pura en las áreas centrales y protegidas del glaciar. En el año 2020, el área clasificada

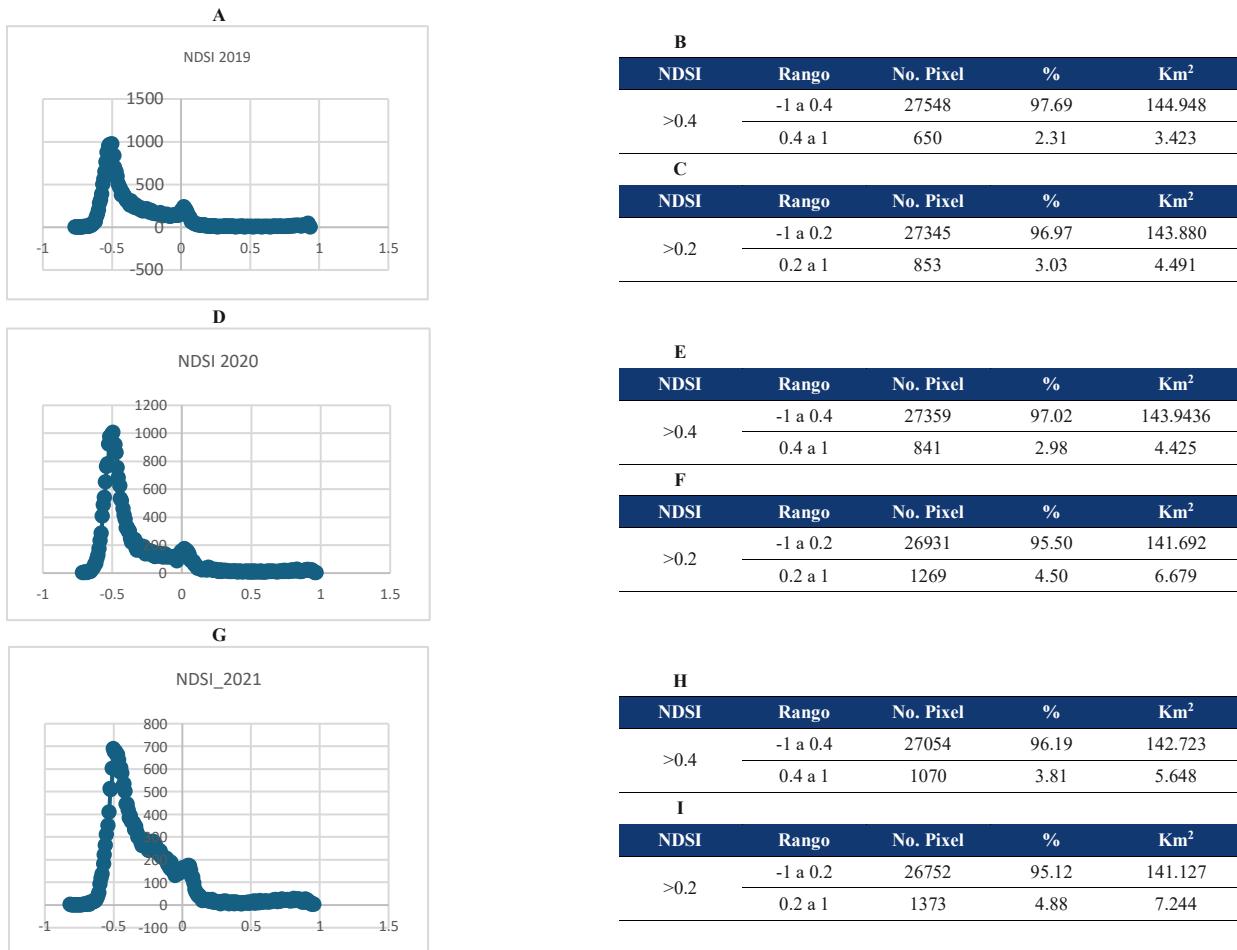
como nieve aumentó al 4,50% (6,679 km²) usando el umbral de 0,2 (Figura 8F, Figura 8D). Esto indica una recuperación significativa en comparación con 2019, posiblemente debido a un incremento en las precipitaciones en forma de nieve.

