



**Análisis multitemporal del retroceso glaciar del Nevado del Tolima, en el
Periodo Comprendido 2016 - 2024**

César Mauricio Pinilla Sánchez
Gerardo Esteban Moreno Hernández
Gabriel Alexis Santa Ramírez
Martha Catalina Mayorga Guzmán

Trabajo de grado presentado para optar al título de Especialista en Sistemas de Información
Geográfica

Asesora: Ana María Giraldo Patiño

Universidad de Manizales
Facultad de Ciencias e Ingeniería
Especialización en Sistemas de Información Geográfica - Virtual
Manizales
2026

Cita	(Pinilla et al., 2026)
Referencia	Pinilla, C., Moreno, G., Santa, G., Mayorga, M. (2026). <i>Análisis multitemporal del retroceso glaciar del Nevado del Tolima, en el Periodo Comprendido 2016 - 2024</i> . [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Manizales. RIDUM: Repositorio Institucional Universidad de Manizales.
Estilo APA 7 (2020)	



Especialización en Sistemas de Información Geográfica - Virtual

Declaración de inteligencia artificial: Los autores de este trabajo de grado declaran que han utilizado herramientas de inteligencia artificial (IA), tales como ChatGPT, Turnitin y Gemini, de manera ética y responsable, tal como se establece en el Acuerdo UManizales 002 (julio 26 de 2023) sobre propiedad intelectual e IA. Estas herramientas son empleadas como apoyo en la redacción, revisión gramatical y generación de ideas, pero en ningún caso sustituyen el análisis crítico, la argumentación académica ni la originalidad del trabajo. Asimismo, cualquier contenido generado con asistencia de IA está citado y referenciado adecuadamente, garantizando la integridad académica y el cumplimiento de los principios éticos de la investigación.

Biblioteca y Centro de Recursos: biblioteca.umanizales.edu.co

Repositorio Institucional: ridum.umanizales.edu.co

Universidad de Manizales: umanizales.edu.co

Revistas: revistasum.umanizales.edu.co

Fondo Editorial: editorialum.umanizales.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Manizales ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Tabla de contenido

RESUMEN.....	7
ABSTRACT	8
INTRODUCCIÓN	9
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	11
1.1. Antecedentes	12
2. JUSTIFICACIÓN	13
3. OBJETIVOS	15
3.1. Objetivo general	15
3.2. Objetivos específicos.....	15
4. HIPÓTESIS.....	16
5. MARCO TEÓRICO.....	17
5.1. Criosfera: definición y componentes.....	17
5.2. Retroceso glaciar y monitoreo ambiental.....	17
5.3. Teledetección aplicada al monitoreo glaciar	19
5.4. Índice de Nieve de Diferencia Normalizada (NDSI)	19
5.5. Clasificación supervisada mediante Support Vector Machine (SVM)	20
6. METODOLOGÍA	22
6.1. Enfoque metodológico	23
6.2. Tipo de Estudio	24
6.3. Procedimiento metodológico.....	24
6.3.1. Fase 1: Adquisición y selección de imágenes satelitales	24
6.3.2. Fase 2: Preprocesamiento de imágenes y sistema de coordenadas.	26
6.3.3. Fase 3: Aplicación del Índice de Nieve de Diferencia Normalizada (NDSI)	27
6.3.4. Fase 4: Clasificación supervisada mediante Support Vector Machine (SVM).....	28

6.3.5.	Fase 5: Vectorización y análisis multitemporal	29
6.3.6.	Fase 6. Variables meteorológicas.....	30
7.	RESULTADOS.....	31
7.1.	Cambios en la extensión superficial del glaciar del Nevado del Tolima	33
7.1.1.	Evolución temporal del área glaciar.....	34
7.1.2.	Evolución temporal del perímetro glaciar	35
7.2.	Relación temporal entre el área y el perímetro glaciar.....	36
7.3.	Análisis comparativo multitemporal	37
7.4.	Evolución temporal del perímetro glaciar	39
7.5.	Variables Meteorológicas.....	40
7.5.1.	Temperatura	41
7.5.2.	Precipitación.....	42
8.	DISCUSIÓN	45
9.	CONCLUSIONES	47
10.	RECOMENDACIONES	48
	REFERENCIAS	49

Lista de figuras

Figura 1. Partes de un glaciar	18
Figura 2. Comparación del glaciar del Nevado del Tolima (1935–2020).....	20
Figura 3. Flujograma fases de recolección, sistematización y análisis de la información.	22
Figura 4. Esquema metodológico.....	23
Figura 5. Interfaz Plataforma Copernicus Open Access Hub, descarga de imágenes satelitales...	25
Figura 6. Área de interés en Imagen Sentinel 2, Volcán Nevado del Tolima	27
Figura 7. Clasificación valores.....	28
Figura 8. Clasificación supervisada de cobertura glaciar mediante NDSI y SVM.	31
Figura 9. Evolución de la cobertura glaciar del Nevado del Tolima, periodo 2016–2024	33
Figura 10. Evolución temporal del área glaciar del Nevado del Tolima (2016–2024).	35
Figura 11. Perímetro glaciar del Nevado del Tolima (2016–2024)	36
Figura 12. Relación entre área y perímetro glaciar	37
Figura 13. Cambio porcentual interanual del área glaciar del Nevado del Tolima.....	38
Figura 14. Cambio porcentual interanual del perímetro glaciar del Nevado del Tolima.....	40
Figura 15. Tendencia de la temperatura Nevado del Tolima, periodo 2016 – 2024.	42
Figura 16. Tendencia de la precipitación, Nevado del Tolima, periodo 2016 – 2024.	43

Lista de tablas

Tabla 1. Imágenes Satelitales seleccionadas del Nevado del Tolima, periodo 2016 – 2024.	25
Tabla 2. Resumen de validación de la clasificación supervisada SVM (2016–2024).	32
Tabla 3. Áreas y perímetros del glaciar Nevado del Tolima, periodo 2016 – 2024.	33
Tabla 4. Tasa de cambio anual del área glaciar del Nevado del Tolima (%).	38
Tabla 5. Tasa de cambio anual del perímetro glaciar del Nevado del Tolima (%).	39
Tabla 6. Temperatura anual estimada para el Nevado del Tolima, periodo 2016 – 2024.	41
Tabla 7. Precipitación anual estimada para el Nevado del Tolima, periodo 2016 – 2024.	43

RESUMEN

El presente trabajo de grado analiza los cambios en la extensión superficial del glaciar del Nevado del Tolima durante el periodo 2016–2024 mediante técnicas de teledetección y análisis multitemporal. Para ello, se emplearon imágenes satelitales Sentinel-2 L2A y se aplicó el Índice de Nieve de Diferencia Normalizada (NDSI) como herramienta inicial para la identificación de coberturas de nieve y hielo. Posteriormente, se implementó una clasificación supervisada mediante el algoritmo Support Vector Machine (SVM), complementada con un proceso de validación orientado a mejorar la delimitación de la cobertura glaciar.

Los resultados evidencian una reducción progresiva del área glaciar, pasando de 60,14 ha en 2016 a 43,89 ha en 2024, equivalente a una disminución aproximada del 27 %. De igual forma, el perímetro glaciar presentó variaciones espaciales asociadas a procesos de fragmentación y reducción superficial de la cobertura de hielo. Respecto a las variables climáticas analizadas, se identificó una ligera tendencia al incremento de la temperatura y una variabilidad interanual en la precipitación; sin embargo, su relación con la dinámica glaciar se abordó de manera descriptiva, debido a las limitaciones metodológicas y a la escala temporal de los datos utilizados.

Se concluye que el glaciar del Nevado del Tolima presenta un proceso continuo de retroceso superficial, lo que evidencia la alta sensibilidad de los glaciares tropicales de alta montaña frente a las variaciones climáticas recientes.

Palabras clave: Nevado del Tolima, retroceso glaciar, análisis multitemporal, Sentinel-2, teledetección, clasificación supervisada, Support Vector Machine (SVM), NDSI, cambio climático.

ABSTRACT

This thesis analyzes changes in the surface extent of the Nevado del Tolima glacier during the 2016–2024 period using remote sensing and multitemporal analysis techniques. Sentinel-2 L2A satellite imagery was employed, and the Normalized Difference Snow Index (NDSI) was applied as an initial tool for identifying snow and ice cover. Subsequently, a supervised classification using the Support Vector Machine (SVM) algorithm was implemented and complemented with a validation process to improve glacier cover delimitation.

The results show a progressive reduction in glacier area, decreasing from 60.14 ha in 2016 to 43.89 ha in 2024, representing an approximate loss of 27%. Likewise, the glacier perimeter exhibited spatial variations associated with fragmentation processes and surface reduction of the ice cover. Regarding the climatic variables analyzed, a slight increasing trend in temperature and interannual variability in precipitation were identified; however, their relationship with glacier dynamics was addressed descriptively due to methodological limitations and the temporal scale of the data used.

It is concluded that the Nevado del Tolima glacier is undergoing a continuous process of surface retreat, It is concluded that the Nevado del Tolima glacier is undergoing a continuous process of surface retreat, demonstrating the sensitivity of tropical high-mountain glaciers to recent climatic variations.

Keywords: Nevado del Tolima, glacier retreat, multitemporal analysis, Sentinel-2, remote sensing, supervised classification, Support Vector Machine (SVM), NDSI, climate change.

INTRODUCCIÓN

Durante las últimas décadas, las variaciones climáticas globales han generado transformaciones significativas en los sistemas de alta montaña, especialmente en los componentes asociados a la criosfera. El incremento sostenido de la temperatura media global, junto con las modificaciones en los patrones de precipitación, ha favorecido procesos acelerados de reducción de cobertura nival y retroceso glaciar en diferentes regiones del mundo (IPCC, 2021). Debido a su alta sensibilidad frente a las condiciones atmosféricas, los glaciares constituyen indicadores ambientales relevantes para evaluar los efectos del cambio climático sobre ecosistemas de montaña y recursos hídricos estratégicos (Vuille et al., 2018; Zemp et al., 2019).

En la región tropical andina, estos procesos adquieren una importancia particular debido a las condiciones climáticas y altitudinales que caracterizan a los glaciares de montaña. A diferencia de los glaciares de latitudes medias y altas, los glaciares tropicales presentan una elevada sensibilidad a pequeñas variaciones térmicas y cambios en la dinámica atmosférica, lo que favorece procesos acelerados de reducción superficial y fragmentación glaciar (Kaser et al., 2003; Rabatel et al., 2013). Diversas investigaciones desarrolladas en países andinos como Colombia, Ecuador, Perú y Bolivia han documentado una disminución progresiva de la superficie glaciar durante las últimas décadas, evidenciando una tendencia regional de retroceso en estos ecosistemas de alta montaña (Vuille et al., 2018).

En Colombia, las coberturas permanentes de nieve y hielo se encuentran asociadas principalmente a volcanes y sistemas montañosos de elevada altitud, donde desempeñan funciones relevantes en la regulación hídrica, la conservación de ecosistemas estratégicos y la oferta de servicios ambientales para poblaciones cercanas (IDEAM, 2018). Entre estos sistemas destaca el Nevado del Tolima, ubicado en el Parque Nacional Natural Los Nevados, el cual ha experimentado una reducción progresiva de su cobertura glaciar como consecuencia de las variaciones climáticas registradas en las últimas décadas (IDEAM, 2024). La disminución de estas superficies glaciares representa una problemática ambiental relevante debido a su impacto potencial sobre la disponibilidad hídrica, la dinámica ecosistémica y la estabilidad de ambientes de alta montaña.

El monitoreo de cambios en coberturas glaciares mediante técnicas de teledetección y análisis multitemporal se ha consolidado como una herramienta eficiente para evaluar la evolución espacial y temporal de estos ecosistemas, especialmente en zonas de difícil acceso (Paul et al.,

2013). El uso de imágenes satelitales permite identificar variaciones superficiales de nieve y hielo mediante el análisis de firmas espectrales y técnicas de clasificación digital, facilitando la delimitación de coberturas glaciares y la comparación temporal de su extensión (Hall et al., 1995). Asimismo, la disponibilidad de información multitemporal proveniente de la constelación Sentinel-2 ha fortalecido los procesos de monitoreo ambiental gracias a su resolución espacial y temporal, permitiendo desarrollar estudios orientados a la evaluación de cambios superficiales en ecosistemas de montaña (Drusch et al., 2012).

Entre las metodologías más utilizadas para la identificación de nieve y hielo se encuentra el Índice de Nieve de Diferencia Normalizada (NDSI), el cual permite resaltar coberturas nivales mediante el comportamiento espectral de las bandas del visible e infrarrojo de onda corta (Hall et al., 1995). No obstante, debido a la complejidad espectral presente en ambientes de alta montaña, algunos estudios han complementado el uso de índices espectrales con algoritmos de clasificación supervisada, como Support Vector Machine (SVM), con el propósito de mejorar la delimitación y discriminación de coberturas glaciares frente a otras superficies como roca expuesta, sombras y nieve estacional (Mountrakis et al., 2011).

En este contexto, el presente estudio se enfoca en el análisis de los cambios superficiales del glaciar del Nevado del Tolima durante el periodo 2016–2024 mediante técnicas de teledetección óptica y análisis multitemporal. Para ello, se emplearon imágenes Sentinel-2 L2A, el índice NDSI y una clasificación supervisada mediante el algoritmo SVM, con el propósito de evaluar la evolución espacial del área y perímetro glaciar. Adicionalmente, se incorporó un análisis descriptivo de variables meteorológicas asociadas a temperatura y precipitación, con el fin de contextualizar el comportamiento reciente de la cobertura glaciar. El estudio no aborda estimaciones directas de balance de masa glaciar, sino el análisis de cambios superficiales observables a partir de información satelital.

