



ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LA DINÁMICA GLACIAR EN EL PARQUE
NACIONAL NATURAL LOS NEVADOS ENTRE LOS AÑOS 2001 y 2021
MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE SERIES DE TIEMPO.

Carem Yiseth Chabaco Valencia

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA
INGENIERÍA TOPOGRÁFICA
CALI, COLOMBIA
JUNIO, 2024

ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LA DINÁMICA GLACIAR EN EL PARQUE
NACIONAL NATURAL LOS NEVADOS ENTRE LOS AÑOS 2001 y 2021
MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE SERIES DE TIEMPO.

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniera Topográfica.

DIRECTOR.
M.Sc. Cesar Edwin García Cortés

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA
INGENIERÍA TOPOGRÁFICA
CALI, COLOMBIA
JUNIO, 2024

Dedico este trabajo de grado que me costó muchos sacrificios:

A mi familia, mi pareja y amigos, por encontrar la manera de apoyarme y motivarme en todo momento, por estar atentos a mis necesidades y ser esa fuente de inspiración para seguir adelante y cumplir mis sueños.

“Que gran satisfacción es el deber cumplido”

- Anónimo

AGRADECIMIENTOS.

Agradezco a Dios por darme la oportunidad de culminar una meta más. A mi familia, por su paciencia y cuidado, por su apoyo incondicional y su comprensión. A mi pareja, por darme motivación constante en todo este proceso; en especial los últimos meses. A mis compañeros, que me enseñaron que el aprendizaje en la academia puede ser más divertido si se comparten los sueños. A mis profesores, por contribuir a mi formación profesional y personal. A mi director de proyecto de grado, por su oportuna respuesta y retroalimentación. A David y a Mario, por su disposición y por brindarme conocimientos oportunos para culminar este trabajo de investigación. A todas las personas se mostraron interesadas en verme culminar esta etapa de mi formación profesional, quiero decirles que hicieron que este proceso fuera más liviano para mí y estaré eternamente agradecida por ello.

TABLA DE CONTENIDO.

RESUMEN	10
ABSTRACT	11
1. INTRODUCCIÓN	12
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.	14
3. OBJETIVOS.	17
3.1. Objetivo General.	17
3.2. Objetivos Específicos.	17
4. JUSTIFICACIÓN	18
5. MARCO TEÓRICO.	20
5.1. Marco Conceptual.	20
5.2. Marco Teórico.	21
5.2.1. Glaciar.	21
5.2.2. Estructura y dinámica de los glaciares.	22
5.2.3. Índices Espectrales para la detección de Nieve	24
5.2.4. Clasificación de imágenes.	27
5.2.5. Segmentación de imágenes.	31
5.2.6. Serie temporal.	34
5.2.7. Validación clasificación.	34
5.3. Marco Referencial.	38
6. MARCO METODOLÓGICO	42
6.1. Zona de estudio.	42
6.1.1. Aspectos geográficos.	43
6.1.2. Características climáticas	44
6.1.3. Hidrología	45
6.2. Materiales y equipos.	45
6.3. Flujo metodológico.	48
6.3.1. Recopilación y preparación de la información secundaria.	49
6.3.2. Clasificación Supervisada Orientada a Objetos Geográficos.	50
6.3.3. Obtención de series de tiempo	54
7. RESULTADOS Y ANÁLISIS.	55

7.1.	Estimación de cambios en la dinámica glaciár del PNN los Nevados.....	55
7.2.	Cambios en las coberturas glaciares y variables climáticas.	68
8.	VALIDACIÓN.	78
8.1.	Análisis de Imágenes basados en Objetos Geográficos – GEOBIA	78
8.2.	Comparación de datos climáticos.	80
9.	CONCLUSIONES.	81
10.	RECOMENDACIONES	83
11.	BIBLIOGRAFÍA.....	85

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Componentes de un glaciar.....	23
Figura 2. Funcionamiento del algoritmo Random Forest en clasificaciones.....	30
Figura 3. Ejemplo de matriz de confusión en la evaluación de la calidad cartográfica	36
Figura 4. Representación gráfica del índice Kappa.....	37
Figura 5. Cartografía del Parque Nacional Natural los Nevados	43
Figura 6. Diagrama de flujo metodológico.....	48
Figura 7. Enmascaramiento de nubes en imágenes MODIS.....	49
Figura 8. Imágenes en falso color empleadas para la detección de nieve.	51
Figura 9. Clasificaciones supervisadas empleando GEOBIA 2001-2021.....	56
Figura 10. GEBOIA para años 2001 y 2021.....	57
Figura 11. Dinámica glaciar del Nevado del Ruiz.....	60
Figura 12. Dinámica glaciar del Nevado de Santa Isabel	61
Figura 13. Dinámica glaciar del Nevado del Tolima	62
Figura 14. Tasa de variación glaciar total de los glaciares estudiados.....	63
Figura 15. Tasa de variación interanual de los glaciares estudiados	65
Figura 16. Zonas de análisis por medio de series de tiempo.	69
Figura 17. Dinámica del índice NDSI.....	70
Figura 18. Relación área glaciar, temperatura y precipitación.....	71
Figura 19. Correlación de variables climáticas y superficie glaciar.	73
Figura 20. Oceanix Niño Index (ONI).	75
Figura 21. Relación de temperatura entre IDEAM y MODIS.	76
Figura 22. Relación de precipitaciones entre IDEAM y TERRACLIMATE.....	77
Figura 23. Dispersión datos climáticos de datos ráster respecto al IDEAM.	80

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Escala de valoración del índice Kappa (k)	38
Tabla 2. Altitud nevados del PNN los Nevados	44
Tabla 3. Bandas del producto MOD09A1 del sensor MODIS.	46
Tabla 4. Bits en imágenes MODIS.....	50
Tabla 5. Definición de clases para la clasificación supervisada GEOBIA.	52
Tabla 6. Clasificación supervisada de los glaciares en los años 2001-2021	58
Tabla 7. Diferencia entre áreas del IDEAM y las áreas calculadas en este trabajo.	66
Tabla 8. Correlaciones en superficie, precipitación y temperatura.	73
Tabla 9. Matriz de confusión año 2010.	79
Tabla 10. Matriz de confusión año 2016	79

RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo estudiar la dinámica de la masa glaciar en el Parque Nacional Natural Los Nevados durante el periodo de 2001 a 2021 utilizando técnicas de percepción remota. Se emplea una metodología que combina el análisis multitemporal de series de tiempo y el Análisis de Imágenes Basadas en Objetos Geográficos (GEOBIA) de datos provenientes del sensor MODIS (MOD09A1 y MOD11A2) y de TERRACLIMATE. Los resultados muestran una alarmante pérdida de cobertura nevada al inicio y al final de este estudio, con disminuciones del 47% para el nevado del Ruiz y del 55% para el nevado de Santa Isabel, mientras que el nevado del Tolima permanece estable. Se establece una correlación promedio entre los cambios en los glaciares y parámetros climáticos de temperatura y precipitación del 37% y del -20% respectivamente, así como con eventos extremos como el fenómeno del Niño y La Niña en periodos puntuales. Estos hallazgos resaltan la urgencia de abordar el cambio climático en la región y subrayan la importancia de implementar medidas de conservación para proteger estos ecosistemas vulnerables.

PALABRAS CLAVE

Teledetección, Análisis multitemporal, Serie temporal, MODIS, Dinámica glaciar, Parque Nacional Natural los Nevados.

ABSTRACT

The present study aims to study the dynamics of the glacier mass in Los Nevados National Natural Park during the period from 2001 to 2021 using remote sensing techniques. A methodology that combines multitemporal time series analysis and Geographic Object Based Image Analysis (GEOBIA) of data from the MODIS sensor (MOD09A1 and MOD11A2) and TERRACLIMATE is used. The results show an alarming loss of snow cover at the beginning and end of this study, with decreases of 47% for Nevado del Ruiz and 55% for Nevado de Santa Isabel, while Nevado del Tolima remains stable. An average correlation was established between changes in glaciers and climatic parameters of temperature and precipitation of 37% and -20%, respectively, as well as with extreme events such as the El Niño and La Niña phenomena in specific periods. These findings highlight the urgency of addressing climate change in the region and underscore the importance of implementing conservation measures to protect these vulnerable ecosystems.

