



Evolución Glaciar: Un Estado del Arte de los cambios en la cobertura Glaciar en la Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia.

Walter André Torres Carazas, Geofísico.

Monografía para optar el título de especialista en medio ambiente y geoinformática

Asesor

Cesar Aníbal Olmos Severiche, Msc

Universidad de Antioquia
Departamento de Ingeniería
Especialización en Medio Ambiente y Geoinformática
Medellín
2024

Cita (Torres Carazas, 2024)

Referencia Torres Carazas, W. (2024). *Evolución Glaciar: Un Estado del Arte de los cambios en la cobertura Glaciar en la Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia*. [Trabajo de grado especialización].
Estilo APA 7 (2020) Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.



Especialización en Medio Ambiente y Geoinformática, Cohorte XV.



Biblioteca Carlos Gaviria Díaz

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.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 Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

A mi familia, por su infinito apoyo y amor.

Agradecimientos

Gracias a los profesores, colegas, compañeros de claro y especialmente a César
por su paciencia y disposición

Índice

Lista de tablas.....	5
Lista de figuras.....	6
Resumen	7
1. Introducción	9
2. Marco Teórico	11
2.2. Permafrost	11
2.3. Climatología.....	11
2.4. Cambio Climático.....	12
2.5. Hidrología de montaña.....	12
2.6. Ciclo Hidrológico.....	12
2.7. Ecología de alta montaña.....	12
2.8. Biodiversidad	13
2.9. Índice Diferencial Normalizado de Nieve (NDSI).....	13
2.10. Machine Learning.....	13
2.11. Random Forest.....	13
2.12. Teledetección.....	14
2.13. Clasificación supervisada	14
2.14. Sierra Nevada de Santa Marta	14
2.15. Revisión sistemática	15
2.16. Dominios de evaluación:	16
Para Higgins (2023), los dominios de evaluación están definidos por:.....	16
2.17. Herramienta de evaluación GRADE.....	17
3. Objetivos	18
3.1. Objetivo general.....	18
3.2. Objetivos específicos	18
4. Metodología	19
4.1. Identificación de la literatura relevante.....	19
4.2. Criterios de inclusión:	20
4.3. Criterios de exclusión.....	21
4.4. Selección de estudios.....	21
4.5. Extracción de datos	22
4.6. Evaluación de la calidad de los estudios.....	24
5. Resultados	26
5.1. Portafolio Bibliográfico.....	26
5.2. Características y aportes de los estudios.....	29
5.3. Tipos de Estudios y Métodos Utilizados.....	38
5.5. Vacíos de conocimiento	47
5.6. Análisis GRADE	50
6. Discusión	56
7. Conclusiones	61

Lista de tablas

Tabla 1. Portafolio bibliográfico (Fuente: Elaboración propia)	27
Tabla 2. Lista de artículos no considerados por no contar con los criterios de inclusión y exclusión expuestos. (Fuente: Elaboración propia).....	34
Tabla 3. Tabla de evaluación GRADE (Fuente: Elaboración propia).....	52

Lista de figuras

Figura 1. Mapa de ubicación de la SNSM. (Fuente: Elaboración propia)	15
Figura 2. Distribución temporal de las publicaciones del portafolio bibliográfico (Fuente: Elaboración propia)	31
Figura 3. Gráfico de palabras frecuentes analizando los 15 documentos (Fuente: elaboración propia).....	32
Figura 4. Red de Co-ocurrencias de palabras clave (Fuente: elaboración propia).....	33
Figura 5. Diagrama de Gantt sobre la variación glaciar en la SNSM. (Fuente: Elaboración propia).....	44
Figura 7. Mapas de elevación, pendientes y orientaciones de la SNSM. (Fuente: Elaboración propia).....	58

Resumen

La Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM), ubicada en el norte de Colombia, representa un ecosistema glaciar único por su baja latitud y elevada altitud, pero enfrenta un rápido retroceso de su cobertura glaciar debido al cambio climático (IDEAM, 2021). Este trabajo analiza la evolución de los glaciares de la SNSM mediante una revisión sistemática de la literatura científica, incluyendo 15 estudios que abarcan el periodo 1985-2023. A través del uso de teledetección, análisis multitemporal y modelos de clasificación supervisada, se identificaron tendencias preocupantes, como una disminución del 81% de la superficie glaciar en las últimas décadas, lo que amenaza los ecosistemas locales y la disponibilidad de recursos hídricos para las comunidades indígenas y rurales circundantes.

Los resultados indican que factores climáticos globales, como el calentamiento asociado al fenómeno ENSO, y elementos geográficos locales, como la altitud y la orientación de las pendientes, juegan un papel crítico en el ritmo de pérdida glaciar. Las tecnologías de teledetección, especialmente imágenes Landsat y Sentinel-2, fueron fundamentales para mapear cambios en la cobertura glaciar, mientras que herramientas como la clasificación supervisada y los modelos de bosques aleatorios ayudaron a mejorar la precisión de los resultados. Los estudios destacan que los glaciares de la SNSM están entre los más vulnerables de la región andina, con predicciones de desaparición total en las próximas décadas si no se implementan medidas de mitigación.

Se identificaron importantes vacíos de conocimiento, incluyendo la falta de datos climáticos de alta resolución, análisis integrados sobre impactos ecológicos y socioeconómicos, y modelos predictivos específicos para la región. Además, la insuficiente cobertura temporal y espacial de las observaciones satelitales limita la comprensión completa de los patrones de retroceso glaciar. La necesidad de enfoques interdisciplinarios, que integren ciencia climática, conservación de ecosistemas y perspectivas socioeconómicas, es crucial para diseñar estrategias efectivas de manejo y mitigación en la SNSM.

Palabras Clave: Sierra Nevada de Santa Marta, retroceso glaciar, cambio climático, teledetección, glaciares tropicales, modelado climático, revisión sistemática.

Abstract.

The Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM), located in northern Colombia, represents a unique glacial ecosystem due to its low latitude and high altitude, but faces a rapid retreat of its glacier cover due to climate change (IDEAM, 2021). This work analyzes the evolution of the SNSM glaciers through a systematic review of the scientific literature, including 15 studies covering the period 1985-2023. Through the use of remote sensing, multitemporal analysis, and supervised classification models, worrying trends are identified, such as an 81% decrease in glacier surface in recent decades, which threatens local ecosystems and the availability of water resources for the surrounding indigenous and rural communities.

The results indicate that global climatic factors, such as warming associated with the ENSO phenomenon, and local geographic elements, such as altitude and slope orientation, play a critical role in the rate of glacier loss. Remote sensing technologies, especially Landsat and Sentinel-2 imagery, were instrumental in mapping changes in glacier cover, while tools such as supervised classification and random forest models helped improve the accuracy of the results. The studies highlight that glaciers in the SNSM are among the most vulnerable in the Andean region, with predictions of total disappearance in the coming decades if mitigation measures are not implemented.

Important knowledge gaps were identified, including the lack of high-resolution climate data, integrated analyses on ecological and socioeconomic impacts, and region-specific predictive models. Furthermore, insufficient temporal and spatial coverage of satellite observations limits the full understanding of glacier retreat patterns. The need for interdisciplinary approaches, integrating climate science, ecosystem conservation, and socioeconomic perspectives, is crucial to design effective management and mitigation strategies in the SNSM.

Keywords: Sierra Nevada de Santa Marta, glacier retreat, climate change, remote sensing, tropical glaciers, climate modeling, systematic review.

1. Introducción

La Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM) en Colombia, es uno de los pocos lugares en el mundo donde se encuentran glaciares a tan baja latitud. Sin embargo, estos glaciares están experimentando un retroceso significativo (Díaz Plazas, 2021). Este fenómeno, que se está produciendo a nivel mundial, tiene implicaciones profundas, tanto para los ecosistemas como para las comunidades humanas que dependen de estos glaciares para el suministro de agua (IPCC, 2021).

El problema central que se aborda en este estudio es la disminución de la cobertura glaciar en la SNSM. Según el IDEAM, para el año 2020, el área de la SNSM se calculó en $5.81 \pm 0,17$ km² lo que representa una disminución significativa en comparación con mediciones anteriores (IDEAM, 2020). Esta disminución en la cobertura glaciar puede tener efectos devastadores en los ecosistemas locales y en las comunidades que dependen de estos glaciares para su suministro de agua (Buytaert et al., 2010).

Además, el retroceso glaciar puede ser un indicador de cambios climáticos más amplios que están ocurriendo a nivel global. Por lo tanto, es crucial entender la magnitud de este retroceso y las implicaciones que puede tener para el futuro de la SNSM y otras regiones similares en todo el mundo (IPCC, 2021).

A pesar de la importancia de este problema, revisiones de literatura preliminares muestran una falta de estudios detallados y actualizados que documenten el retroceso glaciar en la SNSM. Muchos de los estudios existentes se basan en datos que ya tienen varios años y pueden no reflejar las condiciones actuales (López-Morales et al., 2018). Las mencionadas revisiones de literatura a menudo se centran en un solo aspecto del problema, como la disminución de la cobertura glaciar, sin considerar otros factores relacionados, como los cambios en las precipitaciones o las temperaturas (Gutiérrez-Escobar et al., 2014).

Por lo tanto, surge una necesidad académica de realizar una revisión integral de la variación de la cobertura glaciar en la SNSM que tenga en cuenta la mayoría de estos factores. Tal revisión permitiría una mejor comprensión del problema y podría ayudar a informar las políticas y estrategias de conservación en el futuro. Además nos hace preguntar: ¿Cómo ha cambiado la cobertura glaciar en la Sierra Nevada de Santa Marta en los últimos años y cuáles son las implicaciones de estos cambios para los ecosistemas locales y las comunidades humanas?

2. Marco Teórico

Para una mejor comprensión del contexto del análisis del retroceso glaciar es importante exponer los siguientes conceptos:

2.1. Glaciología

La glaciología, definida de manera amplia, es el estudio científico del hielo en todas sus formas, incluyendo glaciares, nieve, hielo en la atmósfera, hielo en el suelo en regiones de permafrost, hielo marino, hielo fluvial, el hielo que crea problemas cuando se forma en las alas de los aviones, y el hielo que mantiene frescas las bebidas en una tarde de verano (Benn & Evans, 2010). Además, es una ciencia interdisciplinaria en la que muchas disciplinas científicas especializadas cumplen un rol, desde la geografía descriptiva hasta las matemáticas más abstractas (Paterson, 1994). Su objetivo es estudiar los aspectos teóricos de la 'mecánica del hielo' y la 'dinámica de las masas de hielo en un entorno geofísico' (Paterson, 1994).

2.2. Permafrost

El permafrost es una capa de suelo o roca que permanece congelada durante dos o más años consecutivos. En las regiones montañosas, el permafrost influye en la estabilidad del terreno y el ciclo hidrológico (French, 2007). El calentamiento global está provocando el descongelamiento del permafrost, lo que puede generar deslizamientos de tierra y liberar gases de efecto invernadero atrapados (French, 2007).

2.3. Climatología

La climatología es la ciencia que estudia el clima y los fenómenos meteorológicos a largo plazo. Abarca el análisis de patrones y tendencias del clima en diferentes regiones y épocas (Wallace & Hobbs, 2006). Este campo se encarga de medir y analizar variables atmosféricas como la temperatura, precipitación, humedad y presión atmosférica, con el fin de comprender la

variabilidad climática y sus impactos en el medio ambiente y la sociedad (Wallace & Hobbs, 2006).

2.4. Cambio Climático

El cambio climático se refiere a alteraciones significativas y duraderas en los patrones del clima, atribuibles tanto a procesos naturales como a la actividad humana. Este fenómeno incluye el calentamiento global, causado principalmente por el aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera (IPCC, 2014). Los efectos del cambio climático abarcan desde el aumento del nivel del mar hasta cambios en la frecuencia y severidad de eventos meteorológicos extremos.

2.5. Hidrología de montaña

La hidrología de montaña es una rama de la hidrología que se centra en el estudio de los procesos y sistemas hidrológicos en regiones montañosas. Esta subdisciplina examina cómo el agua se almacena, se mueve y se transforma en estos entornos, considerando factores como la topografía, la geología y el clima (Viviroli et al., 2007).

2.6. Ciclo Hidrológico

El ciclo hidrológico describe el movimiento continuo del agua sobre, debajo y encima de la superficie de la Tierra. En las montañas, este ciclo incluye la acumulación de nieve y hielo, la fusión y el escurrimiento, y la recarga de acuíferos (Barnett et al., 2005). Estos procesos son fundamentales para el suministro de agua dulce a las cuencas hidrográficas y las comunidades humanas y ecosistemas que dependen de ellas (Barnett et al., 2005).

2.7. Ecología de alta montaña

La ecología de alta montaña es una rama de la ecología que se ocupa del estudio de los ecosistemas en altitudes elevadas, donde las condiciones

ambientales extremas crean hábitats únicos. Los factores como la temperatura, la altitud, la radiación solar y la disponibilidad de agua moldean la estructura y función de estos ecosistemas (Körner, 2003).

2.8. Biodiversidad

La biodiversidad en las zonas de alta montaña es reconocida por su adaptación a condiciones extremas. Las especies vegetales y animales desarrollan estrategias únicas para sobrevivir en entornos con baja presión atmosférica, temperaturas frías y radiación ultravioleta intensa (Myers et al., 2000). La Sierra Nevada de Santa Marta, por ejemplo, alberga una biodiversidad excepcional que incluye especies endémicas adaptadas a estas condiciones (Myers et al., 2000).