La investigación busca aportar información actualizada sobre la evolución reciente del glaciar del Nevado del Tolima y contribuir al fortalecimiento de estrategias de monitoreo glaciar en ecosistemas tropicales de alta montaña mediante herramientas geoespaciales y técnicas de análisis multitemporal.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Durante las últimas décadas, las transformaciones asociadas al cambio climático han generado impactos significativos sobre los ecosistemas de alta montaña, particularmente en aquellos relacionados con la criosfera. El incremento sostenido de la temperatura media global, acompañado por alteraciones en los patrones de precipitación, ha favorecido procesos acelerados de reducción de cobertura nival y pérdida de masa de hielo en diferentes regiones del planeta (IPCC, 2021). Estas dinámicas representan una preocupación ambiental debido a las implicaciones hidrológicas, ecológicas y climáticas derivadas de la disminución progresiva de superficies cubiertas por hielo permanente.

En la región tropical andina, la sensibilidad frente a las variaciones atmosféricas es aún mayor debido a las condiciones climáticas particulares bajo las cuales se desarrollan estos ecosistemas. A diferencia de las zonas polares o templadas, las masas de hielo tropicales se encuentran sometidas a un equilibrio energético altamente dependiente de pequeños cambios térmicos, lo que favorece respuestas rápidas frente al aumento de temperatura (Kaser et al., 2003). Como consecuencia, diversos estudios han evidenciado un acelerado retroceso superficial en los sistemas nivales tropicales de Sudamérica durante las últimas décadas (Rabatel et al., 2013).

Colombia alberga algunos de los glaciares tropicales ubicados más al norte de América del Sur, localizados principalmente sobre volcanes y sistemas montañosos de gran altitud en las cordilleras Central y Oriental. Sin embargo, el país ha registrado una reducción progresiva de estas coberturas, asociada tanto al calentamiento atmosférico como a la variabilidad climática regional (IDEAM, 2024). Entre estos sistemas, el Nevado del Tolima representa un caso de especial interés debido a las transformaciones observadas en su cobertura superficial y a la importancia ambiental que posee dentro de los ecosistemas altoandinos.

A pesar de la relevancia ambiental de estos sistemas, aún existen limitaciones relacionadas con el monitoreo continuo y detallado de su dinámica espacial y temporal. Las dificultades de acceso, las condiciones topográficas y las limitaciones operativas en zonas de alta montaña dificultan la implementación de mediciones directas permanentes, lo que ha impulsado el uso de herramientas de observación remota para el seguimiento de cambios superficiales (Paul et al., 2020). En este contexto, la teledetección satelital y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se han consolidado como metodologías fundamentales para evaluar variaciones espaciales en coberturas superficiales mediante análisis multitemporales.

Las imágenes Sentinel-2 ofrecen ventajas importantes para este tipo de investigaciones debido a su resolución espacial, resolución espectral y frecuencia temporal, permitiendo el análisis detallado de superficies cubiertas por nieve y hielo (ESA, 2024). Asimismo, índices espectrales como el Índice de Nieve de Diferencia Normalizada (NDSI) facilitan la identificación de coberturas nivales mediante el análisis de la reflectancia espectral (Hall & Riggs, 2011). No obstante, diversos autores señalan que estos procedimientos pueden presentar limitaciones asociadas a la confusión espectral entre nieve estacional, hielo y otras superficies altamente reflectivas, razón por la cual resulta necesario complementar los análisis mediante técnicas de clasificación supervisada (Paul et al., 2016).

Bajo este contexto, surge la necesidad de evaluar los cambios espaciales presentados en la cobertura superficial del Nevado del Tolima durante el periodo 2016–2024, mediante herramientas de teledetección y análisis multitemporal. Lo anterior permitirá generar información actualizada sobre el comportamiento de este sistema de alta montaña y contribuir al fortalecimiento de estrategias de monitoreo ambiental frente a escenarios asociados al cambio climático.

1.1. Antecedentes

El estudio de las dinámicas superficiales en ecosistemas de alta montaña ha adquirido una creciente relevancia científica debido a la acelerada reducción de coberturas nivales observada en diferentes regiones del planeta. Diversas investigaciones han documentado que las variaciones en temperatura y precipitación constituyen factores determinantes en los procesos de reducción y fragmentación de superficies cubiertas por hielo permanente (Vuille et al., 2018).

A nivel global, los avances en teledetección satelital han permitido fortalecer el monitoreo multitemporal de coberturas nivales mediante el uso de sensores ópticos de mediana y alta resolución. Hall et al. (1995) desarrollaron metodologías basadas en índices espectrales para identificar nieve y hielo utilizando información multiespectral, estableciendo bases metodológicas para posteriores investigaciones relacionadas con monitoreo glaciar. Posteriormente, Hall y Riggs (2011) consolidaron el uso del Índice de Nieve de Diferencia Normalizada (NDSI) como una de las herramientas más empleadas en la delimitación de superficies cubiertas por nieve.

En el contexto andino, Rabatel et al. (2013) realizaron un análisis regional sobre el estado actual de las masas de hielo tropicales en Sudamérica, identificando una tendencia generalizada de reducción superficial en Colombia, Ecuador, Perú y Bolivia. Los autores atribuyen estas dinámicas

principalmente al incremento sostenido de la temperatura atmosférica y a modificaciones en los patrones regionales de precipitación.

En Colombia, los estudios relacionados con monitoreo glaciar han sido liderados principalmente por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), entidad que ha documentado la reducción progresiva de las coberturas nivales presentes en el país (IDEAM, 2018). Estas investigaciones evidencian que los sistemas de alta montaña colombianos presentan una alta vulnerabilidad frente a escenarios de cambio climático, especialmente aquellos asociados a incrementos térmicos regionales.

En relación con el uso de herramientas geoespaciales, Paul et al. (2016) demostraron la utilidad de las imágenes Sentinel-2 para la delimitación de superficies cubiertas por nieve y hielo mediante técnicas de clasificación y análisis espectral. Los autores destacan que la combinación entre índices espectrales y métodos de clasificación supervisada permite mejorar la precisión en la identificación de coberturas superficiales complejas.

Por su parte, investigaciones desarrolladas en Colombia mediante análisis multitemporal han evidenciado la utilidad de los Sistemas de Información Geográfica y la teledetección para evaluar cambios espaciales en ecosistemas de alta montaña (Quintero, 2020). Estos estudios resaltan la importancia de integrar herramientas satelitales en procesos de monitoreo ambiental debido a la limitada disponibilidad de información de campo en zonas de difícil acceso.

En este sentido, el presente trabajo busca aportar al análisis espacial y temporal del Nevado del Tolima mediante el uso de imágenes Sentinel-2, índices espectrales y técnicas de clasificación supervisada, contribuyendo al fortalecimiento de metodologías aplicadas al monitoreo ambiental en ecosistemas de alta montaña.

2. JUSTIFICACIÓN

Los ecosistemas de alta montaña cumplen un papel fundamental en la regulación hídrica, la conservación de la biodiversidad y el equilibrio ambiental de diferentes regiones del planeta. Dentro de estos ecosistemas, las coberturas de nieve y hielo permanente constituyen componentes sensibles frente a las variaciones climáticas, debido a su rápida respuesta ante cambios en la temperatura y la precipitación (IPCC, 2021). En consecuencia, el monitoreo de estos sistemas se ha convertido en una prioridad para comprender los efectos asociados al cambio climático y sus implicaciones ambientales.

En Colombia, los sistemas glaciares han presentado una reducción progresiva de su cobertura superficial durante las últimas décadas, situación que ha sido documentada por IDEAM (2018). Esta disminución representa una preocupación ambiental debido a la importancia que tienen estos ecosistemas en la regulación hídrica y en el funcionamiento de los ambientes de alta montaña.

El Nevado del Tolima constituye uno de los sistemas de nieve y hielo más representativos del país y, al igual que otros ecosistemas similares, ha experimentado transformaciones asociadas a procesos de retroceso y fragmentación superficial. Sin embargo, aún existe una limitada disponibilidad de estudios recientes que permitan evaluar de manera detallada los cambios espaciales ocurridos en este sistema durante los últimos años. Por esta razón, resulta necesario desarrollar investigaciones que contribuyan al análisis y seguimiento de su comportamiento temporal mediante herramientas geoespaciales.

En este contexto, la teledetección y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) representan herramientas fundamentales para el monitoreo ambiental, debido a su capacidad para analizar información espacial proveniente de sensores satelitales en diferentes periodos de tiempo (Paul et al., 2020). El uso de imágenes Sentinel-2 permite identificar cambios en coberturas superficiales con una adecuada resolución espacial y temporal, facilitando el análisis multitemporal de ecosistemas de alta montaña (ESA, 2024).

Asimismo, la aplicación de índices espectrales como el Índice de Nieve de Diferencia Normalizada (NDSI), complementados con técnicas de clasificación supervisada, permite mejorar los procesos de delimitación de superficies cubiertas por nieve y hielo (Hall & Riggs, 2011; Paul et al., 2016). Estas metodologías constituyen alternativas eficientes para el monitoreo ambiental en zonas de difícil acceso, donde las mediciones directas presentan limitaciones operativas y logísticas.

Por lo anterior, el presente estudio busca aportar información actualizada sobre las variaciones espaciales observadas en la cobertura superficial del Nevado del Tolima durante el periodo 2016–2024, contribuyendo al fortalecimiento de procesos de monitoreo ambiental mediante herramientas de teledetección y análisis multitemporal. De igual forma, esta investigación pretende servir como apoyo para futuros estudios relacionados con ecosistemas de alta montaña y dinámicas asociadas al cambio climático en Colombia.

3. OBJETIVOS

3.1.Objetivo general

- Analizar los cambios en la extensión superficial del glaciar del Nevado del Tolima durante el periodo 2016–2024 mediante técnicas de teledetección y análisis multitemporal a partir de imágenes satelitales Sentinel-2.

3.2.Objetivos específicos

- Delimitar la cobertura glaciar del Nevado del Tolima mediante la aplicación del Índice de Nieve de Diferencia Normalizada (NDSI) y clasificación supervisada Support Vector Machine (SVM) sobre imágenes Sentinel-2 L2A.
- Cuantificar y analizar los cambios multitemporales del área y perímetro glaciar del Nevado del Tolima durante el periodo 2016–2024.
- Describir el comportamiento de variables meteorológicas asociadas a temperatura y precipitación en relación con los cambios superficiales observados en el glaciar del Nevado del Tolima.

4. HIPÓTESIS

La cobertura superficial del Nevado del Tolima presentó variaciones espaciales significativas entre 2016 y 2024, evidenciadas mediante técnicas de teledetección y análisis multitemporal, las cuales fueron analizadas en conjunto con variables meteorológicas de manera descriptiva.

5. MARCO TEÓRICO

5.1. Criosfera: definición y componentes

La criosfera comprende el conjunto de componentes del sistema terrestre donde el agua permanece en estado sólido, incluyendo glaciares, nieve estacional, hielo marino y permafrost (IPCC, 2021). Estos sistemas desempeñan funciones importantes en la regulación climática e hidrológica y constituyen indicadores sensibles frente a las variaciones ambientales globales.

Los glaciares corresponden a masas de hielo permanentes formadas por la acumulación y compactación progresiva de nieve durante largos periodos de tiempo. Su dinámica superficial depende de factores como temperatura, precipitación, radiación solar y condiciones topográficas (Benn & Evans, 2010). Debido a su sensibilidad frente a cambios atmosféricos, los glaciares son considerados indicadores naturales del cambio climático contemporáneo (Zemp et al., 2019).

En los Andes tropicales, los glaciares presentan características particulares asociadas a las condiciones climáticas y altitudinales propias de esta región. A diferencia de los glaciares de latitudes medias y altas, los glaciares tropicales responden rápidamente a pequeñas variaciones térmicas y cambios en la dinámica atmosférica regional (Kaser & Osmaston, 2002). Diversos estudios desarrollados en Colombia, Perú, Bolivia y Ecuador han documentado una disminución progresiva de las coberturas glaciares durante las últimas décadas, asociada principalmente al incremento de la temperatura y a cambios en los patrones de precipitación (Rabatel et al., 2013; Masiokas et al., 2020).

En Colombia, los glaciares se localizan principalmente sobre sistemas volcánicos y montañosos de elevada altitud, donde cumplen funciones importantes para la regulación hídrica y la conservación de ecosistemas estratégicos de alta montaña (IDEAM, 2018). Entre estos sistemas destaca el Nevado del Tolima, cuya cobertura glaciar ha presentado una reducción progresiva en las últimas décadas (IDEAM, 2024).

5.2. Retroceso glaciar y monitoreo ambiental

El retroceso glaciar corresponde a la disminución progresiva de la extensión superficial de las coberturas de hielo como respuesta a variaciones climáticas y ambientales. Este fenómeno ha sido ampliamente documentado en diferentes regiones del planeta y constituye una de las evidencias más visibles del calentamiento global contemporáneo (IPCC, 2021).