Al usar el umbral de 0,4, el área cubierta por nieve se incrementó alcanzando un 2,98%, que equivale a 4,425 km² (Figura 8E). Aunque el aumento es menos marcado que con el umbral de 0,2, todavía refleja una mejora notable en las condiciones glaciales. La mayoría del área (97.02% con umbral de 0,4) aún presentó valores bajos de NDSI, indicando que la recuperación fue parcial y limitada a ciertas zonas del glaciar.

Para el año 2021 y en el umbral de 0,2 (Figura 8G, Figura 8I), el área clasificada como nieve fue la más alta del período, alcanzando el 4,88% del total (7.244 km²). Este aumento sugiere una mejora sustancial en la cobertura glaciar, probablemente asociada con temperaturas más bajas y un incremento en las precipitaciones durante este año. Para el umbral de 0,4 (Figura 8H), el área cubierta por nieve aumentó al 3,81% (5,648 km²). Este incremento en comparación con años anteriores indica una acumulación significativa de nieve densa y compacta, probablemente resultado de condiciones climáticas favorables. En este año, la mayoría del área analizada (96.19% para el umbral de 0,4) mostró valores bajos de NDSI, reflejando que, aunque hubo una mejora, las zonas con nieve densa siguen siendo limitadas en proporción al área total.

Figura 8.

Histogramas del Índice Diferencial Normalizado de Nieve (NDSI) para el Nevado del Ruiz. A) Año 2019, B) área de presencia de nieve en el índice 0.4, C) área de presencia de nieve en el índice 0.2, D) Año 2020, E) área de presencia de nieve en el índice 0.4, F) área de presencia de nieve en el índice 0.2, G) Año 2021, H) área de presencia de nieve en el índice 0.4, I) área de presencia de nieve en el índice 0.2

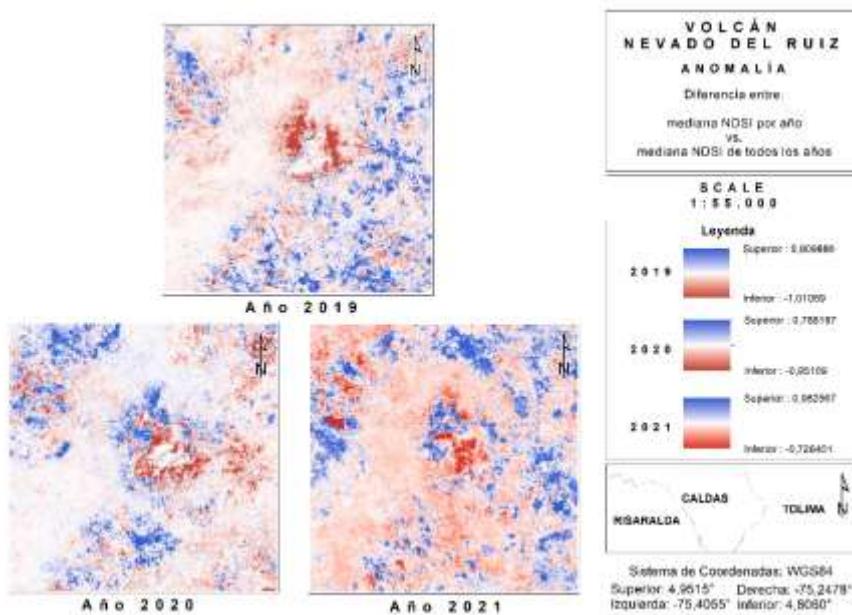


3.2. Anomalías

Los mapas de anomalías de NDSI generados, representan las diferencias en la cobertura de nieve respecto al comportamiento promedio del período. Las anomalías fueron clasificadas como positivas, negativas o neutras, según el valor resultante (Figura 9).

Figura 9.