2.9. Índice Diferencial Normalizado de Nieve (NDSI)

El NDSI es una medida utilizada en teledetección para detectar y mapear áreas cubiertas por nieve a partir de imágenes satelitales. Se calcula como la diferencia normalizada entre la banda verde del espectro y la banda infrarroja de onda corta (SWIR). Es útil para separar la nieve de la vegetación, suelos y litología (U.S. Geological Survey, 2022).

2.10. Machine Learning

El Machine Learning es una subdisciplina de la inteligencia artificial que se centra en el desarrollo de algoritmos que permiten a los ordenadores aprender a partir de datos y realizar predicciones o tomar decisiones sin estar explícitamente programados para ello. Se divide en tres categorías principales: aprendizaje supervisado, no supervisado y por refuerzo (IBM, 2023).

2.11. Random Forest

El Random Forest es un método de aprendizaje automático basado en árboles de decisión. Consiste en la creación de múltiples árboles de decisión y la

combinación de sus predicciones para mejorar la precisión y reducir el sobreajuste (Breiman, 2001).

2.12. Teledetección

La Teledetección es la ciencia y tecnología de obtener información sobre objetos o fenómenos sin contacto físico directo con ellos, utilizando sensores remotos que detectan y registran la radiación reflejada o emitida por estos objetos o fenómenos (Jensen, 2007).

2.13. Clasificación supervisada

La Clasificación Supervisada es un tipo de aprendizaje automático en el que el modelo se entrena con un conjunto de datos etiquetados, es decir, datos que ya tienen una respuesta conocida. El modelo aprende a asociar características de los datos con las etiquetas correspondientes (Hastie, Tibshirani, & Friedman, 2009).

2.14. Sierra Nevada de Santa Marta

La SNSM es un lugar de gran interés para los estudios glaciares debido a su ubicación única y la presencia de glaciares a baja latitud. La SNSM es un macizo montañoso aislado ubicado en el norte de Colombia, separado de la cordillera de los Andes. Este sistema montañoso se eleva abruptamente desde las costas del mar Caribe hasta alcanzar altitudes de hasta 5,775 metros sobre el nivel del mar, siendo el pico Cristóbal Colón su punto más alto (Bolaño et al., 2020). Geológicamente, la SNSM es una de las regiones más complejas de los Andes del Norte. Su formación se remonta al periodo Cretácico, con un basamento metamórfico que data del Pre-Devónico, hace aproximadamente 400 millones de años. La composición geológica incluye rocas ígneas y metamórficas, lo que refleja una historia tectónica dinámica y variada (Gutiérrez et al, 2014).

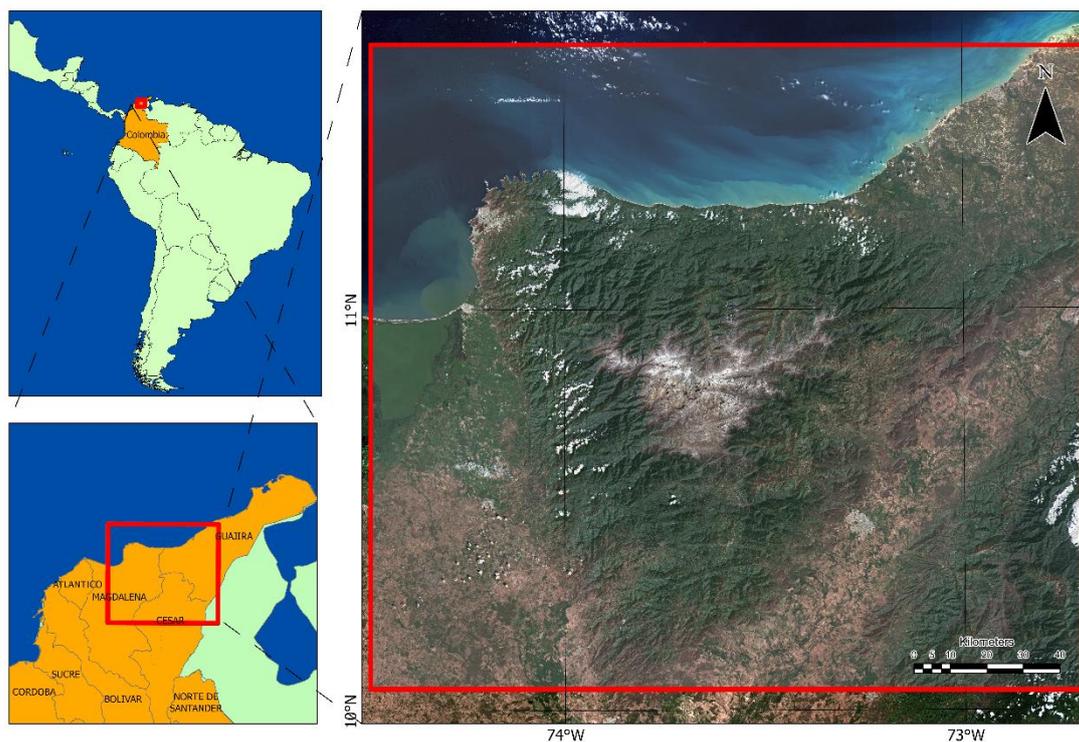


Figura 1. Mapa de ubicación de la SNSM. (Fuente: Elaboración propia)

Entre sus características únicas, destaca su aislamiento geográfico, lo que ha permitido la evolución de una biodiversidad excepcional y una variedad de ecosistemas que van desde selvas tropicales hasta glaciares perpetuos, pero que también podría influir en las tasas de pérdida glacial. Además, la Sierra es el hogar de comunidades indígenas como los Kogui, Arhuaco, Kankuamo y Wiwa, quienes consideran esta región como el "corazón del mundo" (Pérez, 2021).

2.15. Revisión sistemática

Una revisión sistemática es un proceso estructurado, organizado y transparente para identificar, seleccionar y valorar críticamente estudios de investigación relevantes con el fin de responder a una pregunta de investigación específica (Higgins, 2023). Este tipo de revisión aplica criterios predefinidos para seleccionar los estudios, evaluar su calidad y sintetizar sus resultados, garantizando así que la revisión sea exhaustiva y reproducible (Higgins, 2023). Las revisiones sistemáticas son esenciales para fundamentar las prácticas basadas

en la evidencia y las decisiones políticas, ya que consolidan los hallazgos de numerosos estudios y ofrecen un alto nivel de evidencia (Higgins, 2023).

2.16. Dominios de evaluación:

Para Higgins (2023), los dominios de evaluación están definidos por:

- **Riesgo de sesgo:** Evalúa la posibilidad de sesgos en el diseño y la realización del estudio.
- **Inconsistencia:** Examina la variabilidad en los resultados entre los estudios incluidos.
- **Imprecisión:** Considera la confianza en los resultados debido a la amplitud de los intervalos de confianza o la cantidad de participantes en los estudios.
- **Indirectividad:** Evalúa si los resultados de los estudios son aplicables a la población de interés y al contexto de la Sierra Nevada de Santa Marta.
- **Sesgo de publicación:** Considera la posibilidad de que los resultados estén sesgados debido a la publicación selectiva de estudios.

Asignar niveles de calidad a cada dominio

Según Higgins (2023) los niveles de calidad de cada dominio son:

- a) **Riesgo de sesgo:** Se califica como alta, moderada, baja o muy baja en función de la probabilidad de sesgo en los estudios incluidos. Por ejemplo, estudios con un diseño de cohorte bien realizado tendrían un riesgo de sesgo bajo.
- b) **Inconsistencia:** Se califica en función de la consistencia de los resultados entre los estudios. Si hay una alta consistencia entre los estudios, se asignaría una calidad alta.

- c) **Imprecisión:** Se califica en función de la confianza en los resultados de los estudios. Si los intervalos de confianza son estrechos y/o hay un gran número de participantes, se asignaría una calidad alta.
- d) **Indirectividad:** Se califica en función de la aplicabilidad de los resultados a la población y contexto de interés. Si los estudios incluidos son relevantes para la Sierra Nevada de Santa Marta, se asignaría una calidad alta.
- e) **Sesgo de publicación:** Se califica en función de la probabilidad de sesgo debido a la publicación selectiva de estudios. Si se ha realizado una búsqueda exhaustiva y se han incluido todos los estudios relevantes, se asignaría una calidad alta.

2.17. Herramienta de evaluación GRADE

La herramienta de evaluación GRADE (Grading of Recommendations, Assessment, Development and Evaluation) es un marco prominente para evaluar la efectividad de las revisiones sistemáticas (Schünemann et al., 2013). Esta herramienta define la calidad de un cuerpo de evidencia como el grado en el que se puede tener confianza en que una estimación de efecto o asociación está cerca de la cantidad de interés específico (Guyatt et al., 2008).

3. Objetivos

3.1. Objetivo general

Analizar el cambio de la cobertura glaciar en la Sierra Nevada de Santa Marta – Colombia a partir de una revisión sistémica de literatura científica.

3.2. Objetivos específicos

1. Identificar un portafolio bibliográfico sobre las investigaciones científicas que abordan la evolución y el retroceso glaciar en la Sierra Nevada de Santa Marta.
2. Describir las características, aportes e impactos de los estudios científicos a partir de un análisis bibliométrico.
3. Identificar los vacíos del conocimiento sobre la evolución y el retroceso glaciar en la Sierra Nevada de Santa Marta mediante un análisis sistémico.
4. Verificar la calidad y la fiabilidad de los estudios a partir de la herramienta de evaluación de la calidad (GRADE) para incluirlos en la revisión.

4. Metodología

4.1. Identificación de la literatura relevante

La identificación de la literatura relevante es el primer paso en una revisión sistemática. Este proceso implica realizar una búsqueda exhaustiva en bases de datos científicas reconocidas utilizando palabras clave relevantes. A continuación se revelan las bases de datos científicas que se utilizaron para la búsqueda:

- Google Scholar
- ScienceDirect
- PubMed
- ResearchGate
- JSTOR
- SpringerLink
- IEEE Xplore
- Wiley Online Library
- Scopus
- Dialnet
- Scielo
- Academia.edu
- PLOS ONE
- Nature
- Science
- MDPI
- Earth and Space Science Open Archive (ESSOAr)
- AGU Publications
- Copernicus Publications
- Frontiers in Earth Science
- Taylor & Francis Online

- Repositorios de diversas universidades de Colombia

La búsqueda se realizó sin restricciones de fecha para capturar toda la literatura relevante disponible. Las palabras clave se seleccionaron para capturar la gama completa de literatura relevante para el tema de estudio. Se utilizaron las siguientes combinaciones, tanto e inglés como en español:

“Glaciar” AND “Santa Marta”

“Glaciar” AND “Colombia”

La decisión de incluir repositorios de universidades obedeció a la existencia de un vacío de conocimiento respecto de la evolución glaciar de la SNSM en revistas indexadas. El asesor externo hizo las veces de revisor, para el apoyo en la toma de decisiones sobre la inclusión y exclusión de los trabajos seleccionados, además de otros aspectos metodológicos.

4.2. Criterios de inclusión:

- a) **Estudios primarios:** Se incluyeron principalmente estudios primarios que abordaran específicamente la evolución y el retroceso glaciar en la SNSM. Esto garantizó el análisis directo de los datos y resultados de investigación original relacionados con el tema de interés.
- b) **Investigaciones publicadas en idioma español o inglés:** Se incluyeron estudios que estuviesen disponibles en idioma español, portugués o inglés. Esto aseguró que los revisores y lectores pudiesen acceder y comprender completamente el contenido de los estudios seleccionados.
- c) **Estudios realizados en la Sierra Nevada de Santa Marta:** Se incluyeron estudios que hayan sido realizados en la región específica de la SNSM en Colombia. Esto permite que los datos y resultados sean relevantes para el contexto geográfico en cuestión.

- d) **Investigaciones sobre la evolución y el retroceso glaciar:** Se incluyeron estudios que abordaban la evolución y el retroceso glaciar en la Sierra Nevada de Santa Marta, ya sea mediante análisis de datos históricos, mediciones actuales, modelado climático, o cualquier otro enfoque relacionado con el tema.

4.3. Criterios de exclusión:

- a) **Revisiones bibliográficas y metaanálisis:** Se excluyeron estudios que fuesen revisiones bibliográficas o metaanálisis, ya que estos no proporcionan datos originales sobre la evolución glaciar en la SNSM y podrían introducir sesgos en la revisión.
- b) **Estudios no relacionados con la glaciología:** Se excluyeron estudios que no estuviesen directamente relacionados con la glaciología, el cambio climático o la geografía física de la SNSM, ya que no contribuirían al objetivo específico de la revisión.
- c) **Estudios no científicos:** Se excluyeron estudios que no fuesen de naturaleza científica, como artículos de opinión, informes no académicos o noticias, ya que estos pueden carecer del rigor metodológico y la fiabilidad necesarios para ser considerados en la revisión.
- d) **Estudios sin acceso completo:** Se excluyeron estudios para los cuales no se pueda acceder al texto completo, ya que esto podría dificultar la revisión y la extracción de datos de manera adecuada.

4.4. Selección de estudios

Una vez identificados los estudios potencialmente relevantes, se realizó una selección basada en los títulos y resúmenes. Los estudios que parecían relevantes se examinaron en detalle para determinar si cumplen con los criterios de inclusión. Los criterios de inclusión se definieron antes de la búsqueda e incluían

aspectos como el enfoque del estudio (por ejemplo, debe centrarse en la evolución y el retroceso glaciar), la ubicación del estudio (por ejemplo, debe ser en la Sierra Nevada de Santa Marta), entre otros.