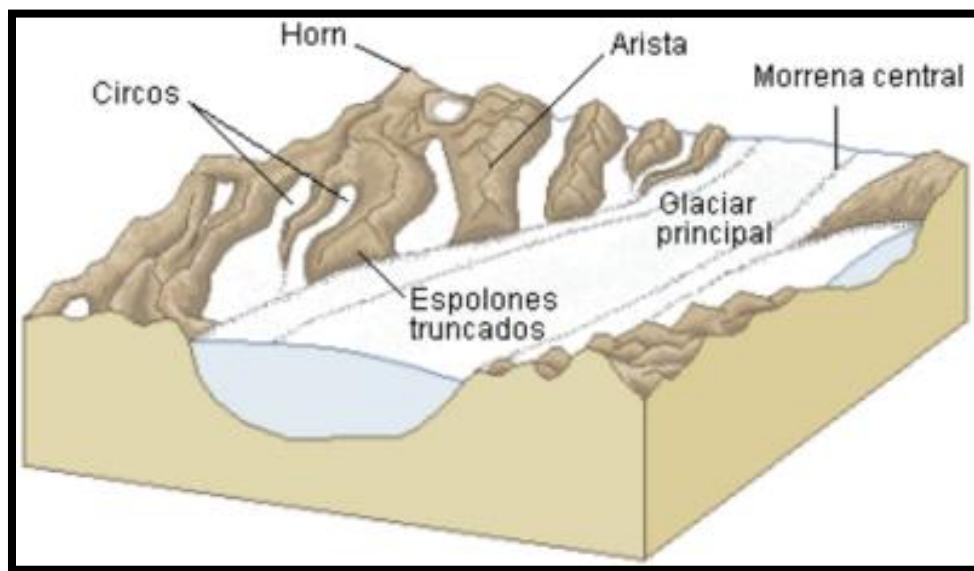
En los Andes tropicales, la reducción glaciaria se ha intensificado desde finales del siglo XX debido al aumento de la temperatura atmosférica y a modificaciones en los procesos hidrometeorológicos regionales (Kaser et al., 2003). Investigaciones desarrolladas en glaciares tropicales han evidenciado procesos de reducción superficial, fragmentación y modificaciones morfológicas asociadas al retroceso glaciario (Mark et al., 2005; Veettil & Kamp, 2017).

El monitoreo de estos cambios es fundamental para comprender la evolución reciente de los ecosistemas de alta montaña y generar información útil para procesos de gestión ambiental y territorial. Sin embargo, las condiciones de accesibilidad y las limitaciones operativas presentes en ambientes glaciares dificultan el levantamiento continuo de información de campo, razón por la cual las herramientas de teledetección han adquirido una alta relevancia en estudios glaciológicos (Bolch et al., 2010).

La evaluación desarrollada en esta investigación se orienta al análisis de cambios superficiales de cobertura glaciaria mediante información satelital óptica, por lo que no corresponde a una estimación directa de balance de masa glaciario.

Figura 1.

Partes de un glaciar



Nota. Tomado de Glaciares, por A. Álvarez, B. Hassan y G. Méndez, 2018, Universidad Nacional Autónoma de México.

5.3. Teledetección aplicada al monitoreo glaciar

La teledetección corresponde al conjunto de técnicas utilizadas para obtener información de la superficie terrestre mediante sensores remotos instalados en plataformas aéreas o satelitales. Estas herramientas permiten analizar cambios espaciales y temporales en diferentes coberturas terrestres a partir de sus características espectrales (Chuvieco, 2016).

En estudios glaciares, la teledetección ha sido ampliamente utilizada para delimitar coberturas de nieve y hielo, identificar cambios espaciales y desarrollar análisis multitemporales en zonas de difícil acceso (Paul et al., 2013). Su aplicación facilita la evaluación periódica de la extensión glaciar mediante técnicas de clasificación digital y análisis espectral.

Entre los programas satelitales más utilizados para monitoreo ambiental se encuentra Sentinel-2, desarrollado por la Agencia Espacial Europea (ESA). Esta constelación proporciona imágenes multiespectrales con resolución espacial de hasta 10 metros y alta frecuencia temporal, características que favorecen el análisis de ecosistemas de montaña y coberturas glaciares (Drusch et al., 2012).

Diversas investigaciones han utilizado imágenes Sentinel-2 para delimitar glaciares y evaluar cambios superficiales en ambientes tropicales de alta montaña, debido a su capacidad para identificar variaciones espectrales relacionadas con nieve, hielo y roca expuesta (Racoviteanu et al., 2019).

5.4. Índice de Nieve de Diferencia Normalizada (NDSI)

El Índice de Nieve de Diferencia Normalizada (NDSI) es una técnica espectral utilizada para la identificación de nieve y hielo mediante el análisis de la reflectancia registrada en bandas del visible e infrarrojo de onda corta (Hall et al., 1995). Este índice permite discriminar coberturas nivales frente a otros elementos superficiales presentes en ambientes de montaña.

El NDSI ha sido ampliamente aplicado en estudios glaciares debido a su eficiencia para identificar coberturas de nieve y hielo mediante imágenes satelitales multiespectrales (Dozier, 1989). Sin embargo, diferentes investigaciones han señalado limitaciones asociadas a sombras topográficas, nieve estacional, nubosidad y similitud espectral con otras superficies claras, factores que pueden generar sobreestimaciones en la delimitación glaciar (Paul et al., 2013; Mohammadi et al., 2023).

Debido a estas limitaciones, algunos estudios han complementado el uso del NDSI con técnicas de clasificación supervisada orientadas a mejorar la precisión en la delimitación de coberturas glaciares y reducir errores de clasificación.

Figura 2.

Comparación del glaciar del Nevado del Tolima (1935–2020).



Fuente: Fotografías de sobrevuelo del Nevado del Tolima. Izquierda: Scadta (1935); derecha: Fuerza Aérea Colombiana (2020). Tomado de *Glaciares – Nevado del Tolima*, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, <https://www.ideam.gov.co/nuestra-entidad/ecosistemas-e-informacion-ambiental/glaciares/nevado-del-tolima>

5.5. Clasificación supervisada mediante Support Vector Machine (SVM)

La clasificación supervisada corresponde a un conjunto de técnicas utilizadas para categorizar coberturas terrestres a partir de muestras previamente definidas por el analista. Entre los algoritmos más utilizados en análisis multiespectral se encuentra Support Vector Machine (SVM), desarrollado inicialmente por Vapnik (1995).

El algoritmo SVM ha demostrado alta capacidad para clasificar información multiespectral debido a su eficiencia en la separación de clases espectralmente complejas (Pal & Mather, 2005). Su aplicación en estudios ambientales permite mejorar los procesos de clasificación en escenarios donde existen similitudes espectrales entre diferentes coberturas terrestres.

En estudios glaciares, el uso de SVM ha permitido mejorar la delimitación de coberturas de nieve y hielo frente a superficies como roca expuesta, sombras y nieve temporal (Maxwell et al., 2018). Asimismo, este algoritmo ha sido utilizado en procesos de clasificación supervisada debido a su capacidad para trabajar con conjuntos de datos multiespectrales y reducir errores de clasificación.

En esta investigación, la clasificación supervisada mediante SVM fue utilizada como complemento al análisis espectral basado en NDSI, con el propósito de mejorar la delimitación de la cobertura glaciar del Nevado del Tolima y reducir inconsistencias asociadas a nieve estacional y superficies no glaciares.

5.6. Análisis multitemporal de cambios superficiales glaciares

El análisis multitemporal consiste en la comparación de información espacial obtenida en diferentes momentos con el fin de identificar cambios en la distribución y comportamiento de determinadas coberturas terrestres (Chuvieco, 2016). En estudios glaciares, esta metodología permite evaluar procesos de reducción superficial, fragmentación y modificación morfológica mediante la comparación temporal de áreas y perímetros glaciares.

La integración de imágenes satelitales, índices espectrales y técnicas de clasificación supervisada facilita la generación de información espacial orientada al monitoreo de cambios glaciares en periodos prolongados (Hirschmugl et al., 2017). No obstante, la precisión de estos análisis puede verse afectada por factores como cobertura nubosa, variaciones estacionales, resolución espacial y condiciones atmosféricas presentes al momento de adquisición de las imágenes (Paul et al., 2013).

En este contexto, el análisis multitemporal constituye una herramienta útil para evaluar la evolución reciente de la cobertura glaciar del Nevado del Tolima y aportar información técnica para procesos de monitoreo ambiental en ecosistemas tropicales de alta montaña

6. METODOLOGÍA



Figura 3. Flujograma fases de recolección, sistematización y análisis de la información.

Nota. Elaboración propia.

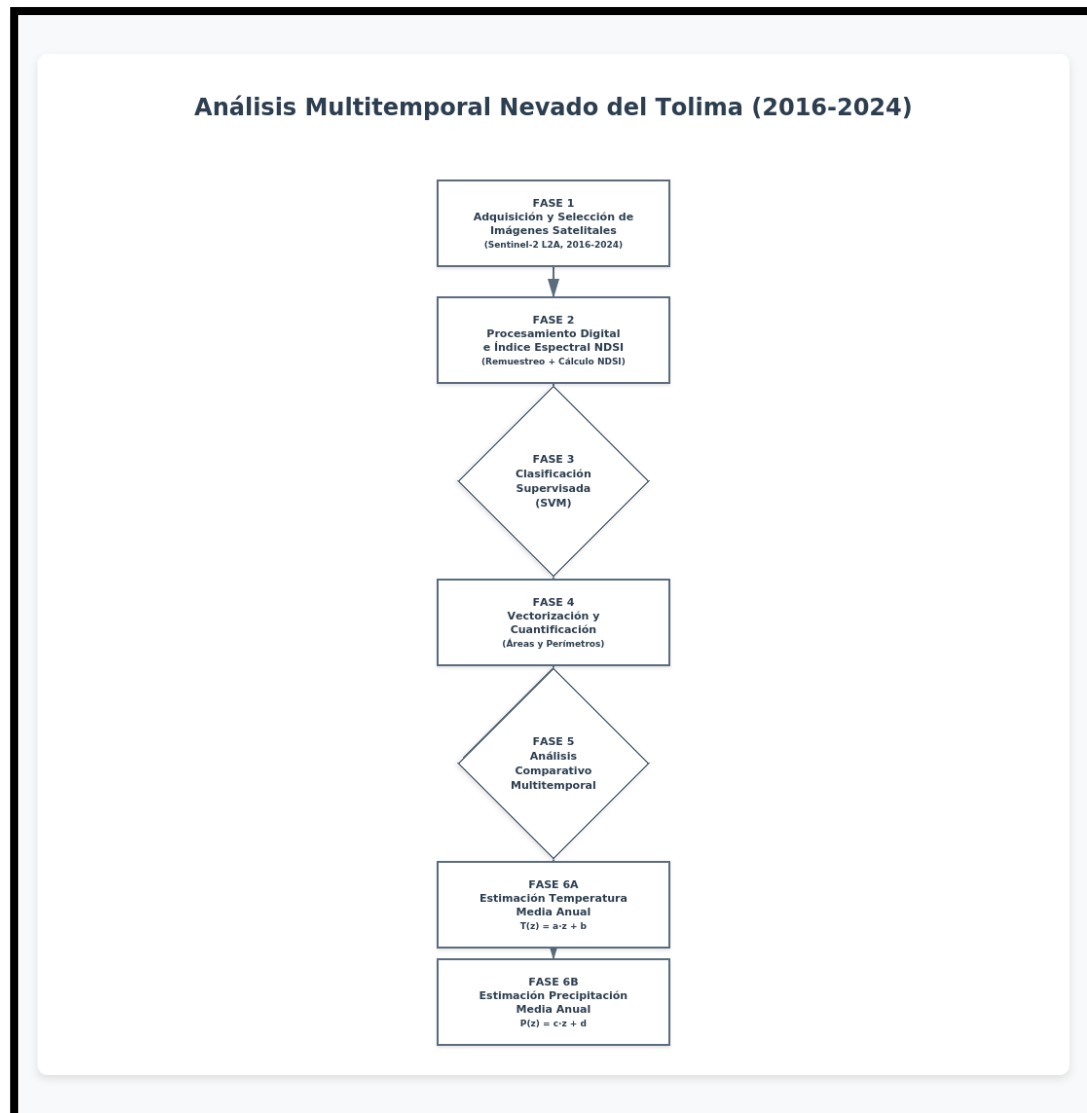


Figura 4. Esquema metodológico.

Nota. Elaboración propia.

6.1. Enfoque metodológico

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo con alcance descriptivo y análisis multitemporal, orientado a evaluar los cambios superficiales de la cobertura glaciar del Nevado del Tolima durante el periodo 2016–2024 mediante herramientas de teledetección y sistemas de información geográfica (SIG). Este tipo de enfoque permite identificar variaciones espaciales y

temporales en coberturas terrestres a partir del procesamiento de imágenes satelitales y técnicas de análisis espacial (Chuvieco, 2016).

El estudio se fundamentó en el uso de imágenes Sentinel-2 L2A y en la aplicación de técnicas de clasificación espectral y supervisada para la delimitación de coberturas glaciares. La integración de índices espectrales y algoritmos de clasificación supervisada ha sido ampliamente utilizada en estudios de monitoreo glaciar debido a su capacidad para identificar cambios superficiales en ambientes de alta montaña (Paul et al., 2013; Veettil & Kamp, 2017).

Asimismo, se incorporó un análisis descriptivo de variables meteorológicas asociadas a temperatura y precipitación con fines de contextualización ambiental. La investigación no contempló estimaciones directas de balance de masa glaciar ni modelaciones climáticas, sino la evaluación de cambios superficiales observables a partir de información satelital multitemporal.