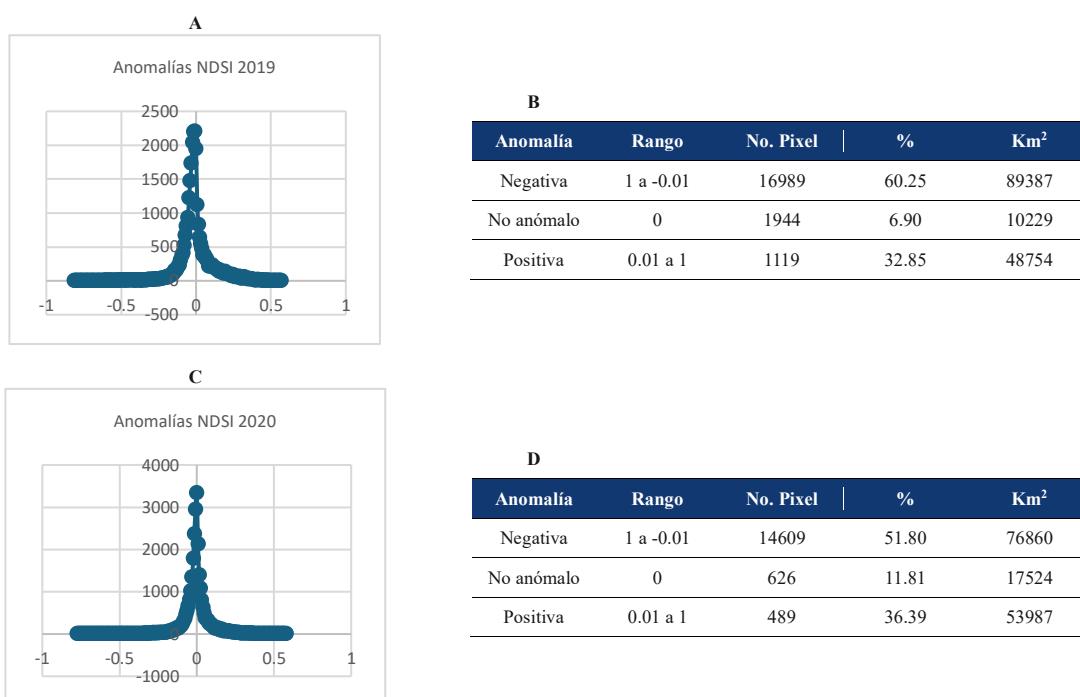
Anomalía del cálculo del Índice Diferencial Normalizado de Nieve para la imagen mediana de cada año

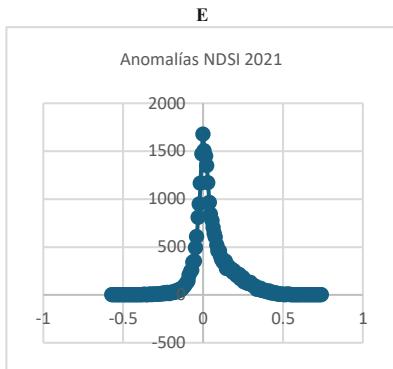


Los histogramas de las anomalías (Figura 10), evidencian que, en 2019, el 60,25 % del área analizada presentó anomalías negativas, mientras que el 32,86 % mostró anomalías positivas. En 2020, la proporción de anomalías negativas disminuyó al 51,80 %, y las positivas aumentaron al 36,39 %, con un 11,81 % del área sin anomalía. Para 2021, las anomalías negativas se redujeron aún más, alcanzando el 28,65 %, mientras que las positivas aumentaron al 65,39 %. Estos resultados evidencian un cambio progresivo en la distribución de las anomalías a lo largo del periodo analizado, con una disminución sostenida de zonas con pérdida de nieve y un aumento en aquellas con acumulación, lo cual podría estar relacionado con condiciones climáticas más favorables registradas en 2021.

Figura 10.