KEYWORDS

Remote sensing, Multitemporal analysis, Time series, MODIS, Glacier dynamics, Los Nevados National Natural Park.

1. INTRODUCCIÓN

Los glaciares poseen una importante contribución en la determinación de los efectos del cambio climático, la evolución del clima, el estado del sistema hidrológico y son beneficiosos en lo que constituyen importantes reservas de agua dulce que son usadas en distintas actividades productivas por el hombre en su beneficio y que, a su vez, va encaminada directamente al desarrollo económico de las ciudades (Alva Huayaney y Meléndez de la Cruz, 2014).

Aproximadamente el 68.6% de las reservas de agua dulce se encuentran principalmente en los casquetes, glaciares polares y glaciares continentales. La ubicación de los glaciares de montaña en Sudamérica se encuentra encabezada por Perú y Bolivia, mientras que a Colombia le corresponde sólo un 4% de estas coberturas nevadas (Francou y Pouyaud, 2007). Sin embargo, según el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM, aunque la representación de los glaciares nacionales sólo corresponda a un 0.16% de los glaciares presentes en Sudamérica; la superficie nevada de 37 km² existente es un importante indicador del cambio climático y contribuye a la realización de estudios ambientales donde se puede relacionar la contribución de la variabilidad del clima y la temperatura en la dinámica de la nieve (IDEAM, 2021).

El Parque Nacional Natural los Nevados – PNNN se encuentra ubicado en la región cafetera de los Andes Centrales Colombianos y proporciona tres montañas nevadas; dos de ellas situadas en estratos volcánicos, que representan una riqueza ambiental y paisajística a nivel nacional (IDEAM, 2021). A pesar de que brindan una importante oferta de agua dulce en ríos como: Claro, Otún y Campoalegre, que desembocan en

el río Cauca; y los ríos Totarito, Azul y Mozul que hacen parte de la cuenca del Magdalena, están amenazados a su extinción por un continuo retroceso en la masa glaciar de los nevados que los suministran debido a las desfavorables condiciones medioambientales en las que se encuentran por acción del cambio climático (Kozhikkodan Veetil et al., 2016).

La necesidad del ser humano de preservar especialmente los recursos que le son necesarios (Pei et al., 2021) es la razón principal por la que actualmente se realizan con más frecuencia continuos inventarios, monitoreos y análisis de los recursos naturales, haciendo que en las últimas décadas el uso de sensores remotos haya tomado fuerza en la realización de estudios ambientales, demostrando importantes beneficios en la obtención de información espacial y la implementación de nuevas metodologías empleadas para la realización de seguimientos a fenómenos de naturaleza dinámica, permitiendo estudiar su variabilidad con el tiempo, realizar predicciones y determinar las influencias de distintas variables ambientales en estos (Chu, 2018).

Frente a este escenario, en la presente investigación se pretende mostrar un estudio de la cobertura de nieve presente en los glaciares del Parque Nacional Natural los Nevados, mediante el uso y procesamiento de imágenes satelitales mediante series de tiempo para evidenciar el comportamiento de estas formaciones y su relación con variables climáticas como la temperatura y la precipitación.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

Una de las grandes consecuencias a nivel mundial producto del cambio climático es la relacionada con el deshielo de los glaciares que cubren distintas zonas en la superficie terrestre (IPCC, 2021). La principal razón se debe a que sus características los hacen sensibles a las variaciones climáticas que pueden ser perceptibles a simple vista en su superficie y en su balance de masa (Lemke et al., 2007). Estas fuentes de aguas solidificadas son también consideradas una riqueza hídrica ambiental, pues en su ciclo de fusión brinda un porcentaje importante de la oferta de agua dulce representada en ríos y quebradas, lo que brinda beneficios para las comunidades cercanas a estos recursos permitiendo ser usada para su consumo y/o en distintas actividades productivas (Alva Huayaney y Meléndez de la Cruz, 2014).

El deshielo de los glaciares de alta montaña a nivel mundial se da por las alteraciones de las condiciones naturales que son necesarias para conservar la capa de hielo y nieve. La causa directa consta en el aumento de la temperatura y la falta de precipitaciones sólidas necesarias para mantener la capa de hielo, afectando a los ecosistemas al causar deterioro, fragmentación y poniendo en riesgo la prolongación de su existencia (GREENPEACE, 2009). El sistema hidrológico es el más afectado como consecuencia del cambio climático, presentando variabilidad e inconsistencia en sus ciclos y perjudicando directamente a las poblaciones por la sequía de ríos y el acceso al agua potable (Páez Gonzáles y García, s. f.).

Históricamente, la evolución de los glaciares tropicales en Colombia se ha marcado principalmente como un retroceso. Según datos del IDEAM, (2021) el país ha perdido el 92% de sus glaciares entre el siglo XVII y el año 2020 debido al incremento en la

temperatura y las escasas precipitaciones que son indispensables para mantener la cobertura de nieve; razones por las cuales se terminó por fundir totalmente 11 de los 17 glaciares existentes, quedando solo seis glaciares en la actualidad: La Sierra Nevada de Santa Marta, la Sierra Nevada del Cocuy, el Volcán Nevado del Ruíz, el Volcán Nevado de Santa Isabel, el Volcán Nevado del Tolima y el Volcán Nevado Huila, representados en superficie al año 2019 por 36.1 km². Sumado a lo anterior, en un estimativo realizado por el IDEAM, se logró tasar que para el año 2050 habrá desaparecido aproximadamente el 80% de la superficie glaciar en todo el país (Costa Posada, 2007).

En el PNN los Nevados, donde se encuentran los Volcanes Nevados del Ruiz, Tolima y Santa Isabel, las consecuencias del cambio climático han generado una serie de problemáticas ambientales y sociales. Según un artículo del IDEAM, (s. f.) se estima que el nevado de Santa Isabel sería el próximo Nevado en desaparecer en un lapso de tiempo aproximado de 10 años debido a las alarmantes pérdidas anuales en su área presentadas en las últimas décadas, situación que ha generado que las quebradas que nutren importantes ríos como el Magdalena y el Cauca estén desapareciendo, dejando de abastecer en un porcentaje significativo municipios que se benefician de este recurso hídrico.

Entre los factores influyentes en el deterioro de los glaciares nacionales se encuentra la relacionada con la altitud, ya que una altitud menor a 5.000 m s. n. m. se considera insuficiente para enfrentar un deshielo acelerado (IPCC, 2014). Se suma a su vez la ubicación geográfica donde se encuentra las coberturas de hielo y nieve, ya que, por el hecho de pertenecer a una zona con un clima tropical, los fenómenos climáticos como la reducción en las precipitaciones y la temporada de sol excesivo son

suficientemente capaces de alterar la variabilidad y la estabilidad de las nieves y, por ende, la proporción de las coberturas nevadas haciendo poco favorable las condiciones para la conservación de este recurso.

En este sentido, debido a la importancia ambiental y socioeconómica que representan las coberturas nevadas en el país, es necesario cuantificar el grado de afectación de fenómenos climáticos en el transcurso del tiempo y así evaluar las condiciones y el estado de los glaciares existentes en el territorio colombiano.

3. OBJETIVOS.

3.1. Objetivo General.

Evaluar la dinámica de la masa glaciar de los nevados presentes en el Parque Nacional Natural los Nevados por medio de técnicas de percepción remota entre los años 2001 y 2021.

3.2. Objetivos Específicos.

- Estimar los cambios en la masa glaciar de los Nevados del Ruíz, Tolima y Santa Isabel por medio de la implementación de series de tiempo en un periodo de 21 años.
- Analizar la correlación entre los cambios en las coberturas nevadas y las variables climáticas de temperatura y precipitación en los últimos 21 años de los glaciares del Ruíz, Tolima y Santa Isabel.
- Determinar la tasa de cambio de nieve anual de los glaciares estudiados en los últimos 21 años.

4. JUSTIFICACIÓN

Dado que las formaciones de masas glaciares se encuentran en un deterioro por una continua y significativa disminución de sus áreas y teniendo en cuenta su importante papel en el medio ambiente al ser indicadores de la evolución del clima, cambios en la atmósfera y los impactos del cambio climático a largo plazo; el continuo inventario y monitoreo de estas reservas naturales permite activar protocolos en la gestión ambiental para la protección, conservación y la prolongación de su existencia, pues representan beneficios para las comunidades en cercanías a ellas (Eduardo et al., s. f.).