6.2. Tipo de Estudio

La investigación corresponde a un estudio descriptivo, observacional y longitudinal de tipo multitemporal, debido a que analiza la evolución espacial de la cobertura glaciar mediante comparación de información satelital obtenida en diferentes fechas entre 2016 y 2024.

Los análisis multitemporales permiten identificar patrones de cambio superficial mediante la comparación de imágenes adquiridas en distintos periodos, facilitando la evaluación de procesos de reducción y fragmentación glaciar (Bolch et al., 2010; Chuvieco, 2016). Este tipo de metodología ha sido ampliamente utilizada en estudios glaciológicos desarrollados en ecosistemas de montaña y regiones tropicales andinas (Rabatel et al., 2013).

6.3. Procedimiento metodológico

6.3.1. Fase 1: Adquisición y selección de imágenes satelitales

Se utilizaron imágenes satelitales Sentinel-2 L2A obtenidas desde la plataforma Copernicus Open Access Hub de la Agencia Espacial Europea (ESA). Sentinel-2 corresponde a una constelación multispectral diseñada para monitoreo ambiental y análisis de coberturas terrestres, con resolución espacial de hasta 10 metros y alta frecuencia temporal (Drusch et al., 2012).

Las imágenes seleccionadas correspondieron al periodo 2016–2024 y fueron escogidas considerando criterios de baja cobertura nubosa, disponibilidad temporal y condiciones de visibilidad adecuadas sobre el área de estudio. La selección de imágenes con mínima interferencia atmosférica permite reducir errores en la delimitación espectral de coberturas de nieve y hielo (Paul et al., 2013).

La información satelital fue organizada en un entorno SIG con el propósito de garantizar homogeneidad espacial y comparabilidad temporal entre las escenas analizadas.

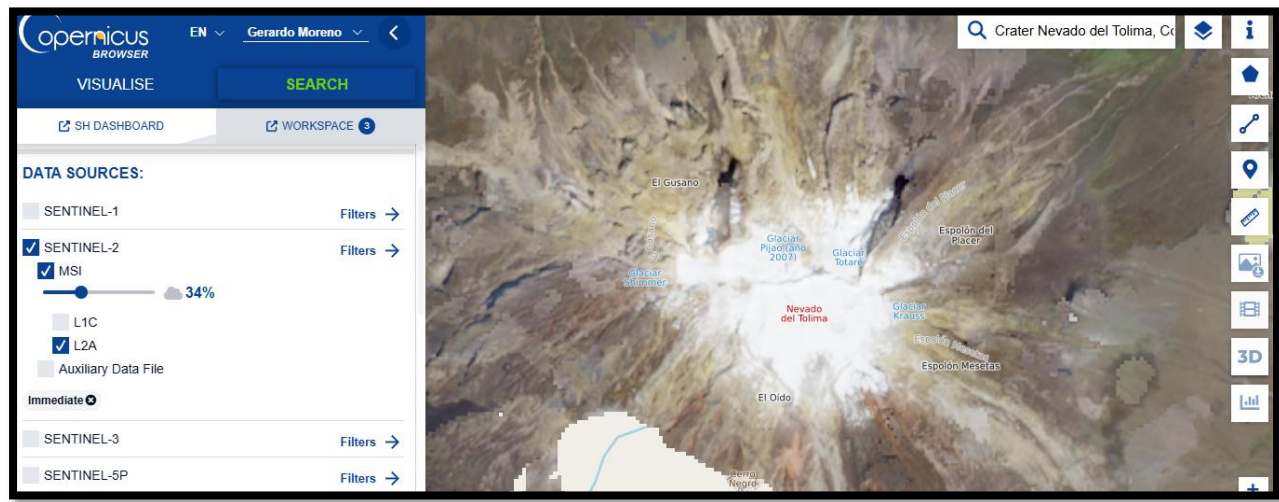


Figura 5. Interfaz Plataforma Copernicus Open Access Hub, descarga de imágenes satelitales

Nota. Elaboración propia.

Tabla 1. Imágenes Satelitales seleccionadas del Nevado del Tolima, periodo 2016 – 2024.

Año	Identificador del producto	Satélite	Fecha adquisición	Nivel de procesamiento
2016	S2A_MSIL2A_20160130T153112_N0500_R025_T18NVL_20231016T080456.SAFE	Sentinel-2A	30/01/2016	Level-2A (L2A)
2017	S2A_MSIL2A_20170213T152631_N0500_R025_T18NVL_20230919T084239.SAFE	Sentinel-2A	13/02/2017	Level-2A (L2A)
2018	S2A_MSIL2A_20180228T152641_N0500_R025_T18NVL_20230823T213540.SAFE	Sentinel-2A	28/02/2018	Level-2A (L2A)
2019	S2A_MSIL2A_20190203T152641_N0500_R025_T18NVL_20221207T030433.SAFE	Sentinel-2A	3/02/2019	Level-2A (L2A)
2020	S2B_MSIL2A_20200104T152639_N0500_R025_T18NVL_20200104T192640.SAFE	Sentinel-2B	4/01/2020	Level-2A (L2A)
2021	S2B_MSIL2A_20210309T152639_N0500_R025_T18NVL_20230605T032639.SAFE	Sentinel-2B	9/03/2021	Level-2A (L2A)

2022	S2A_MSIL2A_20220309T152641_N0510_R025_T18NVL_20240529T160141.SAFE	Sentinel-2A	9/03/2022	Level-2A (L2A)
2023	S2B_MSIL2A_20230128T152639_N0510_R025_T18NVL_20240810T101410.SAFE	Sentinel-2B	28/01/2023	Level-2A (L2A)
2024	S2B_MSIL2A_20240123T152649_N0510_R025_T18NVL_20240123T192640.SAFE	Sentinel-2B	23/01/2024	Level-2A (L2A)

Nota. Elaboración propia.

6.3.2. Fase 2: Preprocesamiento de imágenes y sistema de coordenadas.

Las imágenes satelitales fueron sometidas a procesos de recorte, organización y ajuste espacial utilizando el área de interés correspondiente al glaciar del Nevado del Tolima y su entorno inmediato.

El procesamiento espacial se desarrolló bajo el sistema proyectado WGS84 / UTM Zona 18N (EPSG: 32618). Esta elección técnica se fundamentó en la necesidad de mantener la integridad geométrica de las imágenes Sentinel-2 y garantizar la precisión en el cálculo de métricas de superficie (hectáreas) y perímetro (kilómetros). Se asegura que los cálculos realizados bajo esta proyección son métricamente consistentes con los estándares del sistema MAGNA-SIRGAS Origen Nacional (CTM12), cumpliendo así con la precisión espacial requerida por la normativa cartográfica vigente en Colombia. La homogeneización espacial y geométrica constituye una etapa fundamental en estudios multitemporales debido a que reduce posibles errores asociados a desplazamientos espaciales entre imágenes (Chuvienco, 2016).

Posteriormente, se delimitó el área de interés mediante herramientas de análisis espacial orientadas a optimizar el procesamiento de las coberturas glaciares presentes en cada escena satelital.

Para calcular el NDSI se aplicó la siguiente fórmula matemática a cada una de las imágenes:

$$NDSI = \frac{B3 - B11}{B3 + B11}$$

En esta ecuación:

- La **Banda 3** corresponde al espectro del color verde, con una longitud de onda de 560 nanómetros y una resolución espacial de 10 metros

- La **Banda 11** pertenece al infrarrojo de onda corta (SWIR), con una longitud de onda de 1610 nanómetros y una resolución espacial de 20 metros

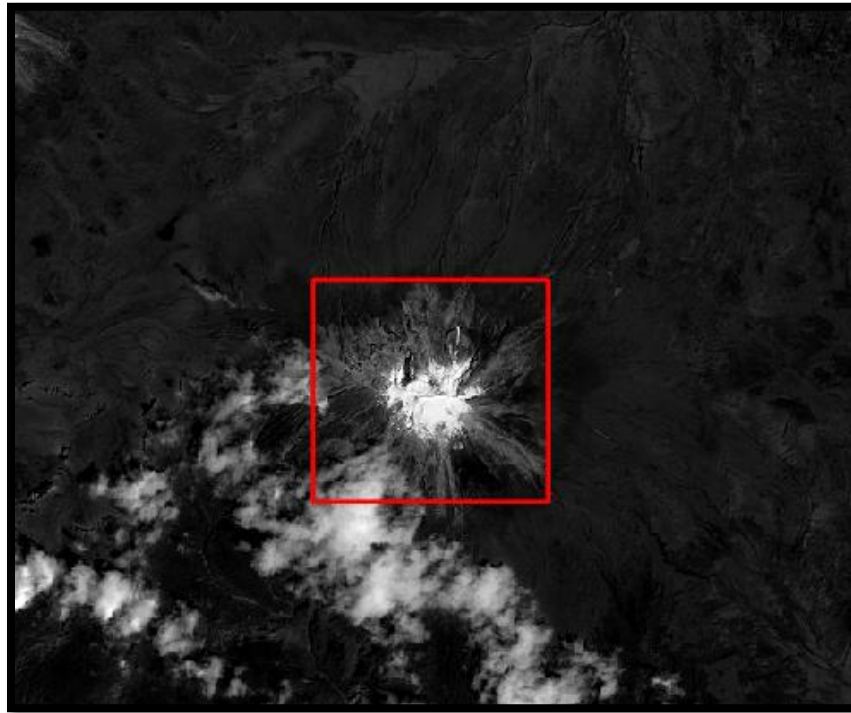


Figura 6. Área de interés en Imagen Sentinel 2, Volcán Nevado del Tolima

Nota. Elaboración propia.

6.3.3. Fase 3: Aplicación del Índice de Nieve de Diferencia Normalizada (NDSI)

Para la identificación preliminar de coberturas de nieve y hielo se aplicó el Índice de Nieve de Diferencia Normalizada (NDSI), técnica espectral desarrollada para discriminar superficies nivales mediante el comportamiento espectral registrado en bandas del visible e infrarrojo de onda corta (Hall et al., 1995).

El NDSI ha sido ampliamente utilizado en estudios glaciares debido a su capacidad para resaltar coberturas de nieve y hielo mediante imágenes multiespectrales (Dozier, 1989). En esta investigación, el índice fue utilizado como herramienta inicial de detección espectral para identificar áreas potencialmente asociadas a cobertura glaciar dentro del Nevado del Tolima.

No obstante, investigaciones previas han señalado que el NDSI puede presentar limitaciones relacionadas con sombras topográficas, presencia de nieve estacional y similitud espectral con otras coberturas superficiales, factores que pueden generar sobreestimaciones en la

delimitación glaciar (Paul et al., 2013; Mohammadi et al., 2023). Debido a ello, los resultados obtenidos mediante NDSI fueron complementados posteriormente mediante clasificación supervisada.

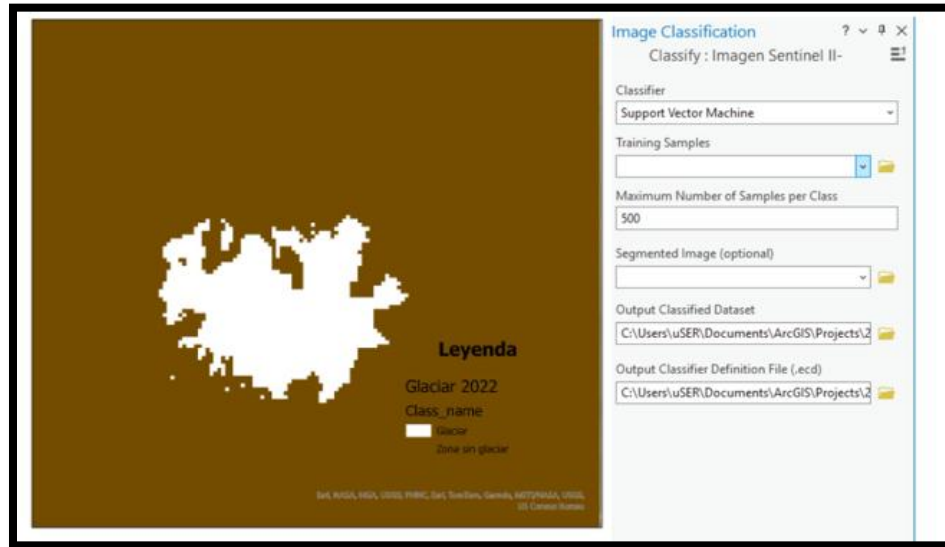


Figura 7. Clasificación valores

Nota. Elaboración propia.

6.3.4. Fase 4: Clasificación supervisada mediante Support Vector Machine (SVM)

Con el propósito de mejorar la delimitación de la cobertura glaciar y reducir errores asociados a la clasificación espectral inicial, se implementó una clasificación supervisada utilizando el algoritmo Support Vector Machine (SVM).

El algoritmo SVM corresponde a un método de aprendizaje supervisado ampliamente utilizado en análisis de imágenes multiespectrales debido a su capacidad para discriminar clases espectralmente complejas y reducir errores de clasificación (Vapnik, 1995; Pal & Mather, 2005). Su aplicación en estudios glaciares ha demostrado resultados favorables en la delimitación de coberturas de nieve y hielo frente a superficies como roca expuesta y sombras topográficas (Maxwell et al., 2018).

En esta investigación, el NDSI fue utilizado como herramienta inicial para la identificación espectral de nieve y hielo, mientras que la clasificación supervisada mediante SVM se empleó

como procedimiento complementario para refinar la delimitación glaciar y reducir posibles inconsistencias asociadas a nieve estacional y superficies no glaciares.