Histogramas de Anomalías del Índice Diferencial Normalizado de Nieve (NDSI) para el Volcán Nevado del Ruiz. A) Año 2019, B) área de presencia de anomalías, C) Año 2020, D) área de presencia de anomalías, E) Año 2021 F) área de presencia de anomalías.





F

Anomalía	Rango	No. Pixel	%	Km ²
Negativa	1 a -0.01	8059	28.65	42511
No anómalo	0	169	5.95	8843
Positiva	0.01 a 1	179	65.39	97017

3.2. Evaluación de la exactitud temática

Como resultado del análisis de la matriz de confusión par el umbral NDSI de 0.2 (Tabla 2), se evidencia una alta capacidad de detección de las áreas con nieve, incluyendo aquellas con menor densidad o nieve más dispersa. Sin embargo, esto también resulta en una mayor tasa de falsos positivos, clasificando algunas áreas sin nieve como si la tuvieran. Respecto a la especificidad, fue menor en comparación con el umbral de 0.4, lo que implica que algunas áreas clasificadas como nieve podrían incluir zonas incorrectas. A su vez, este umbral puede sobreestimar la extensión de la nieve, lo que limita su utilidad para aplicaciones que requieren alta precisión en áreas densas de nieve. En la tasa de falsos positivos, se puede observar que es más alta que en el umbral 0.4 (tabla 3), lo que sugiere que clasifica erróneamente áreas con valores bajos de NDSI como nieve.

Tabla 2.

Matriz de confusión para el umbral de 0.2 del NDSI

	Positivo	Negativo		
Positivo	12	10	0.5	Sensibilidad (recall)
Negativo	2	15	0.9	Especificidad
	0.9	0.6	0.7	Exactitud
Precisión	Valor negativo predicho	Exactitud		

0,67	67%	Puntuación F1 (F1 Score)
0,12	12%	Tasa de Falsos Positivos (FPR False Positive Rate)

Se encontró que el umbral NDSI de 0,4 detectó con mayor exactitud las áreas con nieve densa y pura (Tabla 3). Si bien puede subestimar la cobertura total de nieve al eliminar áreas con valores bajos de NDSI, esta característica reduce la inclusión de falsos positivos. La especificidad es significativamente mayor que la del umbral de 0.2. Esto implica que las áreas clasificadas como nieve bajo este umbral tienen una alta probabilidad de corresponder realmente a nieve pura. Respecto a la precisión general, este ofrece una clasificación más confiable, especialmente en aplicaciones donde se requiere diferenciar entre nieve pura y otras superficies. Y presenta una tasa de falsos positivos menor que en el umbral de 0.2, lo que demuestra que este umbral es más efectivo en minimizar errores de clasificación.

Tabla 3.

Matriz de confusión para el umbral de 0.4 del NDSI

	Positivo	Negativo			
Positivo	11	11	0,5	Sensibilidad (recall)	
Negativo	1	16	0.9	Especificidad	

0,85	85%	Puntuación F1 (F1 Score)
0,06	6%	Tasa de Falsos Positivos (FPR False Positive Rate)

	0.9	0.6	0.7	Exactitud	
Precisión	Valor negativo predicho	Exactitud			

El análisis de la cobertura de nieve del Nevado del Ruiz entre 2019 y 2021, utilizando el Índice Diferencial Normalizado de Nieve (NDSI), permite observar patrones que concuerdan con estudios previos sobre la dinámica de los glaciares tropicales y la influencia de las condiciones climáticas. Este estudio identificó un incremento en la cobertura de nieve en 2020 y 2021, en contraste con la disminución observada en 2019, esto último refuerza las conclusiones del IPCC (2022), que señala cómo el calentamiento global ha exacerbado el retroceso de los glaciares tropicales, afectando la disponibilidad de recursos hídricos en regiones dependientes. Este patrón es consistente con las conclusiones de Salas-Pérez et al. (2017), quienes analizaron datos de Landsat entre 1999 y 2016, concluyendo que la dinámica glaciar está fuertemente influenciada por la variabilidad climática interanual. Mientras Salas-Pérez et al. proyectaron una posible pérdida total del glaciar del Nevado del Ruiz para 2027, los resultados actuales sugieren que eventos climáticos puntuales, como enfriamientos y aumentos de precipitación, pueden ralentizar temporalmente esta tendencia.