En este sentido, el desarrollo de nuevas tecnologías, herramientas y técnicas como la teledetección espacial; que se destaca por su alta periodicidad temporal facilita el seguimiento de fenómenos ambientales situados en zonas inaccesibles por su dura condición climática y que a su vez tienen características dinámicas intensas, permitiendo la obtención de información de grandes áreas del territorio en poco tiempo (Arora et al., 2011), juegan un papel importante para la realización de análisis que son usados en la toma de decisiones en materia ambiental.

Existen distintos métodos que emplean técnicas de teledetección para la realización de análisis multitemporales que permiten evidenciar los cambios en las masas glaciares en el tiempo. Algunos métodos se realizan por medio de índices espectrales de nieve, los cuales tienen como objetivo discriminar las áreas nevadas de las demás coberturas por medio de la combinación de las bandas espectrales de las imágenes, siendo los más encontrados en la literatura el Normalized Differential Snow Index (NDSI), el Normalized Difference Snow/Ice Index (NDSII) y, el Normalized Difference

Glacier Index (NDGI) dado que permiten una buena discriminación de la nieve como lo muestra Monterroso-Tobar et al., (2018) en su estudio realizado para los glaciares pertenecientes al PNN los Nevados y Keshri et al., (2009) para la cuenca Chenab ubicada en el Himalaya. Así mismo, se han empleado otros métodos para la determinación de coberturas nevadas como la clasificación supervisada (Phiri y Morgenroth, 2017), no supervisada (Salas Pérez et al., 2019) el enmascaramiento de clases y algoritmos de máxima verosimilitud (Páez Gonzáles y García, s. f.), entre otros.

Las metodologías anteriores tienen en común, bajos costos, menor inversión de tiempo y la obtención de información con alto grado de exactitud validada para ser usada en posteriores investigaciones (Eduardo et al., s. f.). Por lo tanto, contar con herramientas que permitan la obtención de información a gran escala y su posterior procesamiento para la realización de estudios y análisis sobre los recursos naturales resulta ventajoso, pues permite obtener nueva información con un grado de exactitud y precisión aceptable al optimizar procesos, mientras brinda una ventaja competitiva respecto a los métodos convencionales.

Teniendo en cuenta a lo anterior, en el presente estudio se pretende visibilizar los cambios en las coberturas nevadas y analizar las condiciones ambientales de los nevados presentes en el PNN los Nevados en un periodo de tiempo de 21 años, evidenciando los cambios físicos presentados al inicio y final del estudio, además de analizar las correlaciones de los cambios presentados en las superficies nevadas con variables climáticas como la precipitación y la temperatura, además de realizar un análisis para el fenómeno del Niño y La niña en periodos de tiempo puntuales.

5. MARCO TEÓRICO.

5.1. Marco Conceptual.

La percepción remota es la ciencia y tecnología que se encarga de la adquisición de información de la superficie terrestre y la atmósfera de manera remota (Pérez Gutiérrez et al., 2002) es decir, sin necesidad de que exista un contacto directo de los sensores con los objetos a ser detectados. Consiste principalmente en identificar y analizar las características de los elementos de acuerdo a la energía electromagnética reflejada o emitida captada y registrada por los sensores, la cual se transforma y se presenta en una señal posible de ser interpretada para su uso y aplicación en estudios científicos de diversa índole. (Sholarin y Awange, 2015).

Las propiedades o características de las imágenes satelitales, como productos obtenidos de las interacciones entre los elementos presentes en la superficie terrestre y los sensores, se distinguen por las siguientes cuatro modalidades o tipos de resoluciones definidas principalmente por la capacidad del sensor en distinguir el menor tamaño de un objeto en la superficie terrestre, la frecuencia con la que el satélite pasa por un mismo punto en el espacio, el número y ancho de las mediciones espectrales; también llamadas bandas o canales, y el rango o número discernible de valores de brillo discretos distinguidos por el sensor, denominadas resolución espacial, temporal, espectral y radiométrica, respectivamente (Richards, 2022).

El modo en que se discretiza la información captada por el sensor es útil para diferenciar y seleccionar los sensores dependiendo de las necesidades y características de las variables o fenómenos sujetos a estudio.

En los últimos años el cambio climático se ha estudiado con frecuencia con el objetivo de entender su comportamiento, participación e impacto en el medio ambiente y los recursos naturales (Wang et al., 2021). Cracknell, (1994) define este proceso como los cambios que ocurren o pueden ocurrir en un futuro a los patrones climáticos como consecuencia de la actividad humana y/o procesos naturales. La variación global del clima generada por este fenómeno se produce sobre los parámetros climáticos conocidos como la temperatura, precipitación, nubosidad, presión atmosférica, entre otros, que definen las condiciones y propiedades físicas de la atmósfera, las cuales son comúnmente utilizadas para evaluar y describir el clima en un momento dado.

Las evaluaciones de los patrones climáticos y su relación con los recursos naturales brindan información oportuna sobre su incidencia en el deterioro o conservación de estos; como es el caso de los glaciares, los cuales se forman por precipitaciones sólidas y en presencia de bajas temperaturas, donde una variación prolongada de estos factores incide ya sea de manera positiva o negativa en su estado. Sus características y los procesos que atraviesan los hace altamente sensibles a las variaciones climáticas debido a los procesos internos que intervienen en su naturaleza dinámica, por lo que su respuesta a estas variaciones brinda importantes indicadores del estado medio del clima, su variabilidad en el tiempo, fenómenos climáticos extremos y una estimación de su duración (Páez Gonzáles y García, s. f.).

5.2. Marco Teórico.

5.2.1. Glaciar.

El IDEAM y la Universidad Nacional de Colombia (IDEAM y Universidad Nacional de Colombia, 1997) definen un glaciar de montaña como una “masa de hielo en

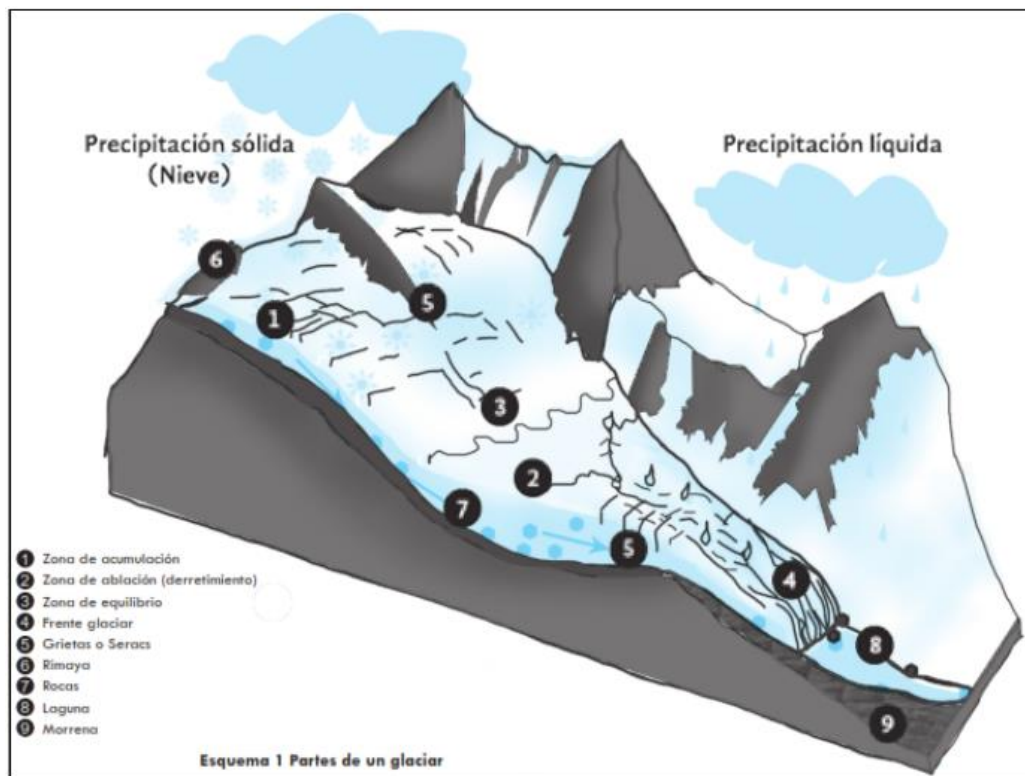
movimiento que incluye detritos rocosos y se caracteriza por el balance entre la alimentación (acumulación) y la fusión (ablandación)". Por su parte, la National Snow and Ice Data Center, define un glaciar como una combinación de masas de hielo, rocas, sedimentos y agua líquida que tienen origen en la tierra y se mueven bajo la influencia de su propio peso y la gravedad.