Para el entrenamiento del algoritmo se definieron muestras representativas correspondientes a diferentes coberturas presentes en el área de estudio, incluyendo nieve/hielo, roca expuesta y sombras. Posteriormente, se ejecutó el proceso de clasificación supervisada sobre cada imagen satelital seleccionada.

La clasificación obtenida fue evaluada mediante matrices de confusión utilizando muestras independientes de validación. Asimismo, se calcularon indicadores de exactitud global y coeficiente Kappa con el propósito de evaluar la confiabilidad de la clasificación supervisada aplicada en el estudio (Congalton & Green, 2009).

6.3.5. Fase 5: Vectorización y análisis multitemporal

Las coberturas glaciares obtenidas mediante clasificación supervisada fueron convertidas a formato vectorial con el fin de facilitar el cálculo de variables espaciales asociadas al área y perímetro glaciar.

Posteriormente, se desarrolló un análisis multitemporal mediante comparación espacial de las superficies delimitadas entre 2016 y 2024, permitiendo identificar procesos de reducción superficial y cambios morfológicos en la cobertura glaciar del Nevado del Tolima.

La comparación temporal de coberturas glaciares mediante herramientas SIG constituye una metodología ampliamente utilizada para el monitoreo de ecosistemas de alta montaña y evaluación de cambios espaciales asociados al retroceso glaciar (Bolch et al., 2010; Veetil & Kamp, 2017).

Los resultados obtenidos fueron organizados mediante tablas, gráficos y representaciones cartográficas orientadas a evaluar la evolución temporal de la cobertura glaciar durante el periodo analizado.

La tasa de cambio anual (IDEAM, 2018) se calculó a partir de la diferencia porcentual entre el valor registrado en un año determinado y el correspondiente al año inmediatamente anterior, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$TC = \frac{V_t - V_{t-1}}{V_{t-1}} \times 100$$

Donde:

- V_t corresponde al valor del año actual.
- V_{t-1} corresponde al valor del año anterior.

El resultado se expresa como un **porcentaje (%)**, donde valores positivos indican un incremento respecto al año previo y valores negativos representan una disminución.

Un valor positivo de la tasa de cambio anual indica un incremento del área o del perímetro glaciar, mientras que un valor negativo refleja una disminución. Este procedimiento permitió evaluar de manera cuantitativa la intensidad y dirección de los cambios interanuales. Los resultados de esta fase se presentan en la sección correspondiente, donde se evidencian las variaciones espaciales y cuantitativas de la cobertura glaciar del Nevado del Tolima durante el período analizado.

6.3.6. Fase 6. Variables meteorológicas

Se incorporaron variables meteorológicas asociadas a temperatura y precipitación con el propósito de contextualizar las condiciones ambientales presentes durante el periodo de estudio.

La información climática fue organizada y analizada de manera descriptiva mediante representación gráfica y comparación temporal de tendencias generales observadas entre 2016 y 2024. Estudios previos han señalado que las variaciones de temperatura y precipitación constituyen factores relevantes en la dinámica superficial de glaciares tropicales (Kaser et al., 2003; Vuille et al., 2018).

No obstante, debido a las limitaciones asociadas a disponibilidad de información climática y alcance metodológico de la investigación, las variables meteorológicas fueron incorporadas únicamente con fines descriptivos y de contextualización ambiental, sin desarrollar modelos estadísticos de correlación ni análisis de causalidad climática respecto a la dinámica superficial del glaciar.

7. RESULTADOS

La delimitación de la cobertura glaciar del Nevado del Tolima se realizó mediante la integración del Índice de Nieve de Diferencia Normalizada (NDSI) y clasificación supervisada utilizando el algoritmo Support Vector Machine (SVM) sobre imágenes Sentinel-2 L2A correspondientes al periodo 2016–2024.

Inicialmente, el NDSI fue aplicado como herramienta de identificación espectral para resaltar superficies asociadas a nieve y hielo a partir de la respuesta espectral registrada en las bandas del visible e infrarrojo de onda corta. Posteriormente, la clasificación supervisada mediante SVM permitió refinar la delimitación glaciar y reducir inconsistencias relacionadas con sombras topográficas, nieve estacional y superficies rocosas presentes en el área de estudio.

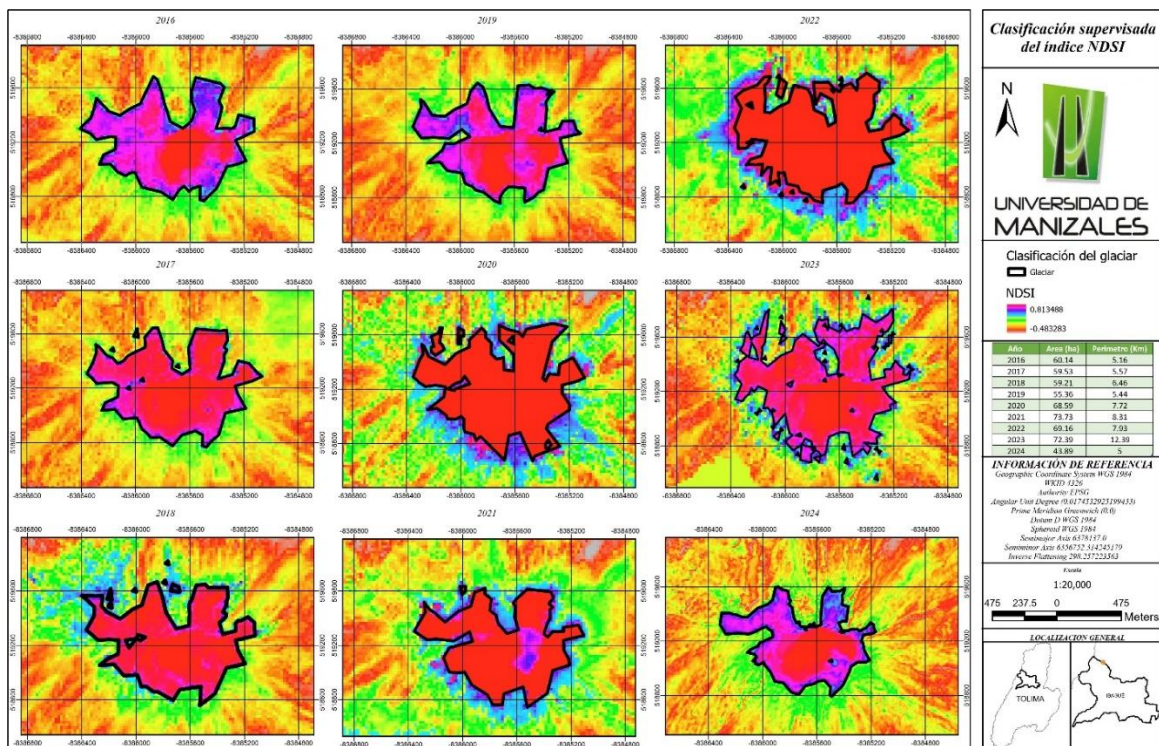


Figura 8. Clasificación supervisada de cobertura glaciar mediante NDSI y SVM.

Fuente: Elaboración propia a partir del análisis multitemporal.

Los resultados de clasificación obtenidos para cada uno de los años analizados evidencian variaciones espaciales en la extensión superficial del glaciar durante el periodo evaluado. De manera general, las clasificaciones muestran una tendencia de reducción superficial con variaciones interanuales en la configuración espacial de la cobertura glaciar.

La clasificación supervisada permitió diferenciar las coberturas de nieve y hielo frente a otras superficies presentes en el entorno glaciar, mejorando la delimitación obtenida inicialmente mediante el NDSI. Asimismo, los resultados cartográficos evidencian cambios en la continuidad espacial de la cobertura glaciar y sectores con configuraciones superficiales irregulares en algunos periodos analizados.

Con el propósito de evaluar la confiabilidad de la clasificación supervisada, se desarrolló un proceso de validación mediante matrices de confusión utilizando muestras independientes de verificación. A partir de este procedimiento se calcularon indicadores de exactitud global y coeficiente Kappa para cada uno de los años evaluados.

Tabla 2. Resumen de validación de la clasificación supervisada SVM (2016–2024).

Año	Exactitud global (%)	Coeficiente Kappa
2016	97	0,8855
2017	88	0,7454
2018	96	0,9159
2019	95	0,8963
2020	90	0,7878
2021	90	0,7495
2022	96	0,8987
2023	94	0,8764
2024	96	0,8987

Los resultados de validación evidenciaron exactitudes globales superiores al 85 % y coeficientes Kappa entre 0,74 y 0,91, indicando niveles adecuados de confiabilidad en la clasificación supervisada aplicada sobre las imágenes Sentinel-2. Estos resultados permiten considerar que la delimitación obtenida presenta un nivel de precisión aceptable para el análisis multitemporal de cambios superficiales en la cobertura glaciar del Nevado del Tolima.

En términos generales, la integración entre el análisis espectral mediante NDSI y la clasificación supervisada SVM permitió mejorar la identificación de coberturas glaciares y generar información espacial consistente para el análisis multitemporal desarrollado en la investigación.

7.1. Cambios en la extensión superficial del glaciar del Nevado del Tolima

En este apartado se presentan los resultados del análisis multitemporal realizado para evaluar los cambios en la extensión superficial del glaciar del Nevado del Tolima durante el periodo comprendido entre 2016 y 2024. A partir del análisis de imágenes satelitales fue posible identificar variaciones en el área y el perímetro glaciar, las cuales reflejan la dinámica espacial del glaciar a lo largo del tiempo.

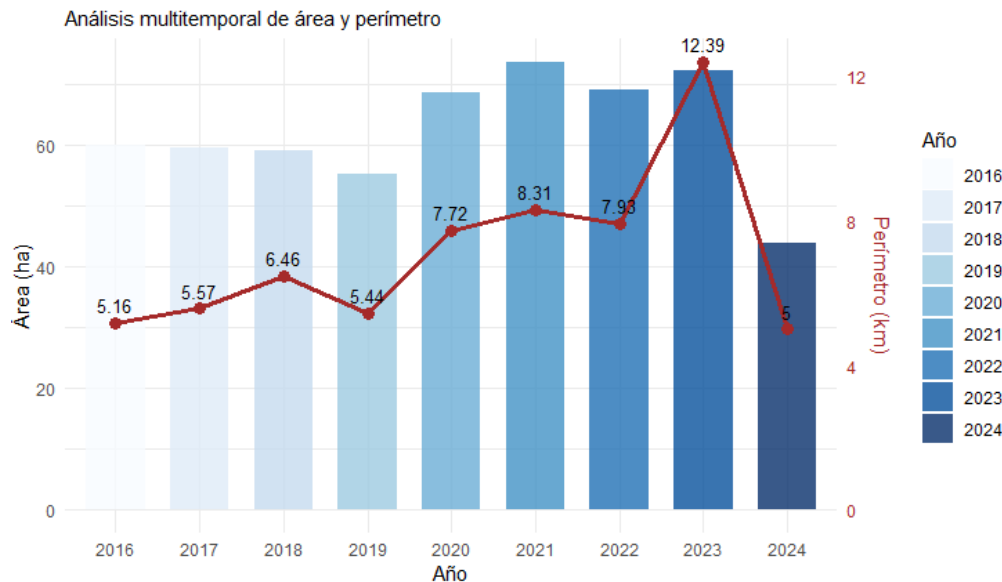


Figura 9. Evolución de la cobertura glaciar del Nevado del Tolima, periodo 2016–2024

Fuente: Elaboración propia a partir de análisis multitemporal

Los resultados evidencian un comportamiento interanual variable de la cobertura glaciar durante el periodo analizado. Entre 2019 y 2021 se observaron incrementos temporales en el área glaciar, seguidos de una disminución moderada entre 2021 y 2022. Posteriormente, en 2023 se identificó un nuevo incremento superficial, mientras que en 2024 se registró una reducción significativa del área glaciar.

Tabla 3. Áreas y perímetros del glaciar Nevado del Tolima, periodo 2016 – 2024.

Año	Área (ha)	Perímetro (km)
2016	60,14	5,16
2017	59,53	5,57

2018	59,21	6,46
2019	55,36	5,44
2020	68,59	7,72
2021	73,73	8,31
2022	69,16	7,93
2023	72,39	12,39
2024	43,89	5,00

Fuente: Elaboración Propia

7.1.1. Evolución temporal del área glaciar

Entre 2016 y 2024, el área glaciar del Nevado del Tolima presentó un comportamiento no lineal caracterizado por periodos de estabilidad relativa, incrementos temporales y reducciones significativas de superficie. Estas variaciones evidencian la alta variabilidad interanual de la cobertura glaciar durante el periodo evaluado.

Entre 2016 y 2018, el área glaciar se mantuvo cercana a las 60 hectáreas, registrando variaciones moderadas entre 59,21 ha y 60,14 ha. En 2019 se identificó una reducción hasta las 55,36 ha, correspondiente al valor más bajo de esta primera etapa del análisis.

Posteriormente, entre 2020 y 2021 se observó un incremento temporal de la cobertura glaciar, alcanzando 73,73 ha en 2021, valor máximo registrado durante toda la serie analizada. En 2022 el área disminuyó a 69,16 ha y en 2023 se registró nuevamente un incremento moderado hasta 72,39 ha.

Finalmente, en 2024 se identificó una reducción significativa del área glaciar hasta 43,89 ha, correspondiente al valor más bajo del periodo analizado y representando una disminución importante respecto a los años anteriores.