Respecto a los umbrales del NDSI utilizados (0.2 y 0.4) mostraron diferencias significativas en la clasificación de áreas con nieve, el umbral de 0.2, más inclusivo, capturó una mayor extensión de nieve, incluyendo zonas con menor densidad. Mientras que el umbral de 0.4, más conservador, fue más efectivo para identificar áreas con nieve compacta. Este hallazgo está alineado con lo reportado por Bousbaa et al. (2024), quienes utilizaron teledetección en el sur del Mediterráneo y ajustaron el umbral del NDSI a las condiciones locales, destacando la importancia de adaptar los umbrales a las características específicas del glaciar. Poussin et al. (2023), también destacaron que los umbrales óptimos de NDSI pueden variar según las condiciones geográficas y climáticas, señalando que el valor global de 0.4 puede subestimar la extensión de la nieve en ciertos contextos, como el Nevado del Ruiz.

Los histogramas de anomalías revelaron que las áreas con anomalías negativas disminuyeron drásticamente entre 2019 (60.25%) y 2021 (28.65%), mientras que las anomalías positivas aumentaron significativamente (de 32.85% en 2019 a 65.39% en 2021). Este resultado es coherente con lo observado por Rathore et al. (2018) en glaciares de los Himalayas, donde las anomalías positivas estuvieron correlacionadas con incrementos en la precipitación sólida y descensos en la temperatura.

Las variaciones en temperatura y precipitación detectadas en este estudio refuerzan la conexión entre los eventos climáticos y las dinámicas glaciares. En particular, los resultados coinciden con Sharma et al. (2014), quienes subrayaron que los picos en la precipitación y descensos en la temperatura suelen traducirse en mayores acumulaciones de nieve. En el contexto colombiano, los datos climáticos de la estación de las brisas mostraron un enfriamiento continuo entre 2018 y 2021, lo que pudo haber favorecido la acumulación de nieve observada en 2020 y 2021.

A diferencia de investigaciones anteriores que utilizaron Landsat (Salas-Pérez et al., 2017), este estudio empleó imágenes de Sentinel-2 con una resolución espacial más alta (10 m), lo que permitió un análisis más detallado de las dinámicas interanuales. Sin embargo, al igual que estudios previos, este trabajo también enfrentó desafíos relacionados con la validación visual y la dependencia de parámetros estáticos (umbrales de NDSI) que pueden no capturar toda la complejidad de la dinámica glaciar.

Conclusiones

Los resultados indican que el Índice Diferencial Normalizado de Nieve (NDSI) constituye un indicador confiable para la detección y el seguimiento de cambios en la cobertura nival de glaciares tropicales. La expansión registrada en 2021 sugiere una atenuación temporal de los efectos hidrológicos adversos asociados al deshielo; sin embargo, la trayectoria de retroceso glaciar identificada en series de mayor extensión temporal continúa siendo motivo de preocupación. Las similitudes con patrones observados en cordilleras como los Himalayas y los Alpes refuerzan la hipótesis de que la dinámica de los glaciares tropicales responde a la variabilidad climática global más que a procesos estrictamente locales.

Se evidencia la necesidad de aplicar umbrales del NDSI ajustables de forma dinámica que consideren la estacionalidad y las particularidades espetrales del Nevado del Ruiz. Integrar estos productos con modelos climáticos regionales permitiría anticipar la evolución de la cobertura nival frente a distintos escenarios de temperatura y precipitación. A su vez, ampliar la serie de observaciones a escalas decadales, incorporando imágenes de archivo de sensores históricos, aportaría contexto para discriminar fluctuaciones interanuales de tendencias de largo plazo.