5.2.2. Estructura y dinámica de los glaciares.

La formación glaciar, entendida también como un proceso de transfiguración de la nieve, inicia con la caída de precipitación sólida en copos de nieve compuestos de cristales de hielo entrelazados que caen en una determinada región con condiciones atmosféricas y topográficas apropiadas, la cual se acumula en un periodo de tiempo, se convierte en hielo y comienza a fluir hacia sus alrededores dada la presión de su propio peso (Tarbuck et al., 2005).

Cuando las elevaciones son más altas, la nieve sólida que cae es mayor que la que se derrite, permitiendo que el glaciar gane capas nuevas de hielo que entierran y comprimen las capas anteriores, este proceso da paso a la acumulación de nieve lo cual promueve el equilibrio y la conservación de los glaciares. Por el contrario, el retroceso de los glaciares se atribuye a múltiples causas entre las cuales se encuentra el derretimiento, la ablación, la evaporación, la socavación del viento y el desprendimiento (National Snow and Ice Data Center, s. f.)

Teniendo en cuenta lo anterior, se describen a continuación los componentes y procesos básicos que definen el comportamiento de los glaciares, los cuales se ilustran en la figura 1.

Figura 1.*Componentes de un glaciar*

Nota. Tomado de *Partes de un glaciar*, por IDEAM, 2012, Academia https://www.academia.edu/19511231/Glaciers_of_Colombia_More_than_mountains_of_snow_SPANISH_

5.2.2.1. Zona de acumulación.

La zona de acumulación de nieve es aquella en la que se desarrollan los procesos de compactación de nieve y formación del glaciar (Schoolmeester et al., 2018). Cuando la acumulación es igual o mayor que el derretimiento y la ablación, un glaciar permanecerá en equilibrio o incluso aumentará su área (National Snow and Ice Data Center, s. f.).

5.2.2.2. Zona de ablación.

La ablación es un proceso natural y estacional de la vida de los glaciares, en el cual ocurre la fusión parcial de un glaciar a causa de la variabilidad climática (National

Snow and Ice Data Center, s. f.). Puede presentarse en zonas que se ven influenciadas por la fusión del hielo glaciar en la superficie, la erosión del viento y el desprendimiento frontal de la masa glaciar y no debe confundirse con el retroceso glaciar, pues este último no es un fenómeno estacional; es decir que con el pasar de los años el glaciar no recupera su volumen de hielo en las temporadas frías y en presencia de altas precipitaciones (Echegaray Cristóbal, 2015).

5.2.2.3. Zona de equilibrio.

La zona de equilibrio de un glaciar se puede entender como un límite altitudinal entre la acumulación y ablación, donde estos dos subsistemas son iguales, es decir, entre estas dos áreas se alcanza un equilibrio cuando las nevadas equivalen al deshielo, provocando que el glaciar esté en equilibrio. Siempre que se altera este equilibrio, ya sea por un aumento de las nevadas o por un derretimiento excesivo, el glaciar avanza o retrocede a un ritmo que no se considera normal (National Snow and Ice Data Center, s. f.).

5.2.2.4. Morrenas.

Las morrenas son deposiciones rocosas que son arrastradas por el avance de la masa glaciar sobre la superficie (Zarza, s. f.). Son buenos indicadores de las fluctuaciones de la superficie y el volumen del glaciar, por lo que son frecuentemente identificadas en labores de campo para determinar; mediante distintos procesos, el avance y retroceso de los glaciares.

5.2.3. Índices Espectrales para la detección de Nieve

Son aquellos que permiten mapear la cubierta de nieve mediante un proceso de comparación de la información espectral entre bandas con el objetivo de diferenciar

las zonas con nieve de otras coberturas presentes (Monterroso-Tobar et al., 2018). Los siguientes son índices espectrales aplicables para el estudio de glaciología empleados comúnmente por medio de técnicas de percepción remota.

5.2.3.1. NDSI

El índice NDSI (Normalized Difference Snow Index) es utilizado para discriminar superficies con coberturas nevadas debido a la alta reflectancia de la nieve en el espectro visible y su característica absorbente en el infrarrojo, mientras que la reflectancia de las nubes permanece alta en esas mismas partes del espectro, lo que permite una correcta separación de la nieve (Hall y Riggs, 2011). Un valor de umbral definido para NDSI de 0.40 permite la identificación de áreas cubiertas de nieve a partir de imágenes como lo muestra Shimamura et al., (2006).

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

Donde:

NDSI: Diferenciación de nieve-hielo en áreas cubiertas de nieve.

Green: Reflectancia de la banda visible verde.

SWIR: Reflectancia de la banda infrarroja de onda corta.

Si bien, el índice NDSI se desarrolló para ser empleado originalmente en imágenes satelitales Landsat; así como el NDSII y el NDGI, años después Hall y Riggs, (2011) emplearon este índice para el mapeo de la nieve en imágenes satelitales MODIS confirmando la eficacia de este índice en imágenes de resolución moderada para el estudio de la nieve.

5.2.3.2. NDSII

El índice NDSII (Normalized Difference Snow/Ice Index) se calcula como la diferencia normalizada entre la banda del rojo e infrarrojo medio dividido entre la suma de las mismas bandas. El umbral correspondiente al rango 0.412 a 0.935 identifica la cobertura de nieve o hielo según Xiao et al., (2001).

$$NDSII = \frac{Red - NIR}{Red + NIR} \quad (2)$$

Donde:

NDSII: Diferenciación de nieve y hielo en áreas cubiertas de nieve y hielo.

Red: Reflectancia de la banda visible roja.

NIR: Reflectancia de la banda del infrarrojo cercano.

5.2.3.3. NDGI

El índice NDGI (Normalized Difference Glacier Index) estudia las características espectrales de las clases de cobertura supraglacial en las bandas verde y roja (Ecuación 3) para mapear zonas de diferenciación entre nieve y hielo y una mezcla de hielo y flujos de nieve.

$$NDGI = \frac{Green - Red}{Green + Red} \quad (3)$$

Donde:

NDGI: Diferenciación entre nieve y hielo y una mezcla de hielo y flujos de nieve.

Green: Reflectancia de la banda visible verde.

Red: Reflectancia de la banda visible roja.

El valor de umbral usado para un análisis de coberturas nevadas realizado a un conjunto de datos del área de estudio definido por Keshri et al., (2009) fue de 0,025.

5.2.4. Clasificación de imágenes.

Es el proceso mediante el cual se asignan clases definidas dentro de un sistema de clasificación de cobertura y uso del suelo a los píxeles agrupados de una imagen satelital o aérea que comparten características espectrales similares (Gómez López, 2020). Como sucede a menudo, existen distintas técnicas de clasificación de las imágenes las cuales se basan en conjuntos de métodos automatizados que actualmente se conocen de la siguiente manera.

5.2.4.1. Clasificación supervisada.

Es el conjunto de métodos y procedimientos en los cuales se requiere la participación de un analista que identifique áreas de clases que sean representativas para todas las coberturas presentes en la imagen, las cuales se usan como entrenamiento haciendo uso de un algoritmo que extrapole estas características espectrales para otras regiones de la imagen, realizando así la clasificación (Willington et al., 2013).

Si bien, existen diversos procedimientos matemáticos para analizar los patrones espectrales por medio de la clasificación supervisada, el tipo de clasificación óptimo dependerá del tipo y procesamiento de la imagen, datos disponibles e información que se quiera identificar (Willington et al., 2013). En todo caso, es importante tener un conocimiento de la zona a trabajar, ya sea por recolección de información en campo o un análisis foto interpretativo que brinde información relevante al estudio.