Aunque se observaron incrementos temporales en algunos periodos, la tendencia neta del intervalo 2016–2024 corresponde a una reducción superficial general de la cobertura glaciar.

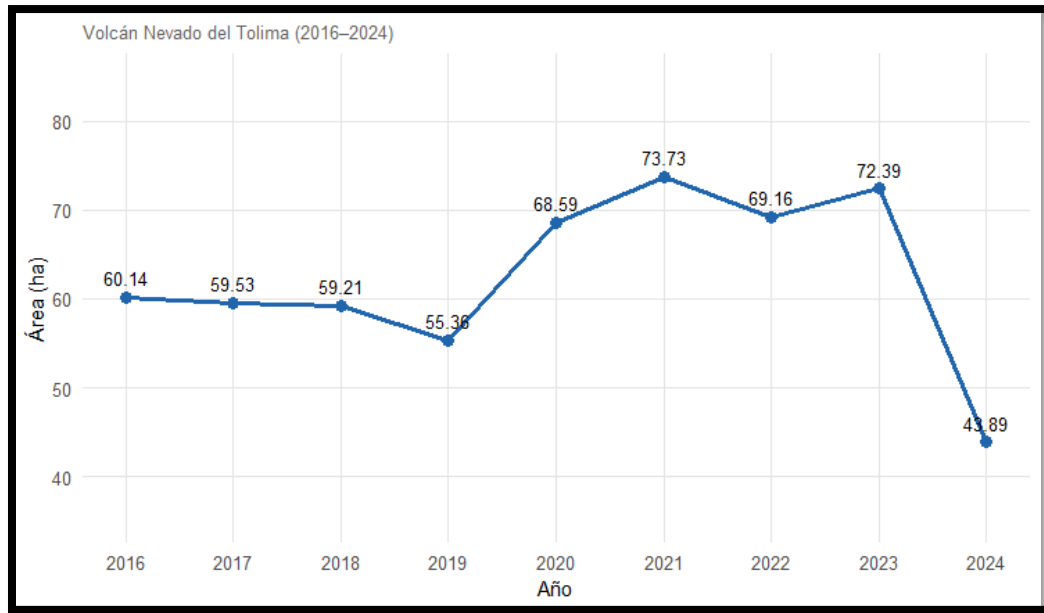


Figura 10. Evolución temporal del área glaciar del Nevado del Tolima (2016–2024).

Fuente: Elaboración Propia

7.1.2. Evolución temporal del perímetro glaciar

La evolución del perímetro glaciar del Nevado del Tolima durante el periodo 2016–2024 evidenció variaciones importantes en la configuración espacial de la cobertura glaciar.

Entre 2016 y 2018, el perímetro presentó un incremento gradual, pasando de 5,16 km a 6,46 km. En 2019 esta tendencia se interrumpió con una reducción hasta 5,44 km, acompañando la disminución del área glaciar observada ese mismo año.

A partir de 2020 el perímetro retomó una tendencia ascendente, alcanzando 8,31 km en 2021. Posteriormente, en 2022 se registró una disminución moderada hasta 7,93 km.

El valor máximo del perímetro glaciar se registró en 2023 con 12,39 km, mientras que el área glaciar presentó valores similares a los años anteriores. Esta diferencia entre área y perímetro podría relacionarse con una mayor irregularidad espacial de la cobertura glaciar y posibles procesos de fragmentación superficial.

Finalmente, en 2024 el perímetro disminuyó de manera significativa hasta 5,00 km, acompañando la reducción del área glaciar observada durante ese año.

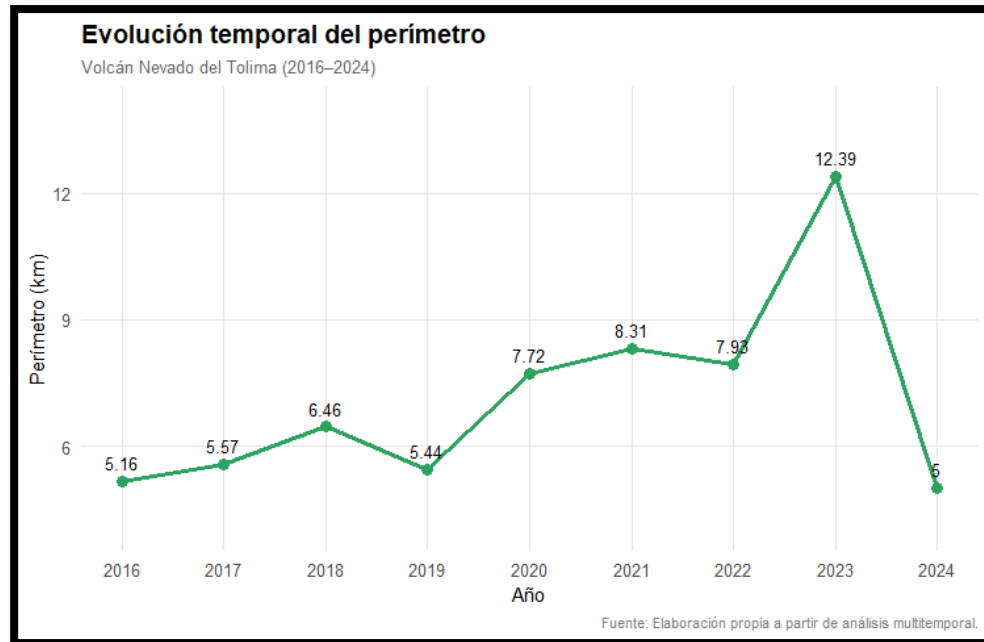


Figura 11. Perímetro glaciar del Nevado del Tolima (2016–2024)

Fuente: Elaboración Propia

7.2. Relación temporal entre el área y el perímetro glaciar

El análisis conjunto del área y el perímetro glaciar permitió identificar una dinámica espacial variable de la cobertura glaciar del Nevado del Tolima durante el periodo 2016–2024.

En términos generales, los incrementos del área glaciar coincidieron con aumentos en el perímetro, mientras que las disminuciones del área estuvieron acompañadas por reducciones del perímetro. Este comportamiento refleja cambios simultáneos tanto en la extensión como en la configuración espacial de la cobertura glaciar.

No obstante, en algunos periodos se identificaron diferencias importantes entre ambas variables. El caso más representativo corresponde al año 2023, cuando el perímetro alcanzó el valor más alto de toda la serie, mientras que el área glaciar presentó valores similares a los registrados en 2021 y 2022. Esta situación sugiere una configuración espacial más irregular de la cobertura glaciar y posibles procesos de fragmentación superficial.

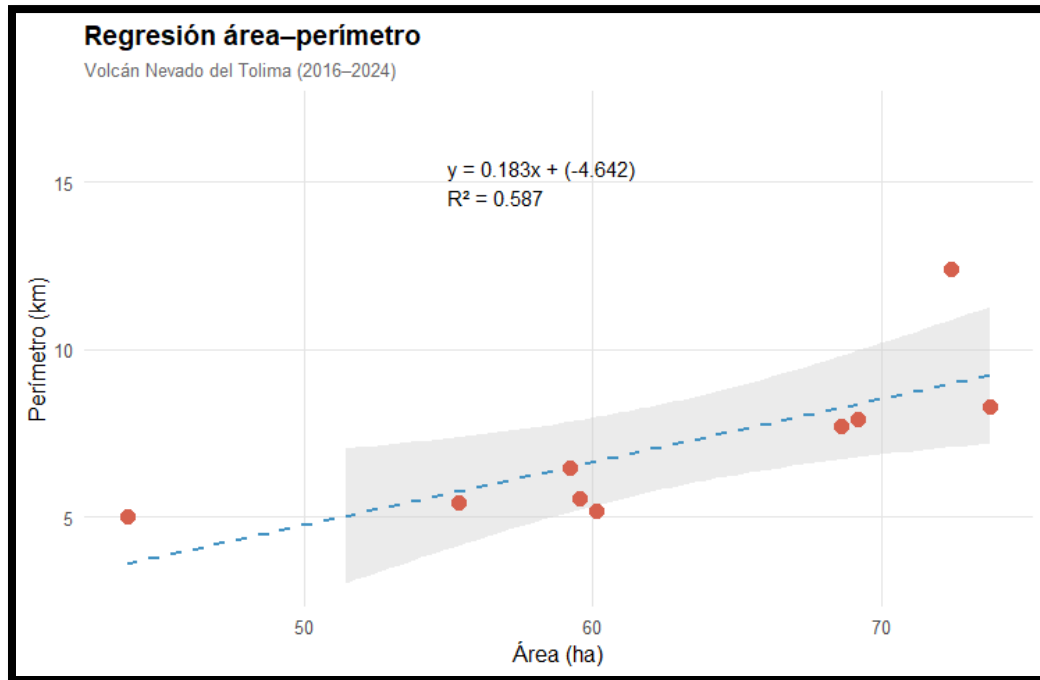


Figura 12. Relación entre área y perímetro glaciar

Fuente: Elaboración Propia

7.3. Análisis comparativo multitemporal

Con base en los valores anuales del área glaciar obtenidos para el periodo 2016–2024, se calculó la tasa de cambio anual con el propósito de identificar la magnitud de las variaciones superficiales del glaciar entre un año y otro.

Durante los primeros años del periodo, entre 2016 y 2018, las tasas de cambio fueron relativamente bajas, registrando valores de -1,01 % y -0,54 %, lo que indica una relativa estabilidad superficial de la cobertura glaciar durante esta etapa.

En 2019 se registró una disminución más marcada, con una tasa de cambio de -6,50 %. Posteriormente, en 2020 se presentó el mayor incremento superficial del periodo con una tasa positiva de +23,90 %, seguido de un aumento adicional de +7,50 % en 2021.

En 2022 la tendencia volvió a ser negativa con una tasa de -6,20 %, mientras que en 2023 se registró un incremento moderado de +4,67 %. Finalmente, entre 2023 y 2024 se identificó la reducción más significativa de toda la serie con una tasa de cambio de -39,37 %.

Tabla 4. Tasa de cambio anual del área glaciar del Nevado del Tolima (%).

Año	Área (ha)	Tasa de cambio anual (%)
2016	60,14	—
2017	59,53	-1,01
2018	59,21	-0,54
2019	55,36	-6,50
2020	68,59	23,9
2021	73,73	7,50
2022	69,16	-6,2
2023	72,39	4,67
2024	43,89	-39,37

Nota. Elaboración propia.

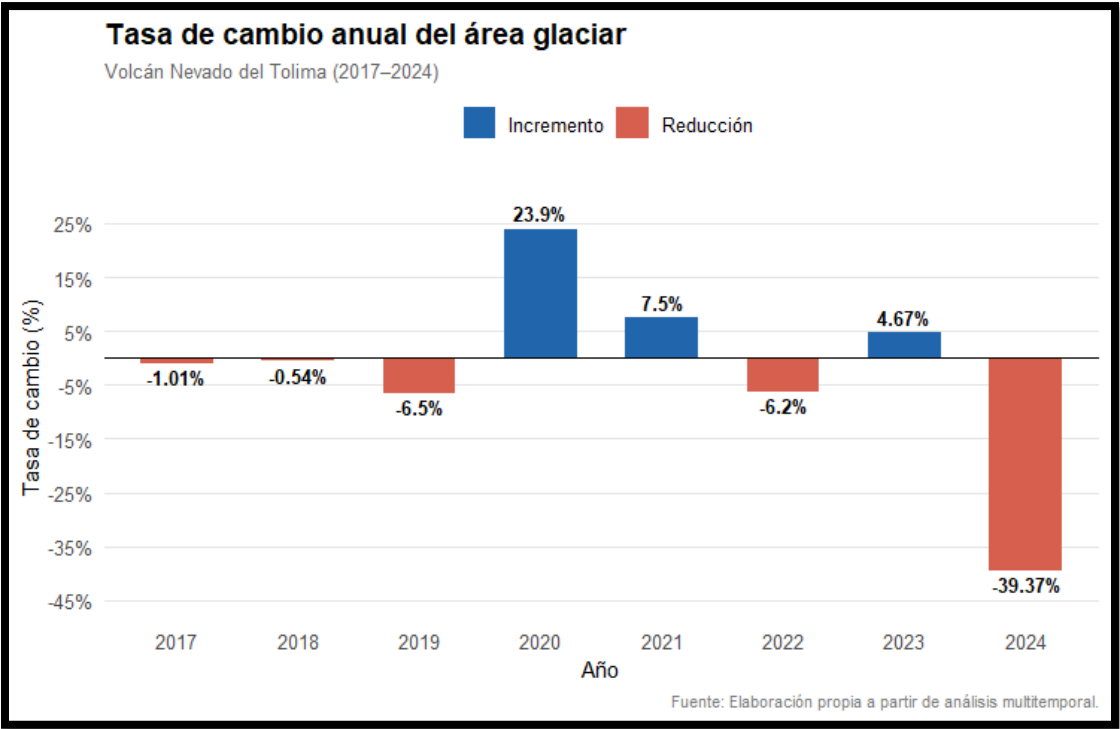


Figura 13. Cambio porcentual interanual del área glaciar del Nevado del Tolima.

Fuente: Elaboración propia

En conjunto, las tasas de cambio anual evidencian una dinámica interanual caracterizada por alternancias entre incrementos temporales y reducciones significativas de superficie. Estos resultados complementan el análisis temporal del área glaciar y permiten identificar con mayor claridad los periodos donde se concentraron las variaciones más intensas de la cobertura glaciar.