Finalmente, la presencia de actividad fumarólica documentada en el volcán podría constituir un factor de modulación local de la reflectancia y, por ende, de la clasificación de nieve. Incluir variables volcánicas en estudios posteriores facilitará una interpretación

más completa de la respuesta glaciar ante el forzamiento climático y volcánico, y mejorará la evaluación de los posibles impactos sobre los recursos hídricos regionales.

Referencias

1. Adumor. (2019, November 20). Actividad fumarólica - Red Nacional de Vigilancia Volcánica. Red Nacional De Vigilancia Volcánica. <https://rnvv.sernageomin.cl/faq-items/actividad-fumarolica/>
2. Bousbaa, M., Boudhar, A., Kinnard, C., Elyoussfi, H., Karaoui, I., Eljabiri, Y., Bouamri, H., & Chehbouni, A. (2024). An accurate snow cover product for the Moroccan Atlas Mountains: Optimization of the MODIS NDSI index threshold and development of snow fraction estimation models. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 129, 103851. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2024.103851>
3. Hall, D. K., Riggs, G. A., Salomonson, V. V., DiGirolamo, N. E., & Bayr, K. J. (2002). MODIS snow-cover products. Remote Sensing Of Environment, 83(1-2), 181-194.
4. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (sf). Glaciares . Sistema de Información Ambiental de Colombia (SIAC). Recuperado el 10 de diciembre de 2024, de <http://www.siac.gov.co/glaciares>
5. IDEAM. (2020). Plan Integral de Gestión del Cambio Climático. Conceptos básicos sobre cambio climático. IDEAM. (2012). Glaciares de Colombia: Más que montañas con hielo. Bogotá: IDEAM
6. IPCC. (2022). Global Warming of 1.5°C. In Global Warming of 1.5°C. Cambridge University Press.
7. Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., & Chipman, J. W. (2015). Remote Sensing and Image Interpretation (7th ed.). Wiley.
8. Paz Aedo, María., Montecinos, Teresa., & Gráfica Andes). (2011). Glaciares andinos : recursos hídricos y cambio climático : desafío para la justicia climática en el Cono Sur. Programa Chile Sustentable.
9. Poussin, C., Timoner, P., Chatenoux, B., Giuliani, G., & Peduzzi, P. (2023). Improved Landsat-based snow cover mapping accuracy using a spatiotemporal NDSI and generalized linear mixed model. Scienceof Remote Sensing, 7, 100078.
10. Rathore, B. P., Bahuguna, I. M., Singh, S. K., Brahmabhatt, R. M., Randhawa, S. S., Jani, P., Yadav, S. K. S., & Rajawat, A. S. (2018). Trends of snow cover in Western and West-Central Himalayas during 2004-2014 (Vol. 114, Issue 4).
11. Salas Pérez, C., Karol, &, & Duarte Gómez, D. (2017). Revista de Topografía Azimut Análisis del retroceso glaciar del volcán nevado del Ruiz, mediante un estudio multitemporal de imágenes satelitales del periodo.
12. Salas-Pérez, C., Salazar-Bejarano, E.G. Meza-Alcarcel, J.C., Coy-Castro, D.F. & Upegui, E.S. (2019). Análisis histórico del retroceso glaciar en el nevado del Ruiz considerando el fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur. UD y la geomática, (14), 4153.
13. Sood, V., Singh, S., Taloor, A. K., Prashar, S., & Kaur, R. (2020). Monitoring and mapping of snow cover variability using topographically derived NDSI model over north Indian Himalayas during the period 2008–19. Applied Computing and Geosciences, 8, 100040.
14. Sharma, V., Mishra, V. D., & Joshi, P. K. (2014). Topographic controls on spatio-temporal snow cover distribution in Northwest Himalaya. International Journal Of Remote Sensing, 35(9), 3036-3056.
15. Shen, M., Piao, S., Cong, N., Zhang, G., & Jiang, L. (2015). Satellite-derived data reveal severe decrease in the productivity of a subalpine meadow in the decade following a devastating earthquake. Remote Sensing of Environment, 163, 138-145.
16. Servicio Geológico Colombiano (2020). Generalidades Volcán Nevado del Ruiz. (s. f.).