4.5. Extracción de datos

Para los estudios seleccionados, se extrajeron datos clave. Estos datos fueron fundamentales para formar el portafolio bibliográfico en donde se incluían datos desde el título, la revista o el repositorio. Esto constituya el análisis bibliométrico, parte fundamental del estudio. La extracción de datos se realizó de manera sistemática utilizando un formulario de extracción de datos predefinido. Se diseñó una hoja de extracción de datos que incluya variables relevantes como la ubicación del estudio, los métodos utilizados, los principales hallazgos y las conclusiones. Esta hoja sirvió como guía para la extracción sistemática de información de cada estudio seleccionado. Este formulario garantiza que se recopile la misma información de cada estudio, lo que facilitará la comparación y síntesis de los resultados. Se llevó a cabo a través de estos pasos:

4.5.1. Desarrollar una hoja de extracción de datos: Una hoja de extracción de datos proporcionó una estructura organizada para recopilar información relevante de cada estudio incluido en la revisión. Ayuda a garantizar que se capturen todos los datos necesarios de manera sistemática y que se pueda comparar fácilmente entre los estudios.

4.5.2. Identificar las variables clave a extraer: Es importante identificar las variables clave que se necesitan extraer de cada estudio para responder a los objetivos de la revisión. Estas variables pueden incluir información sobre la ubicación del estudio, los métodos utilizados, los principales hallazgos y las conclusiones.

4.5.3. Diseñar categorías y subcategorías en la hoja de extracción de datos: Organizar las variables en categorías y subcategorías ayudó a

estructurar la hoja de extracción de datos de manera lógica y facilita la identificación y extracción de información específica durante el proceso de revisión.

4.5.4. Revisar y ajustar la hoja de extracción de datos: Antes de comenzar la extracción de datos, fue necesario revisar la hoja de extracción de datos para garantizar que capturara todas las variables relevantes de manera clara y completa.

4.5.5. Extracción de datos de cada estudio incluido: Este fue el paso central en el proceso de revisión, donde se extrajeron datos relevantes de cada estudio incluido en la revisión utilizando la hoja de extracción de datos diseñada previamente. Es un proceso sistemático y cuidadoso porque garantiza la precisión y la exhaustividad de la extracción de datos.

4.5.6. Verificar la consistencia en la extracción de datos: Después de completar la extracción de datos, se verificó la consistencia entre los revisores para asegurar que se haya extraído la misma información de manera precisa y completa en todos los estudios incluidos.

4.5.9. Finalizar la hoja de extracción de datos: Una vez completada la extracción de datos para todos los estudios incluidos en la revisión, se completó la hoja de extracción de datos. Esta hoja contiene toda la información relevante extraída de los estudios y sirvió como base para el análisis y la síntesis de los resultados.

4.5.10. Almacenar y organizar los datos extraídos: Los datos extraídos se almacenaron de manera organizada para facilitar el análisis y la síntesis de los resultados de la revisión. Esto implicó la creación de una hoja de cálculo para almacenar los datos extraídos de manera sistemática.

4.5.11. Utilizar los datos extraídos en el análisis y la síntesis de resultados: Los datos extraídos se utilizaron en el análisis y la síntesis de

resultados de la revisión para responder a los objetivos planteados y generar conclusiones significativas. Los datos se usaron de manera rigurosa y transparente para garantizar la validez y la fiabilidad de los resultados de la revisión.

4.6. Evaluación de la calidad de los estudios

Se utilizó una herramienta de evaluación de la calidad para evaluar la calidad y la fiabilidad de los estudios incluidos en la revisión. La herramienta señalada es la Evaluación de la Calidad de la Evidencia (GRADE), que ha demostrado ser una opción adecuada debido que la revisión incluye una variedad de diseños de estudio. La evaluación de la calidad ayudó a identificar los estudios de alta calidad que proporcionan evidencia confiable.

4.6.1. Resumir la calidad de la evidencia

Se resume la calidad de la evidencia para cada resultado de interés considerando los diferentes dominios de evaluación. Esto se hace utilizando categorías como "alta", "moderada", "baja" o "muy baja".

4.6.2. Interpretación de los resultados

- La calidad "alta" de la evidencia indica que se tiene mucha confianza en los resultados.
- La calidad "moderada" de la evidencia indica que tenemos cierta confianza en los resultados, pero es posible que haya algunas limitaciones.
- La calidad "baja" de la evidencia indica que hay una incertidumbre significativa en los resultados debido a limitaciones en los estudios incluidos.

- La calidad "muy baja" de la evidencia indica que tenemos muy poca confianza en los resultados debido a múltiples limitaciones o a la falta de estudios de calidad.

4.6.3. Utilización de la evaluación en la síntesis y conclusiones

La evaluación de la calidad de la evidencia se utilizó para informar las conclusiones de la revisión y para destacar la confianza en los resultados. Se priorizaron los resultados de alta calidad en la interpretación y las recomendaciones.

4.6.4. Síntesis de la literatura

Finalmente, se sintetizaron los resultados de los estudios seleccionados. Esto implicó la combinación de resultados cuantitativos o la realización de una síntesis cualitativa de los hallazgos. Se identificaron las tendencias y los patrones en la literatura, y se destacaron las áreas de acuerdo y desacuerdo. Esta síntesis proporcionó una visión completa y actualizada de la situación de los glaciares en la SNSM, basándose en la literatura científica existente. Con esta metodología se logra alcanzar los objetivos específicos y generales que se plantearon inicialmente.

5. Resultados

5.1. Portafolio Bibliográfico

En esta revisión, se seleccionaron estudios aplicando los criterios de inclusión y exclusión rigurosos mencionados en el capítulo anterior que garantizaron la elección temática, geográfica y temporal de los trabajos, en el contexto de la SNSM. Se descartaron otros artículos que no cumplían con los requerimientos mínimos establecidos por los criterios correspondientes. Como resultado, se recopilaron 15 documentos, que analizan, directa o indirectamente, la evolución y el retroceso glaciar en la región mencionada, los estudios abarcan un periodo que va desde 2006 al 2023. Estos estudios están publicados en revistas especializadas y repositorios de universidades, tanto colombianas como internacionales. En la Tabla 1, se detallan la distribución de los tipos de estudios, revistas, repositorios y autores.

Tabla 1. Portafolio bibliográfico (Fuente: Elaboración propia)

Tipo de publicación	Título	Revista / Repositorio	Autor	Año
Paper	ENSO and Light-Absorbing Impurities and Their Impact on Snow Albedo in the Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia	Geosciences	Tomás R. Bolaño-Ortiz. Et. Al.	2020
Paper	Topographic control of glacier changes since the end of the Little Ice Age in the Sierra Nevada de Santa Marta mountains, Colombia	Journal of South American Earth Sciences	Juan I. López-Moreno. Et. Al.	2020
Tesis	Análisis Multitemporal del Retroceso Glaciar en la Sierra Nevada de Santa Marta - Colombia para los Periodos 1986, 1996, 2007 y 2014	Universidad Distrital Francisco José de Caldas	Paéz González, Blanca Lucila. García, Carlos Andrés	2016
Tesis	Análisis Geoespacial para la determinación del deshielo de la Sierra nevada de Santa Marta mediante imágenes satelitales Landsat para los periodos (1990, 2000, 2010 y 2020)	Unidades Tecnológicas de Santander	Dago Alberto Galvis Rincón. Jeison David Pedraza Castillo.	2022
Tesis	Análisis multitemporal del cambio del área de cobertura glaciar sobre la Sierra Nevada de Santa Marta en los años 2014 y 2018	Universidad Militar Nueva Granada	Alex Fabián Ramos Moreno	2019
Tesis	Estimación del retroceso glaciar en la Sierra Nevada De Santa Marta para el periodo 2000-2020 a partir de imágenes Landsat	Universidad Militar Nueva Granada	Fernando Andrés Díaz Plazas	2021
Tesis	Determinación del factor de cambio en el glaciar de la Sierra Nevada De Santa Marta, a partir de regiones en movimiento en bases de datos espacio temporales.	Universidad Distrital Francisco José de Caldas	Camilo Andres Porras Martin	2023
Tesis	Análisis de la influencia de la cobertura del bosque y la deforestación sobre el rendimiento hídrico en la Sierra Nevada De Santa Marta	Pontificia Universidad Javeriana de Colombia	Nycols Badio Pacheco	2021
Tesis	Análisis de la Evolución de Dos Nevados en Colombia a partir de Sensores Remotos	Universidad de Los Andes	Valeria Mejía Cabrera	2022

Tipo de publicación	Título	Revista / Repositorio	Autor	Año
Tesis	Estimación de los cambios del glaciar en la Sierra Nevada De Santa Marta asociados al deshielo en el periodo de 2016 a 2022.	Universidad de Manizales	Mónica Rocio Correal Otálora	2022
Paper	Variações de área das geleiras da Colômbia e da Venezuela entre 1985 e 2015, com dados de sensoriamento remoto.	São Paulo, UNESP, Geociências	Isabel Cristiane Rekowsky	2018
Paper	Representación y análisis del retroceso glaciar de la Sierra Nevada de Santa Marta a partir de trayectorias de regiones en movimiento	RISTI	Camilo Andres Porras Martin	2021
Tesis	Natural resource conservation and management in the Sierra Nevada Of Santa Marta	Universidad de Los Andes	Eduardo Uribe Botero	2006
Tesis	Modelo de Deformación de la Sierra Nevada de Santa Marta a través del Radar Interferométrico de Apertura Sintética (InSAR)	Universidad de Los Andes	María Alejandra Moreno Soler	2017
Tesis	Análisis multitemporal del retroceso glaciar de los nevados de Colombia a través de la utilización de herramientas SIG	Universidad Militar Nueva Granada	Jenny Lorena Leiva Leiva	2018

De la Tabla 1 se destaca que de los estudios seleccionados solo 4 corresponden a artículos científicos y 11 a tesis de grado y posgrado.

5.2. Características y aportes de los estudios.

Para este trabajo, las publicaciones incluidas se organizaron en dos grandes grupos: artículos científicos y tesis (pregrado y maestría); cada uno aporta diferentes perspectivas, complementarias, a la investigación, aunque tienen diferencias en métodos, alcance y enfoques.

Como primer característica a recalcar, está la temporal, en donde la evolución del alcance de la investigación sobre el retroceso de los glaciares en la SNSM muestra un continuo aumento del interés, impulsado, principalmente por el contexto del cambio climático y el aumento de la disponibilidad de datos de sensores remotos. Durante los primeros 15 años del período analizado (1985-2000), las publicaciones fueron escasas, principalmente descriptivas y limitadas por la falta de técnicas avanzadas de seguimiento. Los artículos científicos escogidos se asociaron a revistas prestigiosas de geociencias y climatología y, por lo tanto, obtuvieron una gran visibilidad dentro de la comunidad investigadora. Por ejemplo, el artículo *“ENSO y las impurezas absorbentes de luz y su influencia en el albedo de la nieve en la Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia”* de Bolaño-Ortiz et al. (2020) fue publicado en *Geosciences*, una revista conocida por su riguroso proceso de revisión. Estos estudios emplearon análisis detallados, integración de modelos climáticos y procesamiento de imágenes satelitales de alta resolución.

Por su parte, las tesis suelen proporcionar un estudio más completo que aborda un caso específico. Por ejemplo la tesis titulada *“Análisis multitemporal del retroceso de los glaciares en la Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia, para los periodos 1986, 1996, 2007 y 2014”* de Páez González (2016); hizo importantes aportes al análisis de la dinámica de los glaciares mediante imágenes satelitales tomadas a intervalos de 10 años.

Las universidades colombianas han sido relevantes en la producción de tesis sobre el tema y la zona de interés, destacándose instituciones como la Universidad Militar Nueva Granada y la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, cuyos estudios aplican tecnologías de sensores remotos y análisis geoespaciales. Estas investigaciones, en su mayoría, se apoyan en imágenes Landsat para evaluar los cambios en la cobertura glaciar, proporcionando datos valiosos sobre su retroceso.

La investigación de universidades extranjeras también está enriqueciendo el análisis. Por ejemplo, el estudio "*Variações de Área das Geleiras da Colombia e da Venezuela entre 1985 e 2015, com dados de sensorialimento Remote*" de Rekowsky (2018), publicado por la Universidad Estadual Paulista de Brasil (UNESP), utilizó datos satelitales para cuantificar el retroceso de los glaciares en comparación con otros países andinos regionales.

Un aspecto importante en la identificación del portafolio bibliográfico es la distribución temporal de las publicaciones como se logra apreciar en la Figura 2. El interés científico en la SNSM se ha incrementado en los últimos 20 años, impulsado por la aceleración del cambio climático y el retroceso de los glaciares a nivel global (IPCC, 2021). Entre 2006 y 2023, se pueden identificar dos periodos específicos: 2016-2019 y 2020-2023. Durante el primer periodo, los estudios se enfocaron en el análisis multitemporal de la cobertura glaciar, como en la tesis de Ramos Moreno (2019) titulada: "*Análisis multitemporal del cambio del área de cobertura glaciar sobre la SNSM en los años 2014 y 2018*". Mientras tanto, en el segundo periodo, los estudios recientes han aplicado imágenes satelitales para evaluar el retroceso glaciar posterior a 2020.