7.4. Evolución temporal del perímetro glaciar

Con base en los valores anuales del perímetro glaciar obtenidos para el periodo 2016–2024, se calculó la tasa de cambio anual con el propósito de evaluar las transformaciones espaciales del contorno glaciar a lo largo del tiempo.

Entre 2016 y 2018, el perímetro presentó incrementos moderados con tasas de +7,95 % y +15,98 %, respectivamente. En 2019 esta tendencia se interrumpió con una reducción de -15,79 %, acompañando la disminución del área glaciar observada ese mismo año.

En 2020 el perímetro registró un incremento de +41,91 %, seguido de un aumento adicional de +7,64 % en 2021, en concordancia con los incrementos del área glaciar observados durante estos años. Posteriormente, en 2022 se registró una reducción moderada de -4,57 %.

La mayor variación de toda la serie se identificó en 2023, cuando el perímetro presentó un incremento de +56,24 %. Este comportamiento coincide con el aumento del perímetro glaciar observado para ese año y podría relacionarse con una configuración espacial más irregular de la cobertura glaciar.

Finalmente, entre 2023 y 2024 se registró una disminución de -59,65 %, acompañando la reducción significativa del área glaciar observada en el mismo periodo.

Tabla 5. Tasa de cambio anual del perímetro glaciar del Nevado del Tolima (%).

Año	Perímetro (km)	Tasa de cambio anual (%)
2016	5,16	—
2017	5,57	7,95
2018	6,46	15,98
2019	5,44	-15,79
2020	7,72	41,91
2021	8,31	7,64
2022	7,93	-4,57

2023	12,39	56,24
2024	5,00	-59,65

Fuente: Elaboración propia a partir de análisis multitemporal.

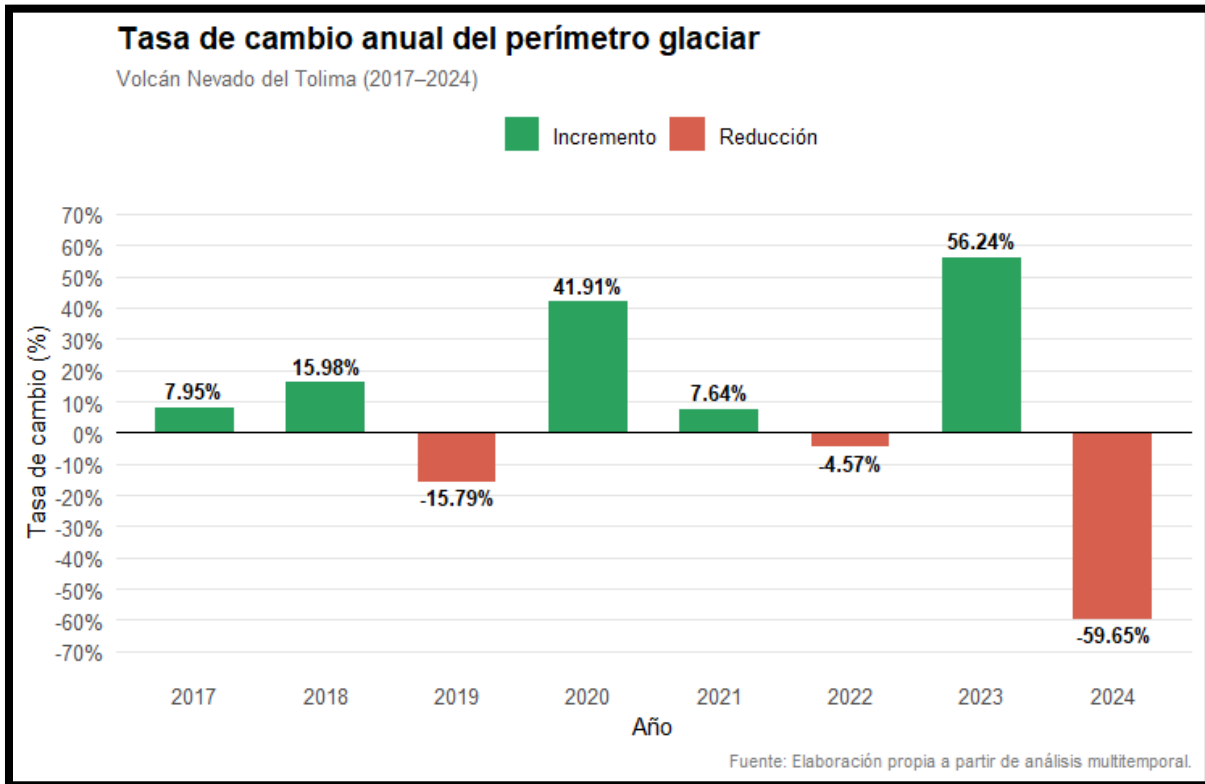


Figura 14. Cambio porcentual interanual del perímetro glaciar del Nevado del Tolima

Fuente: Elaboración propia a partir de análisis multitemporal.

7.5. Variables Meteorológicas

Las variables meteorológicas constituyen un componente importante para la caracterización ambiental de ecosistemas de alta montaña. En el presente estudio se consideraron como variables principales la temperatura del aire y la precipitación, debido a su relación con las condiciones climáticas presentes en ambientes glaciares tropicales (Ceballos et al., 2006; Francou, 2013).

Para la determinación de dichas variables se desarrolló un proceso de identificación, depuración y validación de datos provenientes de estaciones meteorológicas ubicadas en diferentes rangos altitudinales. Este procedimiento incluyó la revisión de consistencia de los registros y la

verificación de posibles valores atípicos en las variables climáticas utilizadas durante el periodo 2016–2024.

Posteriormente, los datos fueron organizados en pares altitud–variable climática para construir modelos de regresión lineal independientes por año y por variable. Este procedimiento permitió estimar gradientes altitudinales de temperatura y precipitación utilizando la totalidad de las observaciones disponibles.

Las ecuaciones obtenidas fueron evaluadas posteriormente en la altitud aproximada del Nevado del Tolima (5.276 m s. n. m.), permitiendo generar valores estimados anuales para cada variable en un sector donde no existen mediciones directas permanentes.

7.5.1. Temperatura

Los resultados obtenidos indican que la temperatura media anual estimada para el Nevado del Tolima se mantuvo en un rango cercano al punto de congelación, con valores entre $-0,03\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $2,13\text{ }^{\circ}\text{C}$ y un promedio aproximado de $1,08\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante el periodo analizado.

La serie temporal evidencia fluctuaciones interanuales de magnitud variable, destacándose el descenso registrado entre 2016 y 2017. Posteriormente, entre 2018 y 2024 se observaron alternancias entre incrementos y disminuciones moderadas de temperatura.

Aunque las variaciones registradas son relativamente bajas en términos absolutos, los resultados evidencian un comportamiento térmico variable durante el periodo analizado, consistente con las condiciones climáticas características de ambientes tropicales de alta montaña.

Tabla 6. Temperatura anual estimada para el Nevado del Tolima, periodo 2016 – 2024.

Año	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Cambio ($^{\circ}\text{C}$)
2016	2,13	—
2017	-0,03	-2,16
2018	0,86	0,89
2019	0,58	-0,28
2020	1,06	0,48
2021	1,42	0,36
2022	0,79	-0,63
2023	1,01	0,22

2024	1,86	0,85
------	------	------

Fuente: Elaboración propia

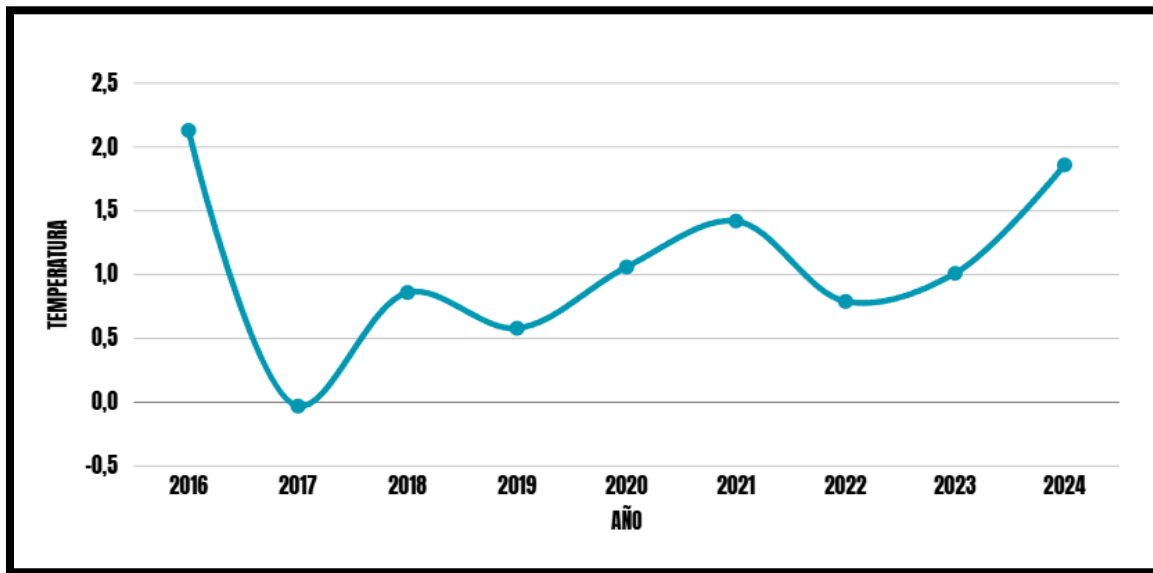


Figura 15. Tendencia de la temperatura Nevado del Tolima, periodo 2016 – 2024.

Fuente: Elaboración propia

7.5.2. Precipitación

La precipitación estimada para el Nevado del Tolima presentó una alta variabilidad interanual durante el periodo analizado, registrando valores entre 210 mm y 646 mm.

A diferencia de la temperatura, la precipitación mostró un comportamiento menos homogéneo, con fluctuaciones importantes entre años consecutivos. Este comportamiento es consistente con la complejidad de los procesos atmosféricos presentes en ambientes de montaña, donde la precipitación puede verse influenciada por factores topográficos y condiciones atmosféricas regionales.

Los resultados evidencian incrementos progresivos de precipitación entre 2020 y 2024, alcanzando el valor máximo de toda la serie en el último año evaluado.

Desde el punto de vista metodológico, es importante reconocer que la estimación de precipitación mediante regresión altitudinal constituye una aproximación general del

comportamiento climático regional y presenta mayores niveles de incertidumbre frente a la temperatura, debido a la complejidad espacial de esta variable en ambientes de alta montaña.

Tabla 7. Precipitación anual estimada para el Nevado del Tolima, periodo 2016 – 2024.

Año	Precipitación (mm)	Cambio (mm)
2016	210	—
2017	282	72
2018	245	-37
2019	298	53
2020	310	12
2021	330	20
2022	360	30
2023	400	40
2024	646	246

Fuente: Elaboración propia

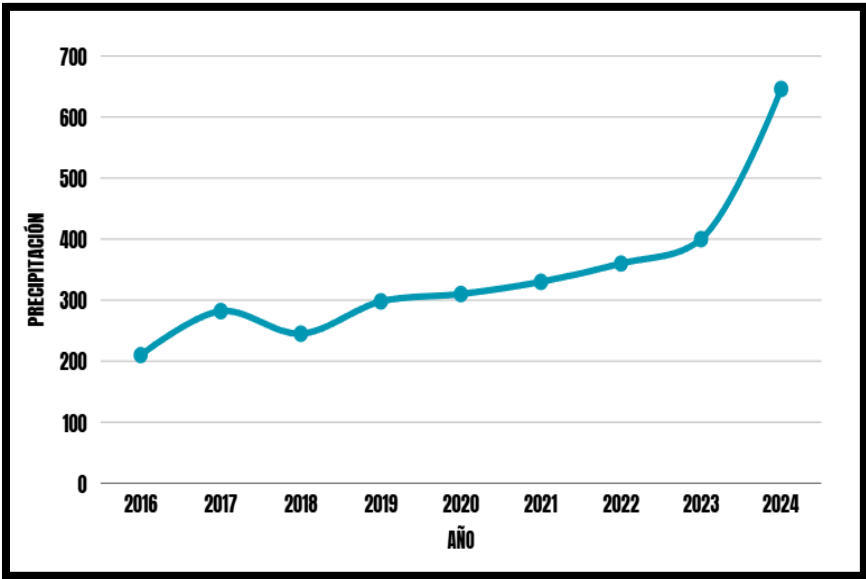


Figura 16. Tendencia de la precipitación, Nevado del Tolima, periodo 2016 – 2024.

Fuente: Elaboración propia

En términos generales, las variables meteorológicas analizadas permitieron contextualizar las condiciones ambientales presentes durante el periodo evaluado. No obstante, los resultados obtenidos corresponden a estimaciones climáticas derivadas de modelos altitudinales y su interpretación se limita a la descripción de tendencias generales observadas durante el periodo de estudio.

8. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos evidencian una reducción progresiva de la cobertura superficial del Nevado del Tolima durante el periodo 2016–2024, reflejada principalmente en la disminución del área y en las variaciones observadas en el perímetro. Este comportamiento coincide con las tendencias reportadas en diferentes ecosistemas de alta montaña de la región andina, donde diversos estudios han documentado procesos continuos de retroceso asociados al incremento de la temperatura y a la variabilidad climática regional (Rabatel et al., 2013; Vuille et al., 2018).