5.2.4.2. Clasificación no supervisada.

Es el conjunto de métodos que crea agrupamientos homogéneos espectrales o clústeres dentro de la imagen, en los cuales, el analista debe establecer la relación

entre las clases encontradas con las categorías de interés (García y Consuegra, 1997). Estas clasificaciones tienen en cuenta el valor relativo al color, tono y al clúster para identificar entidades, usando criterios de comparación y diferenciación. En función de la forma de caracterizar las clases o categorías, se identifican los clasificadores paramétricos y no-paramétricos, los cuales se basan en la regla de decisión bayesiana (Ecuación 4).

$$P\left(\frac{\alpha_i}{X}\right) = \frac{P\left(\frac{X}{\alpha_i}\right)P(\alpha_i)}{P(X)} \quad (4)$$

Donde.

$P\left(\frac{\alpha_i}{X}\right)$: Probabilidad de que un píxel X pertenezca a la clase

$P\left(\frac{X}{\alpha_i}\right)P(\alpha_i)$: Probabilidad de que dada α_i el valor de la variable aleatoria sea X

$P(X)$: Probabilidad de que se presente un objeto a clasificar con características igual a X

La diferencia de los métodos paramétricos y no-paramétricos radica en que, en los primeros se considera conocida la función de densidad de probabilidad de las clases caracterizados por un número determinado de parámetros y en la segunda, se ignora las funciones de densidad de probabilidad que caracterizan las clases, siendo necesario un paso previo para la estimación de las funciones de probabilidad a partir de muestras (García y Consuegra, 1997).

5.2.4.3. Análisis de imágenes basados en objetos Geográficos (GEOBIA).

El análisis de imágenes basados en objetos, GEOBIA por sus siglas en inglés, es un método de clasificación supervisada de imágenes que se basa en la agrupación de píxeles representados en formas significativas de los objetos terrestres (Castilla y Hay, 2008). Según Hossain y Chen, (2019) el principal atractivo de este método se

basa en dos principios básicos que son los siguientes: en primera, comprende la segmentación de la imagen con el objetivo de extraer y dividir la imagen en objetos que representan características terrestres, y como paso posterior, la clasificación de esas características tomando propiedades de forma y tamaño como también propiedades espaciales y espectrales.

GEOBIA integra los sistemas de información geográfica (SIG) con técnicas de teledetección, lo que le permite analizar con eficacia el paisaje en imágenes de alta resolución espacial (Blaschke et al., 2000). Este enfoque ampliamente utilizado (Blaschke, 2010) reduce la variación dentro de las clases debido a que incorpora información de las características de los objetos como el tamaño, la forma, la orientación y las relaciones existentes entre objetos como base para la clasificación (Nussbaum, 2009).

Las clasificaciones jerárquicas basadas en reglas empleadas en GEOBIA permiten distinguir elementos que tengan características espectrales similares, como es el caso de los glaciares y de los elementos cercanos a estas coberturas nevadas (Guo et al., 2021). Se desempeña también en diferentes paisajes como: áreas agrícolas, bosques, asentamientos urbanos, humedales, entre otros (Blaschke, 2010). Sin embargo, tiene una desventaja que está relacionada con la alta resolución que requiere para producir mejores resultados, aún si eso significa un mayor costo computacional para la segmentación y clasificación (Tassi y Vizzari, 2020).

Dadas las recientes mejoras en los algoritmos empleados en la segmentación de imágenes, los enfoques basados en objetos están siendo mucho más populares en comparación con los análisis y clasificaciones de imágenes tradicionales, debido a su

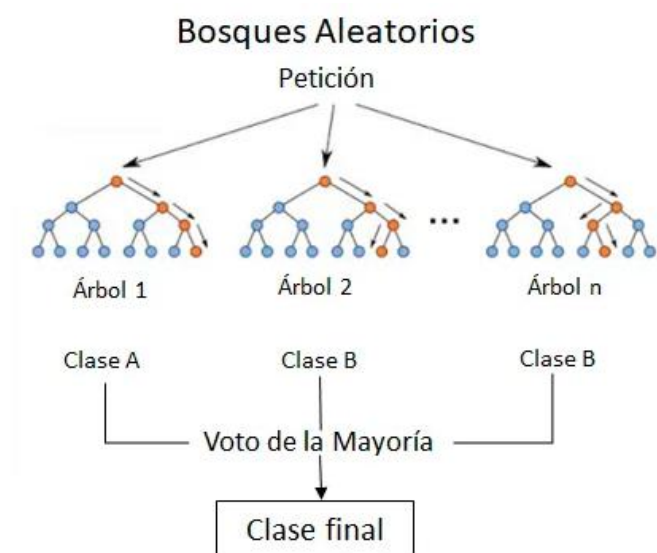
capacidad efectiva para delinear y clasificar el paisaje, objetos o parches, a diferentes escalas (Blaschke, 2010).

5.2.4.3.1. Random Forest (RF).

Es un algoritmo de aprendizaje automático recientemente empleado en clasificaciones, predicciones y regresiones, el cual combina una serie de clasificadores de estructura de árbol de decisión para alcanzar un único resultado (Figura 2). Tiene la capacidad de brindar una alta precisión en sus clasificaciones al tolerar los valores atípicos y el ruido de los datos (Liu et al., 2012) además del buen rendimiento con conjuntos de datos de alta dimensión y múltiples fuentes, mayor precisión que otros clasificadores populares y el aumento de la velocidad de procesamiento mediante la selección de variables importantes (Noi Phan et al., 2020).

Figura 2.

Funcionamiento del algoritmo Random Forest en clasificaciones.



Nota. Adaptado de *Bosques Aleatorios*, por Puma, 2020, Medium <https://medium.com/@hpumah/bosques-aleatorios-482163ace92e>.

Según los mismos autores, comparado con los algoritmos tradicionales RF tiene buenas virtudes lo que lo posiciona actualmente como un método de investigación bastante popular en la minería de datos, así como también se destaca por ser el algoritmo de clasificación más utilizado en estudios donde se emplean imágenes de satélite (Noi Phan et al., 2020).

5.2.5. Segmentación de imágenes.

La segmentación de imágenes es un método de procesamiento que extrae aquellos píxeles que están a una distancia cercana y que comparten características espectrales similares y los agrupa en un segmento. Los segmentos que tienen determinadas formas y características espectrales a su vez se agrupan en objetos los cuales representan entidades del mundo real sobre el terreno (Esri, s. f.).

Según Yuheng y Hao, (2017) existen distintos métodos de segmentación de imágenes que son comúnmente empleados en la actualidad, sin embargo, en su artículo se enfocan en la revisión de 4 métodos los cuales los nombran como los principales. Ellos son: la segmentación basada en regiones, la segmentación por detección de bordes, la segmentación basada en clustering y la segmentación basada en el aprendizaje débilmente supervisado en CNN.

Según la revisión de Yuheng y Hao, (2017) la escogencia del método de segmentación debe tener en cuenta una correcta adaptación del algoritmo con las características de las imágenes; esto es debido a la diversidad e incertidumbre de las imágenes. Sin embargo, en muchos casos se opta por la combinación de múltiples métodos de segmentación para aprovechar al máximo las ventajas en la combinación de múltiples funciones y lograr un mejor resultado en la segmentación.

5.2.5.1. Segmentación de imágenes basado en regiones.

La segmentación basada en regiones se conoce como el método más simple para la segmentación de imágenes y por esa razón es ampliamente empleado en la actualidad (Yuheng y Hao, 2017). Este método consta en la división de las imágenes teniendo en cuenta el valor de umbral en escala de grises de los diferentes objetivos y la segmentación por crecimiento regional, en el cual, el algoritmo busca la fusión de píxeles con propiedades comunes teniendo en cuenta un píxel semilla para la generación de la región.

5.2.5.2. Simple Non-Iterative Clustering (SNIC).

El algoritmo de Agrupamiento Simple No Iterativo (SNIC) es una versión mejorada del algoritmo de Agrupación en Clústeres Iterativo Lineal Simple (SLIC) que tiene como objetivo agrupar píxeles para generar de manera eficiente superpíxeles compactos y casi uniformes a un costo computacional bajo, logrando una calidad en la segmentación igual o superior a cuatro métodos de última generación (Achanta y Sússtrunk, s. f.).