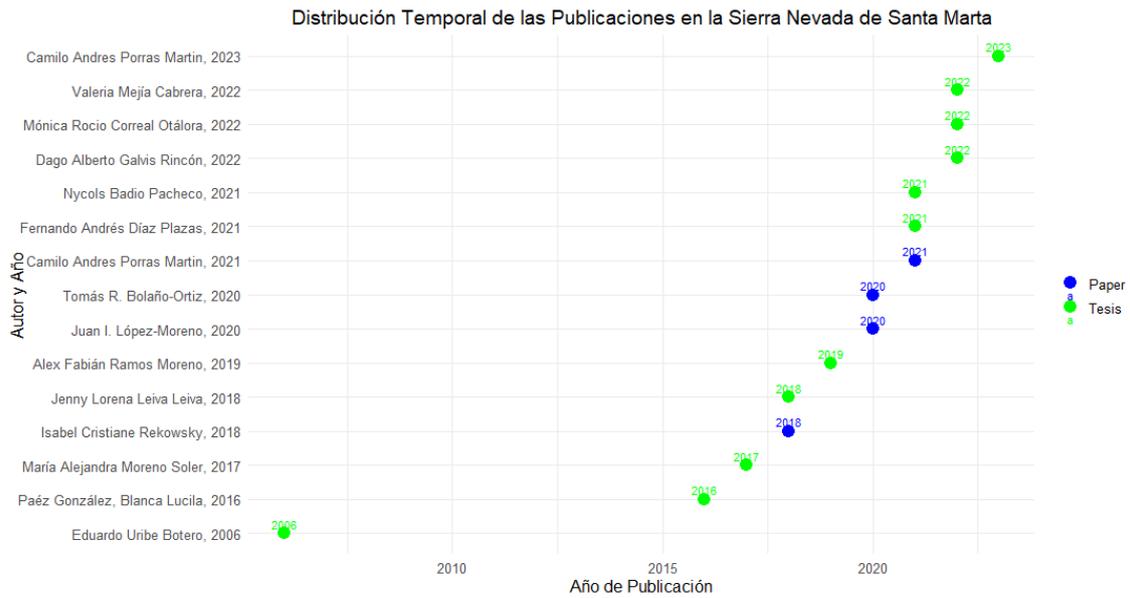


Figura 2. Distribución temporal de las publicaciones del portafolio bibliográfico (Fuente: Elaboración propia).

El aumento en el número de estudios recientes también se puede debe al mayor acceso a tecnologías geoespaciales avanzadas y al interés en analizar el impacto del calentamiento global en zonas tropicales. La publicación de López-Moreno et al. (2020), “*Topographic control of glacier changes since the end of the Little Ice Age in the Sierra Nevada de Santa Marta*”, es un ejemplo de cómo los avances en modelado topográfico contribuyen a una comprensión más precisa de los factores que inciden en la dinámica de los glaciares.

Al realizar el estudio bibliométrico completo se obtuvo la Figura 3.

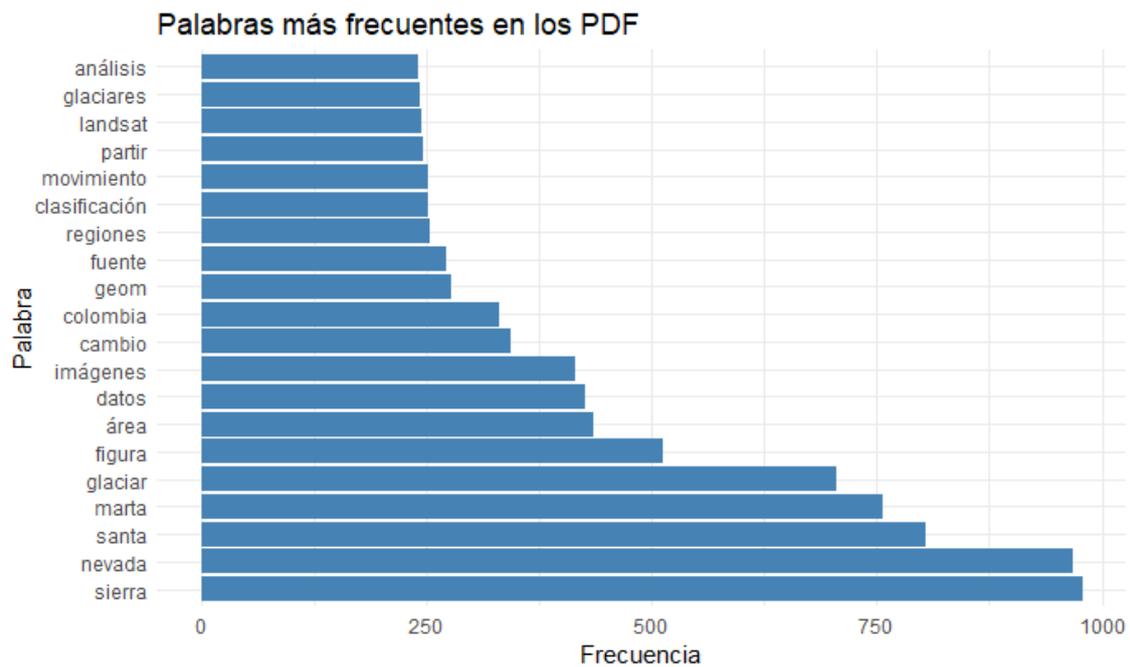


Figura 3. Gráfico de palabras frecuentes analizando los 15 documentos (Fuente: elaboración propia).

El análisis bibliométrico arroja que las palabras más frecuentes, como "sierra", "nevada", "santa", "marta" y "glaciar", indican un enfoque significativo en esta región específica y su dinámica glaciar. Sugiriendo que los estudios están altamente concentrados en entender los cambios glaciares en esta área particular (SNSM). Además, La alta frecuencia de términos como "datos", "imágenes", "cambio" y "clasificación" sugiere que los estudios se basan en análisis de datos cuantitativos y cualitativos, utilizando imágenes satelitales (como se indica con la palabra "Landsat") para monitorear y clasificar los cambios en los glaciares. Esto implica un uso extensivo de tecnologías de teledetección y análisis multitemporal como se puede ver en la Figura 4.

Red de Co-ocurrencias de Palabras Clave (sin stopwords)

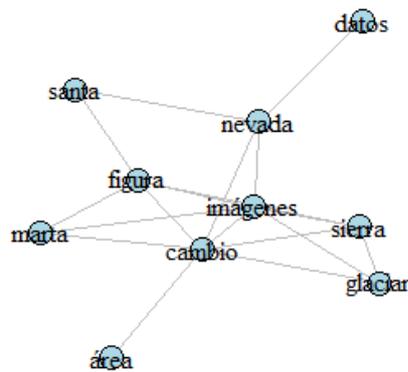


Figura 4. Red de Co-ocurrencias de palabras clave (Fuente: elaboración propia).

Adicionalmente, hubo varias publicaciones que por no cumplir con los criterios de inclusión y exclusión mencionados en capítulos anteriores, fueron descartados. Dichas publicaciones se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Lista de artículos no considerados por no contar con los criterios de inclusión y exclusión expuestos. (Fuente: Elaboración propia)

Año	Título	Autor	Revista/Universidad	Razón por la que no se tomó en cuenta
2006	Fast shrinkage of tropical glaciers in Colombia	Ceballos, J. L., Euscátegui, C., Ramírez, J., Cañon, M., Huggel, C., Haeberli, W., & Machguth, H.	Annals of Glaciology	No da una estimación de variación glaciár
2005	Last Glacial Maximum equilibrium line altitudes in the circum-Caribbean (Mexico, Guatemala, Costa Rica, Colombia, and Venezuela)	Lachniet, M. S., & Vazquez-Selem, L.	Quaternary International	No se ubica en la SNSM
2011	Vertical tectonics at a continental crust-oceanic plateau plate boundary zone: Fission track thermochronology of the Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia	Villagómez, D., Spikings, R., Mora, A., Guzmán, G., Ojeda, G., Cortés, E., & Van Der Lelij, R.	Tectonics	No da una estimación de variación glaciár
2013	Characterization of recent glacier decline in the Cordillera Real by LANDSAT, ALOS, and ASTER data	Liu, T., Kinouchi, T., & Ledezma, F.	Remote Sensing of Environment	No da una estimación de variación glaciár
2017	Glacier monitoring and glacier-climate interactions in the tropical Andes: A review	Kozhikkodan Veettil, B., Wang, S., Florêncio de Souza, S., Bremer, U. F., & Simões, J. C.	Journal of South American Earth Sciences	Es una revisión sistemática
2017	Water Distribution System of Santa Marta city, Colombia	Londoño, L., Segrera, J., & Jaramillo, M.	Procedia Engineering	No da una estimación de variación glaciár

Año	Título	Autor	Revista/Universidad	Razón por la que no se tomó en cuenta
2017	Realidades sociales, ambientales y culturales de las comunidades indígenas en La Sierra Nevada de Santa Marta	Huertas Díaz, O., Esmeral Ariza, S. J., & Sánchez Fontalvo, I. M.	Producción + Limpia	No toca el tema glaciar
2018	The geochemistry and geochronology of Early Jurassic igneous rocks from the Sierra Nevada de Santa Marta, NW Colombia, and tectono-magmatic implications	Quandt, D., Trumbull, R. B., Altenberger, U., Cardona, A., Romer, R. L., Bayona, G., Ducea, M., Valencia, V., Vásquez, M., & Cortes, E.	Journal of South American Earth Sciences	No toca el tema glaciar
2021	Hydropower under climate uncertainty: Characterizing the usable capacity of Brazilian, Colombian and Peruvian power plants under climate scenarios	Caceres, A. L., Jaramillo, P., Matthews, H. S., Samaras, C., & Nijssen, B.	Energy for Sustainable Development	No toca el tema glaciar
2021	Vulnerability assessment of Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia: World's most irreplaceable nature reserve	Duran-Izquierdo, M., & Olivero-Verbel, J.	Global Ecology and Conservation	No da una estimación de variación glaciar
2021	Inter-visibility between settlements in pre-Hispanic Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia: The relation between hierarchy and control of distant communications	Mazuera, E., & Hudson, R.	Journal of Archaeological Science	No toca el tema glaciar
2021	Spatial and temporal changes of dissolved oxygen in waters of the Pajarales complex, Ciénaga Grande de Santa Marta: Two decades of monitoring	Espinosa-Díaz, L. F., Zapata-Rey, Y. T., Ibarra-Gutierrez, K., & Bernal, C. A.	Science of the Total Environment	No da una estimación de variación glaciar.

Año	Título	Autor	Revista/Universidad	Razón por la que no se tomó en cuenta
2021	Keeping people in the loop: Socioeconomic valuation of dry forest ecosystem services in the Colombian Caribbean region	Pérez-Sánchez, D., Montes, M., Cardona-Almeida, C., Vargas-Marín, L. A., Enríquez-Acevedo, T., & Suarez, A.	Journal of Arid Environments	No toca el tema glaciar
2022	Community-based tourism, social capital, and governance of post-conflict rural tourism destinations: the case of Minca, Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia	Díaz Rocca, L. H., & Zielinski, S.	Tourism Management Perspectives	No toca el tema glaciar
2022	Black carbon, organic carbon, and mineral dust in South American tropical glaciers: A review	Gilardoni, S., Di Mauro, B., & Bonasoni, P.	Global and Planetary Change	Es una revisión sistemática
2022	Assessment of livestock greenhouse gases in Colombia between 1995 and 2015	Garrido, A. P., Tovar Bernal, F., Fontanilla, J. D., Camargo Caicedo, Y., & Vélez-Pereira, A. M.	Heliyon	No da una estimación de variación glaciar
2022	Water sufficiency for cacao production in the Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM) region, Colombia	Valencia, J., Frankenberger, J., Cherkauer, K., Martín-López, J. M., Monserrate, F., & da Silva, M.	Journal of Hydrology: Regional Studies	No da una estimación de variación glaciar
2022	The Sierra Nevada de Santa Marta (Colombia) and Nevado de Famatina (Argentina): The effects of tectonic syntaxis on the topography of the Andes	Rossello, E. A., & Gallardo, A. H.	Journal of Structural Geology	No toca el tema glaciar
2022	Evaluación del retroceso glaciar de la Sierra Nevada del Cocuy, Colombia a partir de la clasificación de imágenes multisensor	Molano, S. M., Cardenas, D. P., Gómez, H. S., Alvarado, D. M., Galindo, A. F., Sanabria, J. F., & Gómez-Neita, J. S.	[Documento sin publicar]	No se ubica en la SNSM

Año	Título	Autor	Revista/Universidad	Razón por la que no se tomó en cuenta
2023	Estimación actual y futura del retroceso glaciar del nevado Cayambe, en Ecuador	Cabrera Montenegro, E. B., Vega Tamba, J. C., & Jácome Aguirre, G. A.	SATHIRI	No se ubica en la SNSM
2024	The Sierra Nevada de Santa Marta, a dynamic topography	Prieto, G. A.	Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales	No toca el tema glaciar

5.3. Tipos de Estudios y Métodos Utilizados

Los estudios sobre el retroceso glaciar en la SNSM se han diversificado en términos de metodología, conforme los investigadores adoptan nuevos enfoques y herramientas para abordar esta problemática. En términos generales, las investigaciones se pueden clasificar en cuatro categorías principales: estudios observacionales, estudios experimentales, estudios de impacto y revisiones de literatura.