La disminución del área identificada mediante el análisis multitemporal sugiere una transformación progresiva de la cobertura superficial presente en el área de estudio. De igual forma, las variaciones observadas en el perímetro indican cambios en la morfología de la superficie analizada, evidenciando posibles procesos de fragmentación y pérdida de continuidad en los bordes de la cobertura nival. Este comportamiento ha sido reportado en investigaciones relacionadas con ecosistemas de alta montaña sometidos a procesos de reducción superficial, donde el incremento de irregularidades en el perímetro constituye un indicador de transformación morfológica progresiva (Paul et al., 2020).

El uso de imágenes Sentinel-2 permitió desarrollar un análisis espacial con adecuada resolución temporal y espectral, facilitando la identificación de cambios superficiales durante el periodo evaluado. Asimismo, la aplicación del Índice de Nieve de Diferencia Normalizada (NDSI) permitió identificar áreas asociadas a nieve y hielo mediante el análisis de la respuesta espectral de las coberturas superficiales (Hall & Riggs, 2011). Sin embargo, es importante reconocer que este índice puede presentar limitaciones relacionadas con la posible confusión entre nieve estacional, hielo y otras superficies de alta reflectancia, situación que podría generar sobreestimaciones en determinadas fechas de análisis.

Con el fin de reducir estas limitaciones, el estudio incorporó un proceso de clasificación supervisada mediante el algoritmo Support Vector Machine (SVM), el cual permitió mejorar la discriminación entre diferentes coberturas superficiales. Diversas investigaciones han demostrado que la combinación entre índices espectrales y técnicas de clasificación supervisada contribuye a incrementar la precisión en la delimitación de superficies cubiertas por nieve y hielo (Paul et al., 2016). No obstante, debido a la ausencia de datos de validación en campo, los resultados obtenidos deben interpretarse considerando un nivel de incertidumbre asociado al proceso de clasificación.

En relación con las variables climáticas, se identificó una tendencia general al incremento de la temperatura y una alta variabilidad interanual en la precipitación. Aunque estos factores podrían influir en las transformaciones observadas en la cobertura superficial, la relación establecida en el presente estudio se desarrolla de manera descriptiva, debido a las limitaciones asociadas a la disponibilidad y resolución de la información climática utilizada. Por esta razón, no es posible establecer relaciones causales directas entre las variables atmosféricas y los cambios identificados en el área de estudio.

Los resultados obtenidos coinciden con los reportes realizados por el IDEAM (2024), donde se evidencia una reducción progresiva de las coberturas nivales en Colombia durante las últimas décadas. Asimismo, diferentes investigaciones desarrolladas en los Andes tropicales señalan que los ecosistemas de alta montaña presentan una alta sensibilidad frente a escenarios de cambio climático, especialmente ante incrementos sostenidos de temperatura (Kaser et al., 2003; Vuille et al., 2018).

En este sentido, el presente estudio aporta información actualizada sobre las variaciones espaciales observadas en el Nevado del Tolima mediante herramientas de teledetección y análisis multitemporal. Adicionalmente, evidencia la importancia de continuar fortaleciendo metodologías de monitoreo ambiental en ecosistemas de alta montaña, integrando información climática de mayor resolución, procesos de validación en campo y técnicas avanzadas de clasificación que permitan mejorar la precisión en futuros análisis.

9. CONCLUSIONES

El análisis multitemporal realizado mediante imágenes Sentinel-2 permitió identificar variaciones espaciales en la cobertura superficial del Nevado del Tolima durante el periodo 2016–2024. Los resultados evidenciaron una disminución progresiva del área analizada, así como cambios en el comportamiento del perímetro, lo que indica modificaciones en la morfología de la cobertura superficial presente en el área de estudio.

Las variaciones observadas a lo largo del periodo evaluado reflejan una tendencia general de reducción superficial, consistente con los procesos reportados en ecosistemas de alta montaña de la región andina. Asimismo, los cambios identificados en el perímetro sugieren posibles procesos de fragmentación y pérdida de continuidad en determinados sectores de la cobertura analizada.

La aplicación del Índice de Nieve de Diferencia Normalizada (NDSI), complementada con clasificación supervisada mediante el algoritmo Support Vector Machine (SVM), permitió mejorar la delimitación de las superficies asociadas a nieve y hielo. Sin embargo, se reconoce la existencia de limitaciones relacionadas con la posible confusión entre nieve estacional y otras superficies de alta reflectancia, lo que puede generar cierto nivel de incertidumbre en los resultados obtenidos.

En cuanto a las variables climáticas, se identificaron variaciones interanuales en temperatura y precipitación durante el periodo de estudio. No obstante, debido a la disponibilidad y resolución de la información utilizada, la relación entre estas variables y las transformaciones observadas se abordó de manera descriptiva, sin establecer relaciones causales directas.

Finalmente, el estudio evidencia el potencial de las herramientas geoespaciales para el monitoreo multitemporal de ecosistemas glaciares tropicales en contextos de limitada información de campo.

10. RECOMENDACIONES

Se recomienda continuar realizando análisis multitemporales en el Nevado del Tolima mediante imágenes satelitales de mediana y alta resolución, con el fin de fortalecer el seguimiento de las variaciones espaciales observadas en la cobertura superficial del área de estudio.

Asimismo, se sugiere complementar futuros trabajos con procesos de validación en campo que permitan evaluar la precisión de las clasificaciones realizadas mediante técnicas de teledetección. La incorporación de procesos adicionales de validación en campo y otros indicadores de exactitud contribuiría a reducir la incertidumbre asociada a la delimitación de superficies cubiertas por nieve y hielo.

De igual forma, se recomienda integrar información climática proveniente de estaciones meteorológicas cercanas o modelos de mayor resolución espacial, con el propósito de fortalecer el análisis de la relación entre las variables atmosféricas y los cambios observados en la cobertura superficial.

También se considera pertinente evaluar la aplicación de metodologías complementarias de clasificación y análisis espectral que permitan mejorar la diferenciación entre nieve estacional, hielo y otras coberturas superficiales presentes en ecosistemas de alta montaña.

Finalmente, se recomienda continuar fortaleciendo el uso de herramientas de teledetección y Sistemas de Información Geográfica en estudios ambientales relacionados con ecosistemas de montaña, debido a su utilidad para el monitoreo espacial y temporal en zonas de difícil acceso.

REFERENCIAS

- Benn, D. I., & Evans, D. J. A. (2010). *Glaciers and glaciation* (2nd ed. Routledge.)
- Bolch, T., Menounos, B., & Wheate, R. (2010). Landsat-based inventory of glaciers in western Canada, 1985–2005. *Remote Sensing of Environment*, 114(1), 127–137. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.08.015>
- Ceballos, J. L., Euscátegui, C., Ramírez, J., Cañón, M., Huggel, C., Haeberli, W., & Machguth, H. (2006). *Fast shrinkage of tropical glaciers in Colombia*. *Annals of Glaciology*, 43, 194–201. <https://doi.org/10.3189/172756406781812087>
- Chuvieco, E. (2016). *Fundamentals of satellite remote sensing: An environmental approach* (2nd ed.). CRC Press.
- Congalton, R. G., & Green, K. (2009). *Assessing the accuracy of remotely sensed data: Principles and practices* (2nd ed.). CRC Press.
- Dozier, J. (1989). Spectral signature of alpine snow cover from the Landsat thematic mapper. *Remote Sensing of Environment*, 28, 9–22. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(89\)90101-6](https://doi.org/10.1016/0034-4257(89)90101-6)
- Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., Hoersch, B., Isola, C., Laberinti, P., Martimort, P., Meygret, A., Spoto, F., Sy, O., Marchese, F., & Bargellini, P. (2012). Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sensing of Environment*, 120, 25–36. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>
- European Space Agency (ESA). (2024). *Sentinel-2 mission*. Copernicus Programme. <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-2>
- Francou, B. (2013). *Glaciares tropicales y cambio climático en los Andes*. Institut de Recherche pour le Développement (IRD).
- Georges, C. (2004). 20th-century glacier fluctuations in the tropical Cordillera Blanca, Peru. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 36(1), 100–107. [https://doi.org/10.1657/1523-0430\(2004\)036\[0100:TGFITT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1657/1523-0430(2004)036[0100:TGFITT]2.0.CO;2)

- Hall, D. K., Riggs, G. A., & Salomonson, V. V. (1995). Development of methods for mapping global snow cover using moderate resolution imaging spectroradiometer data. *Remote Sensing of Environment*, 54(2), 127–140. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(95\)00137-P](https://doi.org/10.1016/0034-4257(95)00137-P)
- Hall, D. K., & Riggs, G. A. (2011). *Normalised-difference snow index (NDSI)*. In V. P. Singh, P. Singh, & U. K. Haritashya (Eds.), *Encyclopedia of snow, ice and glaciers* (pp. 779–780). Springer. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2642-2_377
- Hirschmugl, M., Gallaun, H., & Schardt, M. (2017). Multitemporal remote sensing for environmental monitoring. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 6, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2017.02.001>
- IDEAM. (2018). *Monitoreo de glaciares colombianos 2013–2017*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IDEAM. (2024). *Estado de los glaciares colombianos y monitoreo de áreas glaciares*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IPCC. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Kaser, G., & Osmaston, H. (2002). *Tropical glaciers*. Cambridge University Press.
- Kaser, G., Georges, C., & Juen, I. (2003). Low-latitude glaciers and climate change. *EOS, Transactions American Geophysical Union*, 84(50), 581–588. <https://doi.org/10.1029/2003EO500002>
- Mark, B. G., Harrison, S. P., Spessa, A., New, M., Evans, D. J., & Helmens, K. F. (2005). Tropical snowline changes at the Last Glacial Maximum: A global assessment. *Quaternary International*, 138–139, 168–201. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2005.02.012>
- Maxwell, A. E., Warner, T. A., & Fang, F. (2018). Implementation of machine-learning classification in remote sensing: An applied review. *International Journal of Remote Sensing*, 39(9), 2784–2817. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1433343>

- Masiokas, M. H., Rabatel, A., Rivera, A., Ruiz, L., Pitte, P., & Ceballos, J. L. (2020). A review of the current state and recent changes of the Andean cryosphere. *Frontiers in Earth Science*, 8, 99. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00099>
- Mohammadi, B., Samadi, S., & Ahmadi, H. (2023). Snow cover extraction using NDSI and machine learning methods in mountainous regions. *GIScience & Remote Sensing*, 60(1), 1–19. <https://doi.org/10.1080/15481603.2023.2257978>
- Mountrakis, G., Im, J., & Ogole, C. (2011). Support vector machines in remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66(3), 247–259. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2010.11.001>
- Pal, M., & Mather, P. M. (2005). Support vector machines for classification in remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 26(5), 1007–1011. <https://doi.org/10.1080/01431160512331314083>
- Paul, F., Barrand, N. E., Baumann, S., Berthier, E., Bolch, T., Casey, K., Frey, H., Joshi, S. P., Konovalov, V., Bris, R. L., Mölg, N., Nosenko, G., Nuth, C., Pope, A., Racoviteanu, A., Rastner, P., Raup, B., Scharrer, K., Steffen, S., & Winsvold, S. (2013). On the accuracy of glacier outlines derived from remote-sensing data. *Annals of Glaciology*, 54(63), 171–182. <https://doi.org/10.3189/2013AoG63A296>
- Paul, F., Winsvold, S. H., Kääb, A., Nagler, T., & Schwaizer, G. (2016). *Glacier remote sensing using Sentinel-2. Part II: Mapping glacier extents and surface facies, and comparison to Landsat 8*. *Remote Sensing*, 8(7), 575. <https://doi.org/10.3390/rs8070575>
- Paul, F., Bolch, T., Kääb, A., Nagler, T., Nuth, C., & Rastner, P. (2020). *Satellite monitoring of glacier changes*. In J. F. Shroder (Ed.), *Treatise on geomorphology* (2nd ed., Vol. 8, pp. 367–391). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818234-5.00077-1>
- 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., & Wagnon, P. (2013). Current state of

- glaciers in the tropical Andes: A multi-century perspective on glacier evolution and climate change. *The Cryosphere*, 7(1), 81–102. <https://doi.org/10.5194/tc-7-81-2013>
- Racoviteanu, A. E., Arnaud, Y., Williams, M. W., & Ordoñez, J. (2019). Decadal changes in glacier parameters in the tropical Andes derived from remote sensing. *Remote Sensing*, 11(3), 1–20. <https://doi.org/10.3390/rs11030312>
- Vapnik, V. N. (1995). *The nature of statistical learning theory*. Springer.
- Veettil, B. K., & Kamp, U. (2017). Remote sensing of glaciers in the tropical Andes: A review. *International Journal of Remote Sensing*, 38(23), 7101–7137. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1371861>
- Vuille, M., Carey, M., Huggel, C., Buytaert, W., Rabatel, A., Jacobsen, D., Soruco, A., Villacis, M., Yarleque, C., Timm, O. E., Condom, T., Salzmann, N., & Sicart, J. E. (2018). Rapid decline of snow and ice in the tropical Andes: Impacts, uncertainties and challenges ahead. *Earth-Science Reviews*, 176, 195–213. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.09.019>
- Zemp, M., Huss, M., Thibert, E., Eckert, N., McNabb, R., Huber, J., Barandun, M., Machguth, H., Nussbaumer, S. U., Gärtner-Roer, I., Thomson, L., Paul, F., Maussion, F., Kutuzov, S., & Cogley, J. G. (2019). Global glacier mass changes and their contributions to sea-level rise from 1961 to 2016. *Nature*, 568(7752), 382–386. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1071-0>