Actualmente, SNIC es considerado un algoritmo factible y de alto potencial para el mapeo de cultivos de alta resolución basado en datos de teledetección de múltiples fuentes (Paludo et al., 2020) y (Brinkhoff et al., 2019), clasificación de uso y cobertura del suelo (Tassi y Vizzari, 2020) y (Tu et al., 2020), inventario de humedales (Amani et al., 2019) entre otros.

Sobre su funcionamiento, Achanta y Sússtrunk, (s. f.) afirman que SNIC inicializa los centroides con píxeles elegidos en una cuadrícula regular en el plano de la imagen logrando medir la afinidad de un píxel con un centroide utilizando una distancia

normalizada en el espacio de cinco dimensiones de color y coordenadas espaciales. Teniendo en cuenta lo anterior, con la posición espacial x y el color CIELAB, la distancia del k -ésimo centroide de superpíxel $C[k]$ al j -ésimo píxel candidato viene dada por la ecuación 5.

$$d_{j,k} = \sqrt{\frac{\|x_j - x_k\|_2^2}{s} + \frac{\|c_j - c_k\|_2^2}{m}} \quad (5)$$

Donde

$d[j, k]$: Distancia de los centroides entre píxeles

x : Posición espacial

c : Color CIELAB

s : Factores de normalización espacial

m : Distancias de color

En cada iteración de k -medias y a partir de los centroides iniciales, el algoritmo utiliza una cola de prioridad para elegir el siguiente píxel para agregar a un grupo. La cola de prioridad se completa con píxeles candidatos que están conectados de 4 u 8 a un grupo de superpíxeles en crecimiento. Al abrir la cola se proporciona el píxel candidato que tiene la distancia d más pequeña desde un centroide. Cada nuevo píxel que se agrega a un superpíxel se utiliza para realizar una actualización en línea del valor del centroide correspondiente.

La actualización en línea de los centroides es bastante efectiva porque las redundancias en imágenes naturales generalmente dan como resultado que los píxeles adyacentes sean bastante similares. Por lo tanto, a diferencia de SLIC, que requiere múltiples iteraciones de k -medias para actualizar los centroides, SNIC hace

este proceso en una sola iteración haciendo que la cola contenga menos elementos que N y utilizando menos memoria que SLIC, que requiere una memoria de tamaño N para almacenar distancias.

5.2.6. Serie temporal.

Una serie temporal es un conjunto de observaciones las cuales se obtienen midiendo el comportamiento de una variable (X_t) de manera regular a lo largo de un periodo de tiempo dado, donde $t = 1, 2, 3, \dots, n$ (IBM, 2023). Las series temporales son aplicadas generalmente en el estudio de grandes conjuntos de datos recopilados en el tiempo, con el objetivo de facilitar el análisis de las variaciones permitiendo estimar tendencias y realizar predicciones (Velásquez et al., 2006).

En teledetección las series temporales de imágenes de satélite son utilizadas para evaluar y monitorear los cambios espacio temporales que pueden ocurrir en la cobertura terrestre por diversos factores (Miller, 2017). En la última década se han empleado con frecuencia para el monitoreo de recursos y diversos cultivos como la caña, el arroz y el maíz; como lo muestra Delgadillo Ruiz et al., (2016) en su artículo aprovechando la disponibilidad de imágenes satelitales adquiridas con una alta temporalidad.

5.2.7. Validación clasificación.

Teniendo en cuenta que ninguna clasificación está completa hasta que su exactitud sea evaluada (Mather y Tso, 2016), la validación de la clasificación realizada a las imágenes se considera un proceso de suma importancia dado que permite identificar los posibles sesgos que pueden presentarse en este proceso. Estos sesgos se

pueden dar por errores aleatorios y/o errores sistemáticos que finalmente afectan la exactitud temática de las clasificaciones realizadas.

La evaluación de la exactitud de los métodos de clasificación consiste en cuantificar la medida en que el valor de respuesta definido para una observación determinada se ajuste o se acerque a un valor de respuesta en la realidad para dicha observación. Es decir, medir la precisión de las predicciones realizadas en coincidencia con los datos observados.

Para llevar a cabo este proceso existen distintos métodos, sin embargo, la aplicabilidad de un método de validación u otro dependerá del conjunto de datos y del tipo de análisis que pretenda realizar.

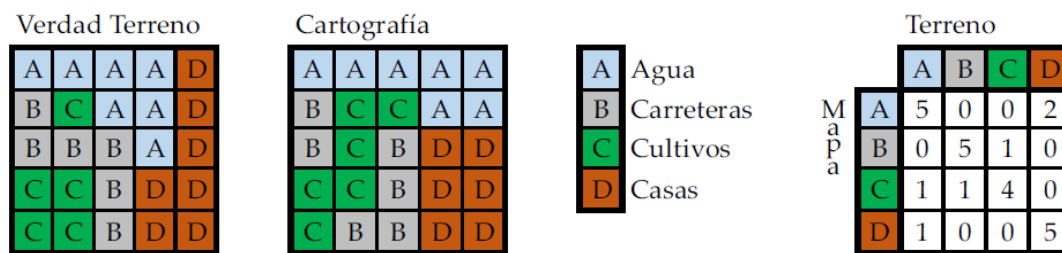
5.2.7.1. Matriz de confusión.

Una matriz de confusión es una manera estándar que permite determinar la confiabilidad o exactitud temática de los productos derivados de las clasificaciones de datos procedentes de imágenes (Manuel y Muñoz, 2016). Se construye a partir de una imagen con N celdas clasificadas en M clases, ordenando las clases de referencia en las columnas, y sobre las filas, las clasificaciones dadas, o unidades cartográficas del mapa asignadas. Por su parte, la diagonal de la matriz representa la concordancia entre los datos de referencia y la clasificación, los valores que aparecen por fuera de la diagonal suponen clasificaciones erróneas (Manuel y Muñoz, 2016).

Teniendo en cuenta lo anterior, se ilustra en la figura 3 la matriz construida de datos provenientes en terreno y sobre cartografía con las respectivas clases previamente definidas, donde se observan las concordancias y clasificaciones erróneas encontradas entre clases.

Figura 3.

Ejemplo de matriz de confusión en la evaluación de la calidad cartográfica



Nota. Las clases definidas A, B, C, D en este caso corresponden a los elementos: agua, carreteras, cultivos y casas, respectivamente. Tomado de *Análisis de Calidad Cartográfica mediante el estudio de la Matriz de confusión*, por Sánchez, 2016, Pensamiento Matemático, 6, (2).

5.2.7.2. Índice Kappa (k).

Es un indicador empleado para evaluar la concordancia de instrumentos de medida cuyo resultado es categórico, el cual fue propuesto por Cohen, (1960) y definido de la siguiente manera.

$$k = \frac{P_o - P_e}{1 - P_e} \quad (7)$$

Donde

P_o : proporción de acuerdos observados

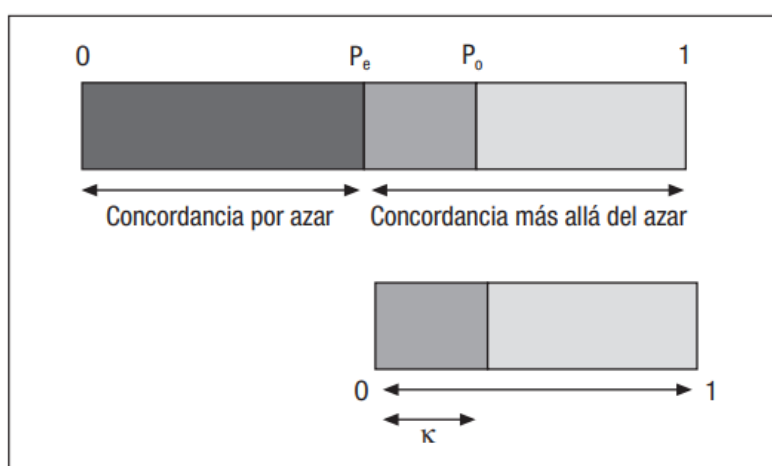
P_e : proporción de acuerdos esperados

El índice Kappa toma valores entre -1 y 1 y se espera que entre el valor sea más cercano a 1, el grado de concordancia inter-observador es mayor, mientras que un valor de $k=0$ indica que la concordancia observada es precisamente la que se espera por la existencia de un cierto grado de acuerdo exclusivamente por el azar (Cerdeira Lorca y Villarroel Del P., 2008)

Su distinción respecto a otros índices para evaluar la reproducibilidad de un instrumento se basa en la representación de la proporción de acuerdos observados más allá del azar respecto del máximo acuerdo posible más allá del azar (Abraira, 2001) es decir, los acuerdos observados se basan en la decisión, por lo cual debe excluirse la existencia de un cierto grado de acuerdo por azar, como se ejemplifica en la figura 4.