1. **Estudios Observacionales:** Representan el 45% de los estudios analizados y se caracterizan por el uso de datos de campo y teledetección para documentar el cambio en la cobertura glaciar. Estos estudios han sido fundamentales para establecer una línea base del retroceso glaciar y su velocidad de disminución. Las imágenes de satélite de los programas Landsat y Sentinel son las fuentes de datos más utilizadas, permitiendo a los investigadores evaluar el cambio de cobertura glaciar a lo largo del tiempo mediante análisis de series temporales. Estos estudios también emplean métodos de clasificación supervisada y análisis de índices, como el Índice de Diferencia Normalizada de Nieve (NDSI), para delinear áreas glaciares de manera precisa.
2. **Estudios Experimentales:** Estos estudios, que representan el 20% del total, son en su mayoría modelos predictivos que simulan el comportamiento futuro de los glaciares bajo diferentes escenarios de cambio climático. La mayoría de estos modelos incluyen variables como temperatura, precipitación y topografía, utilizando plataformas de modelado como ENVI, ERDAS, y Google Earth Engine. Estos estudios son cruciales para anticipar el comportamiento de los glaciares en el futuro y para el desarrollo de estrategias de adaptación.
3. **Estudios de Impacto:** Aproximadamente el 25% de los estudios se han enfocado en analizar los impactos del retroceso glaciar en la

biodiversidad, el caudal de ríos y las comunidades locales. Estos estudios incluyen análisis de los ecosistemas afectados por la pérdida de glaciares, con particular énfasis en especies endémicas y en la dinámica de los servicios ecosistémicos. También se analizan los efectos socioeconómicos en las comunidades locales, donde la disponibilidad de agua es crucial para la agricultura y el abastecimiento doméstico.

4. **Revisiones de literatura:** De los estudios considerados, ninguno fue una revisión de literatura sistemática, por lo que se detecta un vacío que busca ser llenado mediante la presente investigación y que aportará datos significativos sobre el tema y la zona.

Un aspecto clave es el análisis de regresión, utilizado en investigaciones como la de Porras Martín (2023) para identificar las variables que mejor explican el retroceso glaciar. Al incluir variables como temperatura regional, precipitación y eventos climáticos globales como El Niño – Oscilación del Sur (ENSO), estos estudios emplean regresiones múltiples para establecer las relaciones entre las condiciones climáticas y el retroceso de las áreas glaciares. Los modelos de regresión no solo revelan la significancia estadística de cada variable, sino que también permiten prever cómo factores externos, como el aumento de temperatura proyectado por los escenarios del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), pueden acelerar el deshielo. La regresión permite obtener ecuaciones predictivas que establecen un marco para modelar futuras pérdidas de cobertura glaciar, apoyando la planificación de estrategias de mitigación. La integración de estos análisis estadísticos con herramientas de SIG facilita la proyección espacial del retroceso glaciar, lo que es vital para los tomadores de decisiones locales y regionales.

El enfoque en diferentes escalas es una de las integraciones más innovadoras observadas. Al combinar métodos de teledetección con datos climáticos y topográficos, estudios como el de López-Moreno (2020) logran analizar no solo

el retroceso glaciar sino también la distribución espacial en función de variables geomorfológicas, como pendiente y elevación. Estos análisis a múltiples escalas permiten evaluar la estabilidad de los glaciares en función de sus condiciones locales y su vulnerabilidad a condiciones globales. Además, el uso de modelos de Machine Learning como los bosques aleatorios (random forest) para analizar distribuciones espaciales aporta un enfoque novedoso al determinar la importancia relativa de las variables que explican la ubicación y el tamaño de las áreas glaciares. Así, se obtiene una comprensión multidimensional del sistema glaciar en la SNSM, evaluando tanto las tendencias a gran escala como las variaciones detalladas de cada glaciar.

Un hallazgo relevante al comparar metodologías es la complementariedad entre técnicas de clasificación y el uso de índices espectrales como el NDSI. Los índices espectrales son efectivos para determinar la presencia de nieve y hielo en grandes áreas, mientras que las técnicas de clasificación supervisada y no supervisada, que se apoyan en algoritmos de Machine Learning, permiten una diferenciación más precisa de los tipos de cobertura del suelo. Esto es particularmente importante en el contexto de la SNSM, donde la cobertura boscosa o la nubosidad pueden interferir con la delimitación glaciar. Los estudios que emplean ambos métodos, como el de Paéz González y García (2016), logran reducir la incertidumbre mediante la combinación de técnicas que maximizan la precisión en la detección de límites glaciares.

Esta complementariedad metodológica refuerza la necesidad de enfoques integrados en glaciología, donde la teledetección y los algoritmos de clasificación son componentes esenciales para capturar la complejidad de la variación glaciar en áreas remotas. Esta comparación revela una correlación interesante entre los estudios que emplean datos de alta resolución espacial y los que analizan series temporales prolongadas.

Los estudios de mayor resolución, como aquellos que utilizan imágenes Spot 6 y Sentinel-2, presentan un nivel de detalle superior en el análisis de la dinámica glaciar en cortos intervalos de tiempo, permitiendo identificar eventos de deshielo estacionales y la formación de lagos glaciares. Sin embargo, estos datos son limitados en periodos más largos, lo que resalta la utilidad de datos Landsat para un monitoreo a gran escala. La integración de estos datos multitemporales y de alta resolución proporciona una visión integral del retroceso glaciar, especialmente cuando se combinan en modelos predictivos y análisis geoespaciales.

Estos datos permiten una evaluación espacial y temporal de los cambios en la cobertura glaciar, abordando tanto la variación en la capa de nieve como las impurezas absorbentes de luz y la Temperatura de la Superficie de la Tierra (LST) en la SNSM, especialmente en el periodo comprendido entre 2000 y 2020. Estudios como el de Bolaños (2020) reflejan una reducción del área glaciar del 49% entre 1986 y 2015, evidenciando el impacto climático sobre la SNSM. El uso de datos de reanálisis ha permitido una evaluación más precisa de los efectos de factores atmosféricos, como el calentamiento global, en el retroceso de las áreas glaciares, logrando una representación detallada de la pérdida de hielo y su impacto en los ecosistemas andinos.

El análisis de variables topográficas y geográficas mediante modelos de bosques aleatorios ha sido fundamental para comprender la distribución espacial de la capa de hielo en la SNSM. La implementación de modelos avanzados permite evaluar la influencia de factores como la elevación y la pendiente en la pérdida de hielo, destacando una tendencia de retroceso de glaciares en zonas por debajo de los 5000 metros sobre el nivel del mar (msnm), como documenta López – Moreno (2020). Estos estudios revelan que, durante el máximo de la Pequeña Edad de Hielo (LIA), los glaciares alcanzaron una extensión de 81,6 km², mientras que hacia 1954 se observó un retroceso significativo, con una concentración de

hielo a elevaciones superiores a los 4600 msnm. Las investigaciones más recientes indican que los glaciares han continuado disminuyendo a elevaciones entre los 5200 y 5600 msnm, con una marcada asimetría en la pérdida de hielo entre las laderas norte y sur de la SNSM. Estos hallazgos destacan la importancia de la elevación en la estabilidad glaciar y proporcionan una base para estudios futuros que busquen analizar la vulnerabilidad del hielo a distintos niveles de altitud.

Estudios desarrollados por Porras (2023) y Páez (2016) se han enfocado en metodologías de clasificación supervisada y no supervisada, así como en el análisis de componentes principales (PCA), para extraer y comparar la extensión glaciar en la SNSM a lo largo del tiempo. La precisión en la clasificación del área glaciar varía según el periodo estudiado, con coeficientes de variación que van del 10%-15% entre 1986 y 1996, hasta 25%-40% en periodos más recientes, como 2007 y 2014. Este aumento en la variabilidad subraya la complejidad en la detección de cambios en el área glaciar, especialmente en condiciones de alta nubosidad o cambios estacionales. La combinación de índices espectrales, como el NDSI, con técnicas de clasificación supervisada y no supervisada, ha permitido no solo obtener datos más confiables, sino también capturar la variación en el uso del suelo en zonas cercanas a los glaciares. Este enfoque metodológico resulta en datos vectoriales más precisos, lo que a su vez facilita el análisis espacial de la pérdida de hielo y permite correlacionar estos cambios con factores climáticos locales y globales.

En investigaciones realizadas por Díaz Planas (2021) y Rekowsky (2018) se ha documentado la significativa reducción de la extensión de la SNSM. Entre 2014 y 2018, se registró una disminución del 11% en la superficie glaciar, con una pérdida que llevó el área de 7.371 km² en 2014 a 6.563 km² en 2018. A través de métodos como el NDSI y técnicas avanzadas de clasificación, se han establecido umbrales precisos para mapear la variación glaciar y cuantificar su retroceso a lo largo de 30 años. Esta tendencia se confirma en otros estudios, como los

realizados en el documento titulado: *“Análisis de la Evolución de Dos Nevados en Colombia a partir de Sensores Remotos”*, donde se registra una pérdida de 81% en la superficie glaciar en los últimos 30 años, con una tasa media de desglaciación anual de 0.7712 km². Estas cifras refuerzan la magnitud del cambio en la SNSM y sugieren que, si continúa la tendencia actual, podría registrarse una pérdida total de glaciares en las próximas décadas, con implicaciones significativas para los recursos hídricos de la región.

La inclusión de datos hidrológicos y análisis cualitativos es otra dimensión relevante en las investigaciones recientes sobre el retroceso glaciar en la SNSM. El uso de herramientas como GRASS GIS para delimitar cuencas, combinado con entrevistas a expertos en conservación y líderes comunitarios, proporciona un marco integral que va más allá del análisis cuantitativo. En la tesis titulada: *“Análisis de la influencia de la cobertura del bosque y la deforestación sobre el rendimiento hídrico en la SNSM”* destaca la importancia de evaluar no solo el retroceso glaciar, sino también su impacto en la cobertura forestal y la deforestación. Este enfoque permite entender cómo los cambios en la cobertura glaciar afectan a los ecosistemas adyacentes.

La Figura 5 resume la variación glaciar en los intervalos temporales señalados en los párrafos anteriores.

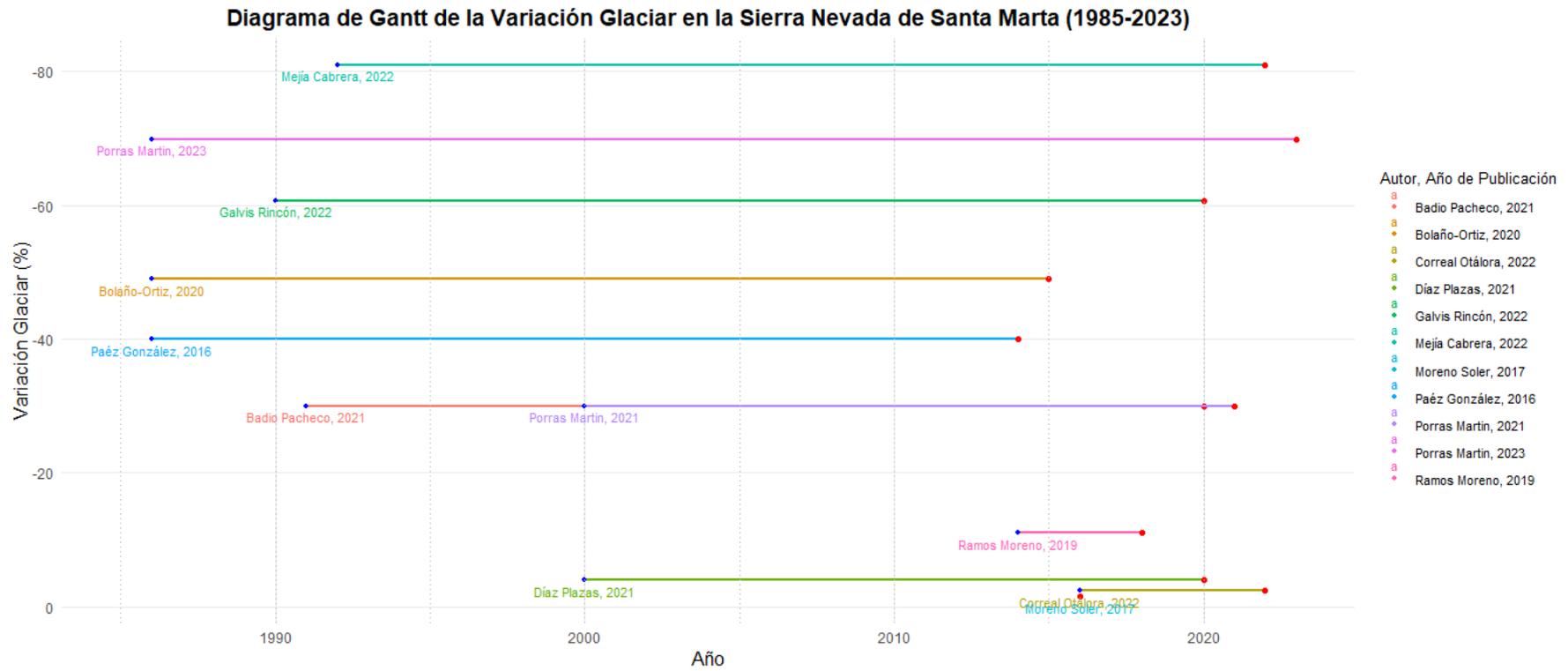


Figura 5. Diagrama de Gantt sobre la variación glaciar en la SNSM. (Fuente: Elaboración propia).

5.4. Análisis sistémico:

El análisis sistémico de la evolución glaciaria en la SNSM muestra un patrón continuo de retroceso en la cobertura glaciaria, fenómeno atribuido según la propia revisión principalmente al cambio climático y a factores topográficos y geográficos específicos de la región. La mayoría de los estudios revisados coincide en que el aumento de la temperatura, tanto global como local, ha acelerado el derretimiento de los glaciares de esta región, observándose una disminución constante en la cobertura glaciaria debido a la presencia de impurezas absorbentes de luz y fenómenos asociados al ENSO (El Niño-Oscilación del Sur) (Bolaño, 2020). Estos hallazgos subrayan la importancia de monitorear la influencia de factores climáticos globales como el ENSO en la SNSM, ya que, según los datos, estos fenómenos alteran significativamente la dinámica glaciaria en el corto plazo y afectan la disponibilidad de recursos hídricos en la región (Bolaño, 2020).