Figura 4.

Representación gráfica del índice Kappa.



Nota. En esta representación se expone que el uso del índice Kappa (κ) debe garantizar que los acuerdos observados estén basados en la decisión. Tomado de *El índice Kappa*, V. Abraira, 2001, Semergen – Medicina de la Familia, 27, (5)

Por su parte, Landis y Koch, (1977) propusieron una escala de valoración cuantitativa del índice Kappa (ver tabla 1) para su correcta interpretación de acuerdo con los posibles valores que puede tomar este índice, simplificando de esta manera su comprensión. Desde entonces, esta escala ha sido ampliamente empleada en investigaciones donde se requiere evaluar concordancias de instrumentos de medida y clasificaciones de datos provenientes de imágenes.

Tabla 1.

Escala de valoración del índice Kappa (k)

Tabla 1.	
Kappa (k)	Grado de acuerdo
< 0,00	Sin acuerdo
0,00 - 0,20	Insignificante
0,21 - 0,40	Mediano
0,41 - 0,60	Moderado
0,61 - 0,80	Sustancial
0,81 - 1,00	Casi perfecto

Nota. Adaptado de *El índice Kappa*, Abaira, 2001. *Semergen – Medicina de la Familia*, 27, (5).

5.3. Marco Referencial.

La teledetección se considera una herramienta sustancial para el análisis espacial en el estudio de fenómenos naturales que involucran ciencias como la geografía, geología, agricultura, oceanografía entre otras ramas de la ciencia (Villegas Vega, 2008) gracias a la adquisición de información a gran escala que permite realizar seguimientos e inventarios que sirven de apoyo en la gestión y el control de los recursos naturales, así como de las preocupaciones ambientales (Eduardo et al., s. f.).

Su principal atractivo se basa en la provisión y disponibilidad de datos históricos sincronizados en el tiempo sobre áreas extensas en todo el mundo con un alto nivel de detalle espacial y alta frecuencia temporal, las cuales se encuentran disponibles a un bajo costo, además de la reciente integración de la teledetección con los sistemas de información geográfica (SIG) (Sholarin y Awange, 2015).

Por lo anterior, esta técnica se considera de un alto beneficio para el desarrollo de la información científica que integra el componente espacial, utilizándose con frecuencia y eficacia para cuantificar los impactos del cambio climático a nivel mundial (Wang et al., 2021) al emplearse diferentes métodos para la clasificación de las imágenes, la determinación de la tasa de pérdida de los glaciares y la correlación con variables climáticas, entre otros, que permitan obtener nueva información sobre el estado de los recursos naturales.

Esto se puede evidenciar en el interés colectivo de estudiar a fondo el estado del recurso hídrico, concentrándose en evaluar y analizar la evolución de los glaciares existentes en todo el mundo, ya que dada su naturaleza; es posible determinar la incidencia de los factores del clima tales como la temperatura, la precipitación, el viento, entre otros, que afectan este recurso.

Como muestra de ello se tiene a Ke et al., (2017) los cuales se interesaron en estudiar la evolución de los glaciares en la Meseta de Tíbet relacionando las condiciones climáticas con los cambios presentes en las coberturas nevadas mediante la implementación de series temporales de variables climáticas locales y de gran escala, para lo cual, encontraron una disminución en las coberturas y una relación significativa entre la disminución del glaciar y las altas temperaturas, teniendo un fuerte impacto en el retroceso general de los glaciares estudiados y, por el contrario, una relación menos significativa entre la precipitación y los cambios en las áreas nevadas de la zona de estudio.

De manera similar, Wang et al., (2021) relacionaron el papel de las características climáticas con la respuesta variable del área del glaciar en la cuenca del río Kaidu-

Kongque en China para el periodo de tiempo comprendido entre el año 2000 al 2020. Al finalizar su estudio, los autores encontraron que los glaciares retrocedieron alrededor de 1,17 km²/año. Sin embargo, al igual que en el estudio anterior, no se encontró una relación significativa de la pérdida de los glaciares con la ausencia de las precipitaciones en la región de estudio, mientras que la correlación de la variabilidad de los glaciares con la temperatura fue mucho mayor.

Por el contrario, los autores Khali et al., (2022) encontraron que en el Valle de Zanskar, cordillera del Himalaya, India, la proporción de la capa de nieve no había disminuido significativamente durante las últimas dos décadas a pesar de encontrar una tendencia de aumento continuo de la temperatura en la zona de estudio, lo cual no contribuye a las afirmaciones sobre la pérdida alarmante de los glaciares en los últimos años a nivel mundial, por lo que los autores atribuyeron esta respuesta al corto periodo de tiempo estudiado, el cual, según mencionan los autores, es insuficiente para identificar tendencias.

Respecto a los métodos de clasificación de imágenes empleados recientemente en este tipo de estudios podemos ver a Guo et al., (2021) quienes desarrollaron un método de clasificación útil y efectivo para el mapeo de entornos glaciares complejos combinando series temporales de imágenes Landsat-5 Thematic Mapper (TM), Landsat-7 Enhanced TM (ETM+) y Landsat-8 Operational Land Image (OLI) y datos topográficos para mejorar la precisión de la clasificación de los elementos presentes en la zona de estudio por medio de la implementación del método basado en reglas y objetos jerárquicos (MHORC) en la plataforma de código abierto Google Earth Engine (GEE).

Este método según los autores, se basa en la segmentación de las imágenes para generar objetos homogéneos, clasificación múltiple basada en reglas mediante el marco OBIA, el procesamiento de las series de tiempo y finalmente, la descomposición de las series para analizar los cambios en los glaciares basados en el algoritmo de análisis armónico de series de tiempo (HANTS).

Para el estudio mencionado, los valores de fluctuación de la capa de nieve que fueron obtenidos mediante los modelos de series temporales fueron verificados con coeficientes de determinación R^2 , encontrando una tendencia de reducción acelerada del área del glaciar entre el año 1999 y 2015.

En otros aspectos, al relacionar el papel de las imágenes de satélite para la realización de este tipo de estudios, Alva Huayaney y Meléndez de la Cruz, (2014) aconsejan trabajar con datos de un mismo sensor para tener la misma referencia espectral, espacial y temporal, como es el caso de los estudios de Ke et al., (2017), Wang et al., (2021) y Khali et al., (2022) los cuales emplearon imágenes Landsat MSS/TM/ETM+/OLI y ETM para los dos primeros estudios respectivamente e imágenes del producto de cobertura de nieve de ocho días MOD10A2 del espectro espectral de imágenes de resolución moderada (MODIS) para el último estudio en mención.

Finalmente, a escala local, Monterroso-Tobar et al., (2018) cuantificación del retroceso glaciar del Volcán Nevado del Ruiz (VNR), Volcán Nevado de Santa Isabel (VNSI) y el Volcán Nevado del Tolima (VNT), utilizando imágenes satelitales Landsat OLI TIRS mediante la comparación de índices de discriminación de coberturas nevadas como el NDSI, NDSII, NDSII-2 y el NDGI, e implementaron una clasificación

supervisada de imágenes para diferenciar el límite de hielo entre otras coberturas existentes.

Los autores concluyen su estudio afirmando que el índice NDSI permitió obtener mejores resultados en la delimitación del área glaciar que los demás índices estudiados y lo consideran una herramienta oportuna como apoyo en estudios de glaciología. Sin embargo, se hace claridad que en zonas de nieve cubiertas de ceniza se aconseja acompañar esta técnica con procesos de digitalización manual para la una correcta identificación de nieve/hielo en un objeto de estudio.