Los estudios recientes sugieren que, además de la temperatura superficial, la exposición a la radiación solar, la ubicación geográfica propensa a recibir vientos alisios y la altitud de los glaciares son factores clave en la determinación de la velocidad de desglaciación. La investigación sobre el control topográfico en la dinámica glaciaria post-Edad de Hielo en esta región realizada por Bolaño (2020), por ejemplo, sugiere que la altitud fue un factor dominante en la distribución de glaciares en épocas anteriores, mientras que la orientación de la pendiente ha ganado importancia en los últimos años. Según el mismo autor la disminución de hielo se observa más pronunciadamente en laderas expuestas a una mayor radiación solar directa, como el lado sur de la SNSM, lo que contribuye a la pérdida acelerada de masa glaciaria en estas áreas.

La precisión de los modelos y herramientas de análisis multitemporal, especialmente las imágenes Landsat y técnicas de fotointerpretación, ha facilitado una comprensión más detallada de los cambios en la extensión de los

glaciares en la SNSM. Los análisis de estos datos han permitido observar que, entre los períodos de 1986 y 2022, la reducción del área glaciar ha sido significativa, alcanzando tasas alarmantes en las últimas décadas. La variabilidad en los resultados obtenidos entre diferentes metodologías, particularmente en los años 2007 y 2014, también destaca la necesidad de seguir mejorando los métodos de observación y análisis de imágenes satelitales para reducir la incertidumbre en los cálculos y proporcionar datos más confiables sobre la dinámica glaciar. Los estudios concluyen que el cambio climático afecta de manera crucial a estos ecosistemas, inhibiendo la acumulación y compactación de nieve necesaria para la formación de nuevos glaciares, lo que subraya la fragilidad de estos entornos ante las variaciones climáticas.

A nivel regional, la comparación entre glaciares en la SNSM y otros nevados de Colombia sugiere que la SNSM podría ser una de las primeras en perder su masa glaciar si no se implementan medidas de conservación eficaces (Mejía, 2022). Las tasas de desglaciación en esta región son más rápidas en comparación con otras áreas debido a factores ambientales específicos, como menores niveles de humedad y mayores temperaturas promedio (Mejía, 2022). Esta situación refleja una realidad preocupante para los ecosistemas andinos tropicales, donde los glaciares no solo actúan como reservas de agua dulce, sino que también cumplen funciones ecológicas cruciales para las comunidades humanas y biodiversidad. Los estudios también destacan la necesidad de entender las diferencias en las tasas de desglaciación entre distintas regiones para desarrollar estrategias de conservación que respondan a las condiciones específicas de cada área glaciar (Uribe, 2006)

El vínculo entre el retroceso glaciar y la gestión de los recursos hídricos en la SNSM es otro de los temas clave. La investigación de (Porras, 2021) demuestra que la disminución de los glaciares afecta directamente la disponibilidad de agua en la región, especialmente durante las temporadas secas. Las evaluaciones de

caudal en ríos y cuencas han mostrado que el deshielo en esta área está estrechamente relacionado con la deforestación y la reducción de la cobertura boscosa, lo cual incrementa la escorrentía y disminuye la capacidad de regulación de los ecosistemas. En este sentido, se concluye que la conservación de la cobertura boscosa es esencial para mitigar los efectos del cambio climático en el rendimiento hídrico, subrayando la necesidad de políticas que integren la gestión del agua y la conservación de los ecosistemas forestales para asegurar la sostenibilidad de estos recursos a largo plazo.

Los estudios sobre la conservación y gestión de los recursos naturales en la SNSM destacan la importancia de involucrar a las comunidades locales y respetar sus derechos culturales y territoriales para lograr un enfoque de conservación más inclusivo y efectivo (Mejía, 2020). Los resultados indican que la implementación de un marco legal que respete estos derechos ha facilitado la coordinación entre instituciones y comunidades, permitiendo el desarrollo de estrategias de conservación más robustas (Ramos, 2020). Sin embargo, se requiere fortalecer estos esfuerzos y mejorar la coordinación interinstitucional para abordar de manera eficaz los desafíos actuales, particularmente en el contexto del cambio climático. La inclusión de políticas adaptativas y el monitoreo continuo de los recursos naturales se plantean como estrategias fundamentales para enfrentar la rápida transformación ambiental de la SNSM y garantizar la resiliencia de los ecosistemas locales.

5.5. Vacíos de conocimiento

Entender por qué los glaciares de la Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM) están retrocediendo es un verdadero desafío. Nos enfrentamos a varios problemas, desde la falta de datos históricos precisos y continuos hasta la carencia de modelos predictivos que se adapten bien a esta región. Aunque se avanzó en el

monitoreo satelital y el uso de tecnologías de teledetección, todavía hay muchas lagunas de conocimiento que dificultan una interpretación completa de los patrones de pérdida glaciaria y sus consecuencias.

Uno de los principales problemas es que no se tiene series temporales sistemáticas y completas que nos permitan analizar en detalle los cambios en la extensión de los glaciares de la SNSM a largo plazo. Incluso como los recursos de monitoreo a través de sensores remotos como los del programa Landsat, existen vacíos de información asociados a daños en sensores y a la falta de continuidad en registro de datos para una región específica.

La mayoría de las observaciones disponibles son de las últimas décadas, especialmente desde que se comenzó a usar imágenes satelitales como las de Landsat a mediados de los años 80. Esto limita nuestra capacidad para realizar análisis retrospectivos y, por lo tanto, para entender la dinámica de los glaciares antes de la llegada de la tecnología satelital. Sin estos datos históricos detallados, es difícil contextualizar el fenómeno dentro de un marco temporal más amplio, lo cual es crucial para identificar variaciones y tendencias a un plazo más largo en el comportamiento de los glaciares.

Además, la falta de datos climáticos de alta resolución en la SNSM es otra gran laguna de conocimiento, especialmente en lo que respecta a la temperatura, la precipitación y la radiación solar, todos factores esenciales en la dinámica de pérdida glaciaria. La escasez de estaciones meteorológicas en altitudes elevadas, junto con la inaccesibilidad geográfica de la región, resulta en una falta de mediciones locales. Como consecuencia, los estudios deben recurrir a interpolaciones o a modelos climáticos regionales que, lamentablemente, pueden no reflejar adecuadamente la complejidad climática de esta área montañosa. Esta falta de datos específicos limita la precisión de los modelos predictivos y complica el desarrollo de proyecciones climáticas que se ajusten a las particularidades de la SNSM.

La escasez de investigaciones sobre el impacto ecológico del retroceso glaciar en la biodiversidad y en la disponibilidad de recursos hídricos constituye otro vacío de conocimiento crítico. La SNSM alberga ecosistemas de alta montaña de gran fragilidad y singularidad, como los páramos, donde la desaparición de los glaciares podría alterar radicalmente las interacciones ecológicas y la distribución de especies adaptadas a las bajas temperaturas. Sin embargo, hasta la fecha, los estudios han abordado de manera fragmentada el impacto del retroceso glaciar en los ecosistemas circundantes, limitándose en muchos casos a evaluaciones generales del cambio en el flujo de agua y la erosión del suelo.

La falta de estudios a nivel de especies y comunidades biológicas, así como de análisis sobre la capacidad de resiliencia de estos ecosistemas, impide una comprensión holística de las consecuencias ecológicas del retroceso glaciar. Este vacío es particularmente relevante en un contexto de cambio climático global, donde la pérdida de glaciares no solo representa una alteración del paisaje físico, sino también una amenaza directa para la biodiversidad y los servicios ecosistémicos que estos ecosistemas proporcionan a las comunidades locales.

Un aspecto que merece mayor investigación es el impacto socioeconómico de la pérdida glaciar en las comunidades indígenas y rurales que habitan en la SNSM y en sus inmediaciones. A pesar de que estas poblaciones dependen en gran medida de los recursos hídricos que derivan de los glaciares y de los ecosistemas de alta montaña, se han realizado pocos estudios que aborden cómo el retroceso glaciar afecta su acceso al agua y su seguridad alimentaria. La investigación existente tiende a centrarse en los efectos físicos y ecológicos, mientras que el componente socioeconómico y cultural permanece subexplorado. Este vacío es particularmente preocupante, dado que las comunidades de la SNSM han desarrollado prácticas y conocimientos tradicionales en torno al manejo del agua y la adaptación a los cambios ambientales, los cuales podrían perderse ante la ausencia de una estrategia de preservación integral. La falta de un enfoque

interdisciplinario que integre tanto los aspectos físicos como los socioeconómicos y culturales en el análisis del retroceso glaciar limita la efectividad de cualquier plan de manejo o de adaptación que se pretenda implementar en la SNSM.

5.6. Análisis GRADE

El análisis GRADE realizado sobre los estudios relacionados con la SNSM ha permitido identificar la calidad de la evidencia y la fiabilidad de los resultados obtenidos. Como se puede ver en la Tabla 3, se observa que la mayoría de los estudios emplean metodologías robustas, tales como la teledetección satelital, la clasificación supervisada de imágenes, y el uso de modelos climáticos y forestales. Estas técnicas ofrecen datos de alta precisión y consistencia, lo que fortalece la calidad de la evidencia. En particular, los estudios que utilizan imágenes Landsat, Spot 6 y Sentinel-2 destacan por su alta resolución y capacidad para proporcionar análisis multitemporales detallados. Además, el empleo de software especializado como ERDAS y ArcGIS ha permitido un procesamiento riguroso de los datos, minimizando posibles sesgos y aumentando la fiabilidad de los resultados.

La consistencia de los estudios es otro aspecto relevante que se ha evaluado. En general, los estudios muestran una alta consistencia, especialmente aquellos que abarcan periodos de tiempo prolongados y múltiples intervalos temporales. La capacidad de estos estudios para utilizar datos continuos y comparables a lo largo de diferentes décadas permite detectar tendencias y cambios en la cobertura glaciar con mayor precisión. Sin embargo, algunos estudios presentan limitaciones debido a la variabilidad en las metodologías empleadas y la subjetividad en ciertos análisis cualitativos. Esto se observa principalmente en aquellos estudios que dependen de entrevistas o evaluaciones de políticas, donde la variabilidad en las fuentes de información y la interpretación subjetiva pueden

introducir sesgos. A pesar de estas limitaciones, la mayoría de los estudios han logrado mantener un nivel de precisión adecuado gracias a la utilización de técnicas de procesamiento avanzado y herramientas de análisis estadístico.

En cuanto a la directitud y precisión de los estudios, se destaca que debido a los criterios de inclusión, estas investigaciones han enfocado sus análisis directamente en la región de la SNSM, lo que garantiza una alta relevancia y aplicabilidad de los resultados. Los trabajos revisados que han utilizado teledetección y técnicas de clasificación supervisada han demostrado una alta precisión en la detección y cuantificación de la cobertura glaciaria, proporcionando estimaciones exactas sobre el retroceso de la misma. No obstante, es importante señalar que algunos estudios cualitativos presentan mayores dificultades para mantener la precisión debido a la naturaleza interpretativa de sus metodologías. En la Tabla 3 se puede observar el resumen de los valores asignados por los autores para cada uno de los artículos revisados.

Tabla 3. Tabla de evaluación GRADE (Fuente: Elaboración propia)

Tipo de Publicación	Año	Título	Autor	Diseño del Estudio	Calidad de la Evidencia	Consistencia	Precisión	Directitud	Posibles Sesgos
Paper	2020	ENSO and Light-Absorbing Impurities and Their Impact on Snow Albedo in the Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia	Tomás R. Bolaño-Ortiz. Et. Al.	Teledetección satelital y reanálisis	Alta	Alta	Moderada	Alta	Limitados
Paper	2020	Topographic control of glacier changes since the end of the Little Ice Age in the Sierra Nevada de Santa Marta mountains, Colombia	Juan I. López-Moreno. Et. Al.	Imágenes aéreas y satelitales de alta resolución, modelos forestales aleatorios	Alta	Alta	Alta	Alta	Mínimos
Tesis	2016	Análisis Multitemporal del Retroceso Glaciar en la Sierra Nevada de Santa Marta - Colombia para los Períodos 1986, 1996, 2007 y 2014	Paéz González, Blanca Lucila. García, Carlos Andrés	Clasificación supervisada y no supervisada, análisis de componentes principales	Moderada	Moderada	Moderada	Alta	Considerables
Tesis	2022	Análisis Geoespacial para la determinación del deshielo de la Sierra Nevada de Santa Marta mediante imágenes satelitales Landsat para los periodos (1990, 2000, 2010 y 2020)	Dago Alberto Galvis Rincón. Jeison David Pedraza Castillo	Imágenes satelitales Landsat, clasificación supervisada y análisis de imágenes raster	Alta	Alta	Alta	Alta	Limitados

Tabla 3. Tabla de evaluación GRADE (Fuente: Elaboración propia)

Tipo de Publicación	Año	Título	Autor	Diseño del Estudio	Calidad de la Evidencia	Consistencia	Precisión	Directitud	Posibles Sesgos
Tesis	2019	Análisis multitemporal del cambio del área de cobertura glaciar sobre la Sierra Nevada de Santa Marta en los años 2014 y 2018	Alex Fabián Ramos Moreno	Procesamiento de imágenes satelitales Spot 6, correcciones atmosféricas y clasificación supervisada	Alta	Moderada	Alta	Alta	Mínimos
Tesis	2021	Estimación Del Retroceso Glaciar En La Sierra Nevada De Santa Marta Para El Periodo 2000-2020 A Partir De Imágenes Landsat	Fernando Andrés Díaz Plazas	Clasificación supervisada con software ERDAS y ArcGIS	Alta	Alta	Alta	Alta	Limitados
Tesis	2023	Determinación Del Factor De Cambio En El Glaciar De La Sierra Nevada De Santa Marta, A Partir De Regiones En Movimiento En Bases De Datos Espacio Temporales	Camilo Andres Porras Martin	Análisis multitemporal con imágenes satelitales y regresión para evaluar cambios	Alta	Alta	Alta	Alta	Mínimos
Tesis	2021	Análisis De La Influencia De La Cobertura Del Bosque Y La Deforestación Sobre El Rendimiento	Nycols Badio Pacheco	Análisis hidrológico utilizando GRASS GIS 7.8.5 y	Moderada	Moderada	Moderada	Alta	Considerables

Tabla 3. Tabla de evaluación GRADE (Fuente: Elaboración propia)

Tipo de Publicación	Año	Título	Autor	Diseño del Estudio	Calidad de la Evidencia	Consistencia	Precisión	Directitud	Posibles Sesgos
		Hídrico En La Sierra Nevada De Santa Marta		variabilidad de índices de umbral					
Tesis	2022	Análisis de la Evolución de Dos Nevados en Colombia a partir de Sensores Remotos	Valeria Mejía Cabrera	Clasificación supervisada con imágenes Landsat	Alta	Alta	Alta	Alta	Limitados
Tesis	2022	Estimación De Los Cambios Del Glaciar En La Sierra Nevada De Santa Marta Asociados Al Deshielo En El Periodo De 2016 A 2022	Mónica Rocio Correal Otálora	Análisis de imágenes Sentinel-2 y SIG	Alta	Alta	Alta	Alta	Mínimos
Paper	2018	Variações De Área Das Geleiras Da Colômbia E Da Venezuela Entre 1985 E 2015, Com Dados De Sensoriamento Remoto	Isabel Cristiane Rekowsky	NDSI con imágenes Landsat	Alta	Alta	Alta	Alta	Limitados
Paper	2021	Representación Y Análisis Del Retroceso Glaciar De La Sierra Nevada De Santa Marta A Partir De Trayectorias De Regiones En Movimiento	Camilo Andres Porras Martin	Teledetección y modelos climáticos	Alta	Alta	Alta	Alta	Mínimos
Tesis	2006	Natural Resource Conservation And Management In The Sierra Nevada Of Santa Marta	Eduardo Uribe Botero	Análisis cualitativo, entrevistas y	Moderada	Moderada	Moderada	Alta	Considerables

Tabla 3. Tabla de evaluación GRADE (Fuente: Elaboración propia)

Tipo de Publicación	Año	Título	Autor	Diseño del Estudio	Calidad de la Evidencia	Consistencia	Precisión	Directitud	Posibles Sesgos
				evaluación de políticas					
Tesis	2017	Modelo De Deformación De La Sierra Nevada De Santa Marta A Través Del Radar Interferométrico De Apertura Sintética (Insar)	María Alejandra Moreno Soler	InSAR y análisis de serie temporal con GIANt	Alta	Alta	Alta	Alta	Limitados
Tesis	2018	Análisis Multitemporal Del Retroceso Glaciar De Los Nevados De Colombia A Traves De La Utilización De Herramientas Sig	Jenny Lorena Leiva Leiva	Imágenes satelitales USGS y clasificación supervisada	Alta	Alta	Alta	Alta	Limitados

6. Discusión

El retroceso de los glaciares en la Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM) es un proceso que se ha acelerado de forma preocupante en las últimas décadas, principalmente debido a factores asociados al cambio climático y a las particularidades geográficas de la región. La SNSM, siendo el sistema montañoso costero más alto del mundo, alberga ecosistemas únicos y vulnerables, en los cuales los glaciares desempeñan un rol fundamental en la regulación de los recursos hídricos.

Estudios recientes han demostrado que la temperatura en esta zona ha aumentado progresivamente, lo cual ha exacerbado la pérdida de masa glaciar, una tendencia observable en glaciares tropicales alrededor del mundo. En particular, la exposición de la SNSM a fenómenos como el ENSO ha tenido un impacto considerable en su balance de masa glaciar. Estos eventos climáticos extremos generan anomalías en la temperatura y en los patrones de precipitación, afectando la acumulación y la conservación de la nieve. Además, la radiación solar directa, intensificada por las condiciones de altitud y ubicación, aumenta la velocidad de derretimiento en la SNSM, diferenciándola de otros sistemas glaciares que pueden beneficiarse de condiciones atmosféricas más estables. La precisión en la detección de estos cambios depende en gran medida del procesamiento de imágenes satelitales y de la aplicación de modelos que integren datos de diferentes periodos y resoluciones, permitiendo a los investigadores comparar los resultados de estudios recientes con los de décadas anteriores.

Otro aspecto esencial en la comprensión del retroceso glaciar en la SNSM es la influencia de la topografía, que define en gran medida la vulnerabilidad de los glaciares en función de la altitud y la orientación de sus laderas. Las investigaciones han señalado que la altitud ha sido históricamente un factor determinante para la formación y la persistencia de los glaciares, ya que en mayores alturas, las temperaturas se mantienen relativamente bajas, lo que

facilita la acumulación de nieve. Sin embargo, en las últimas décadas, se ha observado que la orientación de las pendientes también desempeña un papel crucial. Las laderas orientadas hacia el sur, que reciben una mayor cantidad de radiación solar directa, experimentan un retroceso más acelerado en comparación con aquellas que están orientadas hacia el norte. Datos relacionados con las elevaciones, las pendientes y las orientaciones de las caras de la SNSM se aprecian en la Figura 7, confirmando lo expuesto previamente en la revisión.

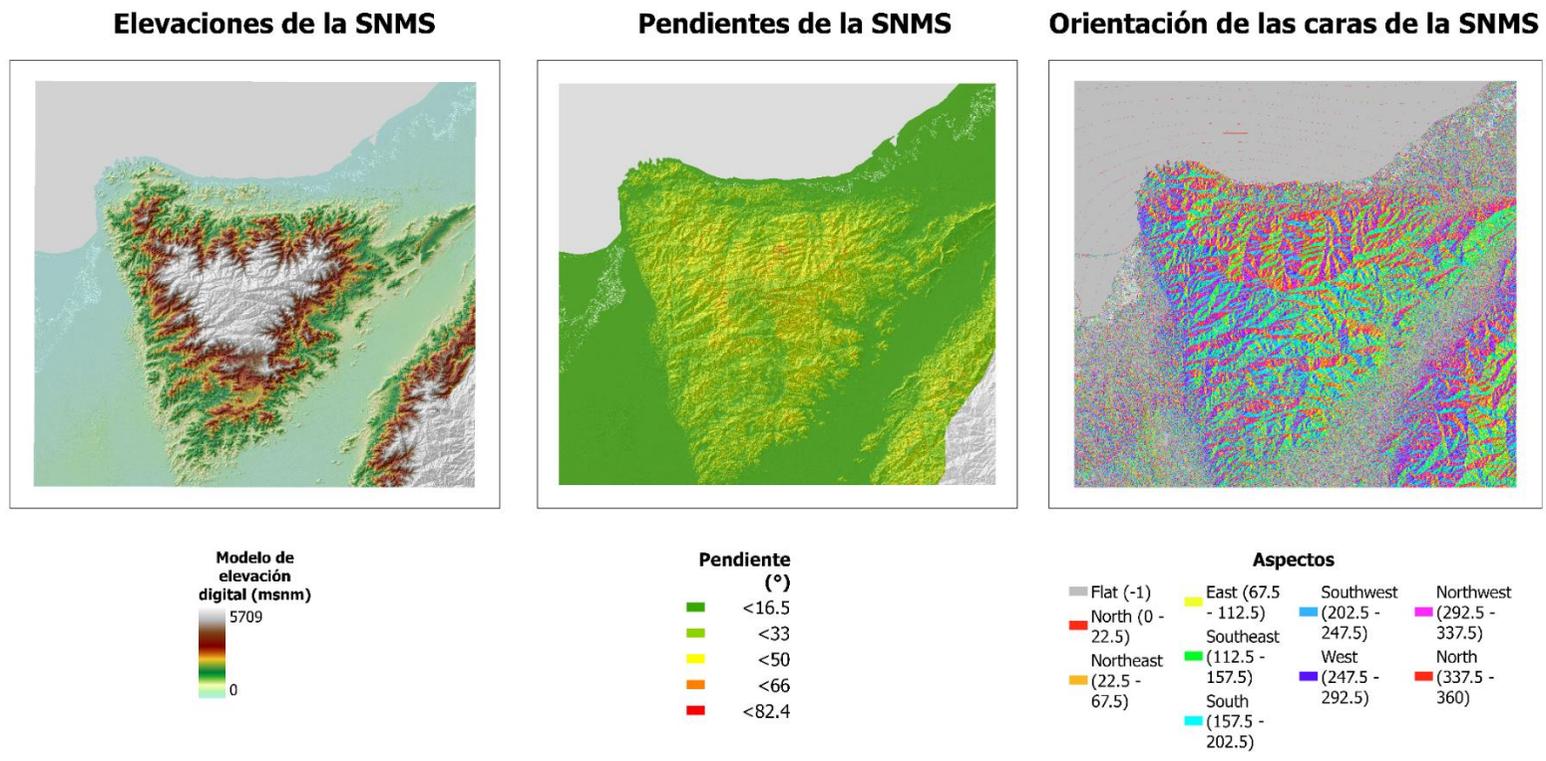


Figura 7. Mapas de elevación, pendientes y orientaciones de la SNSM. (Fuente: Elaboración propia)

Lo descrito anteriormente, aunado a lo mostrado en la figura 7 resaltan la vulnerabilidad de los glaciares tropicales a cambios espaciales y climáticos y subrayan la importancia de la orientación y la altitud como factores que podrían utilizarse para modelar futuros escenarios de pérdida glacial en la SNSM. Además, se estima que si las condiciones actuales persisten, gran parte de la masa glacial en altitudes bajas y en laderas expuestas desaparecerá en las próximas décadas.

La tecnología satelital y los modelos de análisis multitemporal han permitido un avance significativo en la precisión de las observaciones sobre el retroceso glacial en la SNSM. Las imágenes Landsat, en particular, han sido fundamentales para documentar y cuantificar las variaciones en la cobertura glacial desde finales de la década de 1980, proporcionando una base de datos confiable y continua. Estos análisis han revelado que el retroceso ha sido casi constante, pero con una marcada aceleración en los últimos años. Sin embargo, es importante reconocer las limitaciones y variabilidades en los datos obtenidos, especialmente en ciertos años en los que la cobertura de nubes y las condiciones atmosféricas han dificultado la interpretación de las imágenes. Esta situación subraya la necesidad de mejorar y combinar diferentes técnicas de observación para reducir las incertidumbres en el cálculo de la extensión glacial. Los modelos actuales indican que la SNSM podría perder una fracción significativa de su hielo en las próximas décadas, lo que pone de relieve la importancia de una monitorización continua y el desarrollo de políticas de conservación adecuadas. Estos hallazgos no solo enriquecen nuestra comprensión de la dinámica glacial en la SNSM, sino que también aportan una perspectiva valiosa para el estudio de otros glaciares tropicales en condiciones climáticas similares.

La pérdida de glaciares en la SNSM tiene repercusiones profundas para los ecosistemas locales y para la disponibilidad de agua en la región. El deshielo no solo afecta el caudal de los ríos, sino también la estabilidad de los suelos y la

biodiversidad que depende de estos cuerpos de agua. En este contexto, la deforestación y la degradación de los ecosistemas forestales alrededor de los glaciares agravan aún más la situación, ya que reducen la capacidad de retención de agua y aumentan la escorrentía superficial. Los estudios han demostrado que la reducción de la cubierta boscosa está directamente relacionada con una menor disponibilidad de agua durante la estación seca, exacerbando los problemas de abastecimiento en las comunidades aledañas. La conservación de la vegetación y el mantenimiento de los bosques en la SNSM se presentan, por tanto, como estrategias cruciales para mitigar los efectos negativos del retroceso glaciar. Al preservar la estructura natural del paisaje, se puede mejorar la regulación hídrica y, en consecuencia, aumentar la resiliencia de los ecosistemas frente a los cambios climáticos.

7. Conclusiones

Se ha recopilado un portafolio robusto de estudios que cubren diversos aspectos de la evolución y el retroceso glaciar en la Sierra Nevada de Santa Marta. Este portafolio incluye artículos científicos y tesis que abordan el tema desde diferentes perspectivas, utilizando una variedad de metodologías. La revisión sistemática ha permitido identificar las principales contribuciones de cada estudio y cómo se complementan entre sí para ofrecer una visión más completa del fenómeno. En adición, se hizo la revisión de artículos excluidos que no cumplieran con los criterios establecidos.

Según la revisión bibliográfica, los estudios revisados muestran una clara tendencia hacia el uso de técnicas avanzadas de teledetección y análisis multitemporales a partir de mediados de los años 80; con el tiempo esta tecnología se convirtió en recurrente, permitiendo un análisis más detallado y preciso. Los aportes significativos incluyen la identificación de una pérdida acelerada de cobertura glaciar, la influencia de factores climáticos globales como El Niño (ENSO), y la aplicación de modelos de regresión y Machine Learning para predecir futuros cambios.

En la revisión sistemática se describe que a pesar de los avances significativos, persisten vacíos en el conocimiento que deben ser abordados. Estos incluyen la necesidad de estudios más detallados sobre la interacción entre la cobertura glaciar y los ecosistemas adyacentes, la variabilidad temporal en escalas más cortas y la integración de datos socioeconómicos para entender mejor el impacto del retroceso glaciar en las comunidades locales. Además, se requiere un monitoreo continuo y de alta resolución para capturar las dinámicas rápidas del cambio climático en la región.

La evaluación de la calidad de los estudios mediante la herramienta GRADE ha permitido asegurar la inclusión de investigaciones de alta fiabilidad en la

revisión. Los estudios seleccionados demostraron solidez metodológica, coherencia en los resultados y relevancia para los objetivos del análisis.

Análisis físicos realizados por los autores confirman los resultados geográficos de la revisión bibliográfica, referido principalmente a los factores que favorecen al retroceso glaciar de la SNSM.

Bibliografía.

- Barnett, T. P., Adam, J. C., & Lettenmaier, D. P. (2005). Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature*, *438*(7066), 303-309. <https://doi.org/10.1038/nature04141>
- Benn, D. I., & Evans, D. J. A. (2010). *Glaciers and Glaciation*. Hodder Education.
- Buytaert, W., et al. (2010). Water resource management in the Atacama Desert. *Journal of Arid Environments*, *74*(12), 1135-1140.
- Bolaño-Ortiz, T. R., Diaz-Gutiérrez, V. L., & Camargo-Caicedo, Y. (2020). ENSO and light-absorbing impurities and their impact on snow albedo in the Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia. *Geosciences (Switzerland)*, *10*(11), 1-21. <https://doi.org/10.3390/geosciences10110121>.
- Breiman, L. (2001). *Random forests*. *Machine Learning*, *45*(1), 5-32.
- Caceres, A. L., Jaramillo, P., Matthews, H. S., Samaras, C., & Nijssen, B. (2021). Hydropower under climate uncertainty: Characterizing the usable capacity of Brazilian, Colombian and Peruvian power plants under climate scenarios. *Energy for Sustainable Development*, *61*, 217-229. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2021.02.001>.
- Cabrera Montenegro, E. B., Vega Tamba, J. C., & Jácome Aguirre, G. A. (2023). Estimación actual y futura del retroceso glaciar del nevado Cayambe, en Ecuador. *SATHIRI*, *18*(1), 158-178. <https://doi.org/10.32719/1390-6925.2023.18.1.10>.
- Ceballos Liévano, J. L., Ospina Niño, J. A., & Nocua Ruge, Y. P. (2020). Informe del estado de los glaciares colombianos 2020. *[Documento sin publicar]*
- Ceballos, J. L., Euscátegui, C., Ramírez, J., Cañon, M., Huggel, C., Haerberli, W., & Machguth, H. (2006). Fast shrinkage of tropical glaciers in Colombia. *Annals of Glaciology*, *43*, 194-201. <https://doi.org/10.3189/172756406781811765>.
- Díaz Plazas, F. A. (2019). Estimación del retroceso glaciar en la Sierra Nevada de Santa Marta para el periodo 2000-2020 a partir de imágenes LANDSAT. *[Documento sin publicar]*
- Díaz Plazas, F. A. (2021). Análisis multitemporal del cambio del área de cobertura glaciar en la Sierra Nevada de Santa Marta entre los años 2000 y 2020. Universidad Militar Nueva Granada. Recuperado de <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/39193/D%C3%ADAZPlazasFernandoAndr%C3%A9s2021.pdf?sequence=1>.
- Díaz Rocca, L. H., & Zielinski, S. (2022). Community-based tourism, social capital, and governance of post-conflict rural tourism destinations: the case of Minca, Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia. *Tourism Management Perspectives*, *43*. <https://doi.org/10.1016/j.tmp.2022.100965>.

- Duran-Izquierdo, M., & Olivero-Verbel, J. (2021). Vulnerability assessment of Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia: World's most irreplaceable nature reserve. *Global Ecology and Conservation*, 28. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2021.e01685>.
- Espinosa-Díaz, L. F., Zapata-Rey, Y. T., Ibarra-Gutierrez, K., & Bernal, C. A. (2021). Spatial and temporal changes of dissolved oxygen in waters of the Pajarales complex, Ciénaga Grande de Santa Marta: Two decades of monitoring. *Science of the Total Environment*, 785. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147213>.
- French, H. M. (2007). *The Periglacial Environment* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- Garrido, A. P., Tovar Bernal, F., Fontanilla, J. D., Camargo Caicedo, Y., & Vélez-Pereira, A. M. (2022). Assessment of livestock greenhouse gases in Colombia between 1995 and 2015. *Heliyon*, 8(12). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11945>.
- Garcés-Ordóñez, O., Espinosa Díaz, L. F., Pereira Cardoso, R., & Costa Muniz, M. (2020). The impact of tourism on marine litter pollution on Santa Marta beaches, Colombian Caribbean. *Marine Pollution Bulletin*, 160. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111613>.
- Gilardoni, S., Di Mauro, B., & Bonasoni, P. (2022). Black carbon, organic carbon, and mineral dust in South American tropical glaciers: A review. *Global and Planetary Change*, 213. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2022.103782>.
- Gutiérrez-Escobar, A., et al. (2014). Recent glacier retreat and its impact on water resources in the Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia. *Journal of Hydrology*, 518, 222-233.
- Hastie, T., Tibshirani, R., & Friedman, J. (2009). *The elements of statistical learning: Data mining, inference, and prediction*. Springer.
- Higgins, J. P. T., & Green, S. (2023). *Cochrane Handbook for Systematic Reviews of Interventions* (updated edition). Cochrane.
- Huertas Díaz, O., Esmeral Ariza, S. J., & Sánchez Fontalvo, I. M. (2017). Realidades sociales, ambientales y culturales de las comunidades indígenas en La Sierra Nevada de Santa Marta. *Producción + Limpia*, 12(1), 10-23. <https://doi.org/10.19053/19090455.v12.n1.2017.5472>.
- IBM. (2023)¿Qué es el Machine Learning (ML)?. Recuperado de <https://www.ibm.com/es-es/topics/machine-learning>.
- IDEAM. (2020). Monitoreo del retroceso glaciar en la Sierra Nevada de Santa Marta.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2020). Informe del estado de los glaciares en Colombia. Recuperado de <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/sierra-nevada-santa-marta>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2017). Informe del estado de los glaciares en Colombia. Recuperado de <http://www.ideam.gov.co/web/sia-cifras/sierra-nevada-de-santa-marta>.

- IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland: IPCC.
- IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Retrieved from <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>.
- Jensen, J. R. (2007). *Remote sensing of the environment: An Earth resource perspective*. Pearson Prentice Hall.
- Körner, C. (2003). *Alpine Plant Life: Functional Plant Ecology of High Mountain Ecosystems* (2nd ed.). Springer.
- Kozhikkodan Veetil, B., Wang, S., Florêncio de Souza, S., Bremer, U. F., & Simões, J. C. (2017). Glacier monitoring and glacier-climate interactions in the tropical Andes: A review. *Journal of South American Earth Sciences*, 77, 218-246. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2017.05.003>.
- Lachniet, M. S., & Vazquez-Selem, L. (2005). Last Glacial Maximum equilibrium line altitudes in the circum-Caribbean (Mexico, Guatemala, Costa Rica, Colombia, and Venezuela). *Quaternary International*, 138-139, 129-144. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2004.07.007>.
- Liu, T., Kinouchi, T., & Ledezma, F. (2013). Characterization of recent glacier decline in the Cordillera Real by LANDSAT, ALOS, and ASTER data. *Remote Sensing of Environment*, 137, 158-172. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.05.005>.
- Londoño, L., Segrera, J., & Jaramillo, M. (2017). Water Distribution System of Santa Marta city, Colombia. *Procedia Engineering*, 186, 20-27. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.194>.
- López-Morales, A., et al. (2018). Recent glacier retreat in the Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia: Observations from spaceborne imagery. *Journal of Glaciology*, 64(243), 101-111.
- López-Moreno, J. I., Ceballos, J. L., Rojas-Heredia, F., Zabalza-Martinez, J., Vidaller, I., Revuelto, J., Alonso-González, E., Morán-Tejeda, E., & García-Ruiz, J. M. (2020). Topographic control of glacier changes since the end of the Little Ice Age in the Sierra Nevada de Santa Marta mountains, Colombia. *Journal of South American Earth Sciences*, 104. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102862>.
- Mazuera, E., & Hudson, R. (2021). Inter-visibility between settlements in pre-Hispanic Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia: The relation between hierarchy and control of distant communications. *Journal of Archaeological Science*, 129. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2021.105320>.
- Molano, S. M., Cardenas, D. P., Gómez, H. S., Alvarado, D. M., Galindo, A. F., Sanabria, J. F., & Gómez-Neita, J. S. (2022). Evaluación del retroceso glaciar de la Sierra Nevada del Cocuy, Colombia a partir de la clasificación de imágenes multisensor. [Documento sin publicar]. <https://doi.org/10.18273/revbol.v48n186-2024002>.

- Myers, N., Mittermeier, R. A., Mittermeier, C. G., Da Fonseca, G. A. B., & Kent, J. (2000). Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, *403*(6772), 853-858. <https://doi.org/10.1038/35002501>
- Paterson, W. S. B. (1994). *The Physics of Glaciers*. Pergamon.
- Pérez-Sánchez, D., Montes, M., Cardona-Almeida, C., Vargas-Marín, L. A., Enríquez-Acevedo, T., & Suarez, A. (2021). Keeping people in the loop: Socioeconomic valuation of dry forest ecosystem services in the Colombian Caribbean region. *Journal of Arid Environments*, *188*. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2021.104436>.
- Porras, C. A., & Ortiz Dávila, A. E. (n.d.). Representación y análisis del retroceso glaciar de la Sierra Nevada de Santa Marta a partir de trayectorias de regiones en movimiento. <https://www.researchgate.net/publication/370510473>.
- Prieto, G. A. (2024). The Sierra Nevada de Santa Marta, a dynamic topography. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, *48*(186), 205-207. <https://doi.org/10.18273/revbol.v48n186-2024001>.
- Quandt, D., Trumbull, R. B., Altenberger, U., Cardona, A., Romer, R. L., Bayona, G., Ducea, M., Valencia, V., Vásquez, M., & Cortes, E. (2018). The geochemistry and geochronology of Early Jurassic igneous rocks from the Sierra Nevada de Santa Marta, NW Colombia, and tectono-magmatic implications. *Journal of South American Earth Sciences*, *86*, 216-230. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2018.05.003>.
- Ramos Moreno, A. F. (2014). Análisis multitemporal del cambio del área de cobertura glaciar sobre la Sierra Nevada de Santa Marta. *[Documento sin publicar]*
- Ramos Moreno, A. F. (2019). Análisis multitemporal del cambio del área de cobertura glaciar en la Sierra Nevada de Santa Marta entre los años 2014 y 2018. Universidad Militar Nueva Granada. Recuperado de <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/31988/RamosMorenoAlexFabian2019.pdf>.
- Schünemann, H. J., Oxman, A. D., Brozek, J., Glasziou, P., Jaeschke, R., Vist, G. E., & Guyatt, G. H. (2013). GRADE: assessing the quality of evidence for diagnostic recommendations. *Evidence-Based Medicine*, *13*(6), 162-163.
- Rekowsky, I. C., Bremer, U. F., & Kozhikkodan Veetil, B. (2018). VARIAÇÕES DE ÁREA DAS GELEIRAS DA COLÔMBIA E DA VENEZUELA ENTRE 1985 E 2015, COM DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO VARIATIONS IN GLACIER AREA IN COLOMBIA AND VENEZUELA BETWEEN 1985 AND 2015, USING REMOTE SENSING DATA. *[Journal Article]*
- Rossello, E. A., & Gallardo, A. H. (2022). The Sierra Nevada de Santa Marta (Colombia) and Nevado de Famatina (Argentina): The effects of tectonic syntaxis on the topography of the Andes. *Journal of Structural Geology*, *160*. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2022.104655>.

- Uribe, D. (2022). Metodologías Calidad Agua. [Documento sin publicar]
- U.S. Geological Survey. (2022). Normalized difference snow index (NDSI). Recuperado de <https://www.usgs.gov/landsat-missions/normalized-difference-snow-index>.
- Valencia, J., Frankenberger, J., Cherkauer, K., Martín-López, J. M., Monserrate, F., & da Silva, M. (2022). Water sufficiency for cacao production in the Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM) region, Colombia. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 44. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.100981>.
- Villagómez, D., Spikings, R., Mora, A., Guzmán, G., Ojeda, G., Cortés, E., & Van Der Lelij, R. (2011). Vertical tectonics at a continental crust-oceanic plateau plate boundary zone: Fission track thermochronology of the Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia. *Tectonics*, 30(4). <https://doi.org/10.1029/2011TC002949>.
- Viviroli, D., Weingartner, R., & Messerli, B. (2007). Mountains of the world, water towers for humanity: Typology, mapping, and global significance. *Water Resources Research*, 43(7). <https://doi.org/10.1029/2006WR005653>
- Wallace, J. M., & Hobbs, P. V. (2006). *Atmospheric Science: An Introductory Survey* (2nd ed.). Academic Press.