6. MARCO METODOLÓGICO

6.1. Zona de estudio.

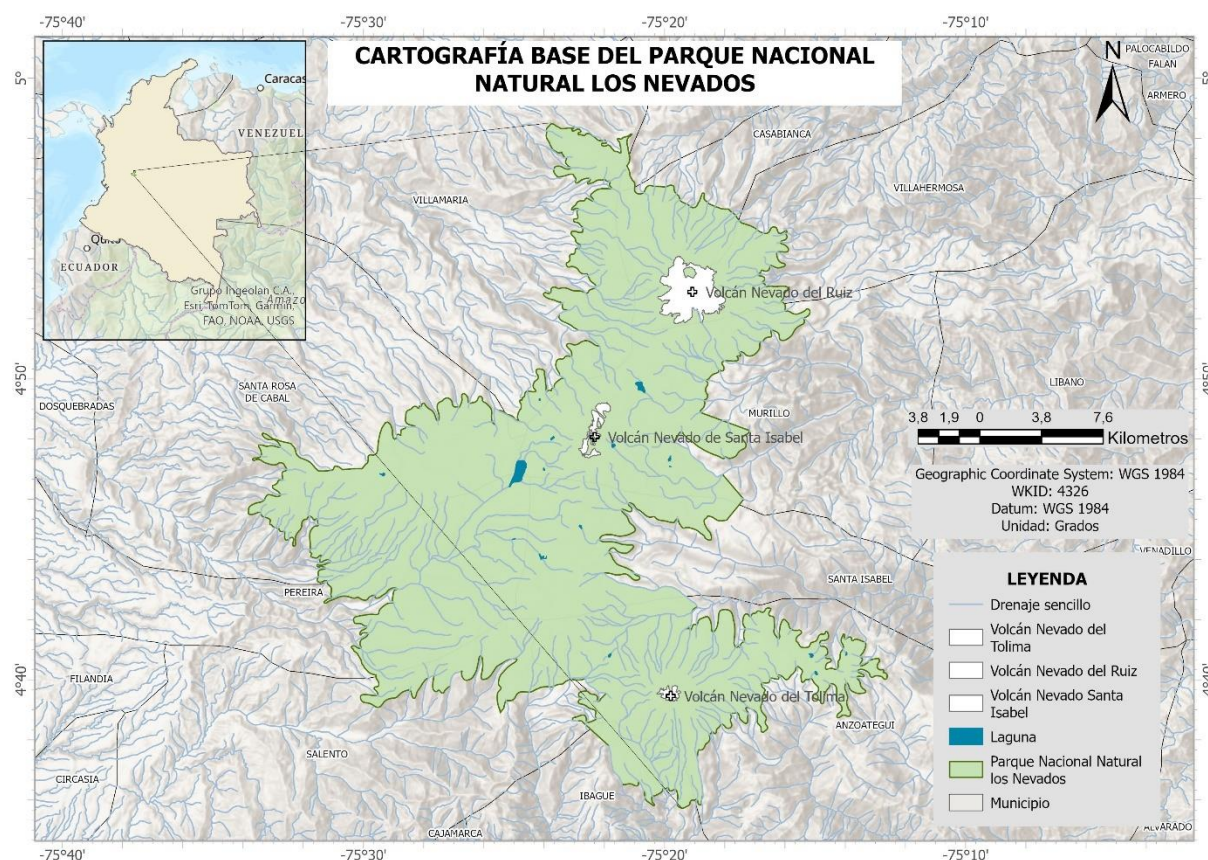
El PNN los Nevados hace parte de las 59 áreas protegidas que se componen el sistema de Parques Nacionales Naturales de Colombia, declaradas de gran importancia histórica, cultural y ambiental, destinadas para su reserva y conservación. El PNN los Nevados (Ver figura 5) se encuentra ubicado en la región cafetera de los Andes centrales de Colombia en jurisdicción de los departamentos de Caldas, Quindío, Risaralda y Tolima y cubre un área total aproximada de 8.000 ha. en el cual se encuentran los Nevados del Ruiz, Tolima y Santa Isabel los cuales representan en su área al año 2020 el 8.1 km², 0.52 km² y 0.45 km² respectivamente (Monterroso-Tobar et al., 2018).

Debido a las características ecosistémicas diversas que comprende el parque en relación con la flora y la fauna, el clima, las temperaturas bajas, sumado a su belleza natural; este lugar, se considera un atractivo turístico por los habitantes nacionales y

extranjeros, quienes disfrutan de su paisaje, lo que lo convierte por mucho en una zona natural representativa del país.

Figura 5.

Cartografía del Parque Nacional Natural los Nevados



6.1.1. Aspectos geográficos.

El Parque Nacional Natural los Nevados está ubicado en las coordenadas geográficas 4° 46' 35" N, 75° 20' 24" O. Está cubierto en grandes extensiones por bosques altoandinos, páramos y zonas nivales perpetuas, entre otras coberturas. Según el IDEAM, posee una altitud promedio de 4.092 m.s.n.m., siendo el Nevado del Ruíz el que presenta una mayor altitud con 5.330 m.s.n.m., seguido por el Nevado del Tolima con quien solo difiere por alrededor de 50 m.s.n.m., aproximadamente, (ver tabla 2),

mientras que el Nevado de Santa Isabel actualmente se posiciona como la montaña nevada con menor altitud de Colombia con 4.968 m.s.n.m.

Tabla 2.

Altitud nevados del PNN los Nevados

Tabla 2.	
Nevado	Altitud (m.s.n.m)
Ruiz	5.330
Tolima	5.280
Santa Isabel	4.968

6.1.2. Características climáticas

Las temperaturas dentro del PNN varían desde los -4°C hasta los 14°C dependiendo de la región debido a que existen diversos pisos térmicos en los departamentos que componen el Parque como el frío, páramo y gélido, siendo esto favorable para la variabilidad climática debido al clima tropical de la zona. Por su parte, en algunas estaciones meteorológicas cercanas al PNN como la Estación Cumanday y la Estación Santa Isabel se registran temperaturas mínimas de -5.37°C y 0.72°C , respectivamente y temperaturas máximas de -0.04°C y 2.54°C , respectivamente.

Los meses secos se dan entre los periodos diciembre-febrero y julio-agosto, por el contrario, los meses lluviosos se dan entre abril-mayo y octubre-noviembre. En los meses húmedos, la zona norte y oriente del parque alcanza valores promedios mensuales aproximados a 200 mm/mes, mientras que la zona sur y occidente presenta valores promedios mensuales cercanos a 400 mm/mes. Por el contrario, los meses secos que se dan en la zona norte y oriente del parque presenta promedios

mensuales que oscilan entre los 50 mm/mes a 100 mm/mes mientras que la zona sur y occidente alcanza precipitaciones medias de 100 mm/mes.

6.1.3. Hidrología

El Parque posee una gran importancia hidrográfica en beneficio de los 4 departamentos que hacen parte de su jurisdicción; esto, dada la cantidad de fuentes de agua que nutren las dos grandes cuencas interiores del país: la del Cauca al occidente y la del Magdalena al oriente.

El deshielo de los glaciares permanentes en su ciclo de fusión permite la conformación de alrededor de 10 cuencas que drenan a ríos como: el río Otún, río Quindío, río Totarito, río Azufrado, río Lagunillas, río Campoalegre y río Gualí. Abasteciendo alrededor de 3.000.000 habitantes de la región del Eje Cafetero (Parques Nacionales Naturales de Colombia, 2017) y brindando apoyo en la agroindustria predominante del algodón y del arroz en el Valle del río Cauca y del Magdalena; sectores catalogados como los más productivos del país.

6.2. Materiales y equipos.

Para el desarrollo de la investigación se hizo uso de la plataforma Google Earth Engine - GEE (Moore y Hansen, 2011), la cual dispone de una variedad de catálogos de imágenes satelitales y conjuntos de datos geoespaciales de carácter público, los cuales son empleados ampliamente en análisis espaciales a diferentes escalas en todo el mundo. Dentro del catálogo de datos que proporciona GEE, se destaca el Espectrorradiómetro de Imágenes de Resolución Moderada (MODIS) a bordo de los satélites Terra y Aqua, que proporcionan una estimación de la reflectancia espectral

de la superficie terrestre con una alta temporalidad; permitiendo obtener imágenes diarias o semanalmente con una cobertura de nieve mínima.

Teniendo en cuenta las características espaciales, espectrales y temporales de las imágenes MODIS, en el presente estudio se optó por emplear el compuesto de 8 días MOD09A1 versión 6.1 que contiene las bandas de 1 a 7 de Terra MODIS a una resolución espacial de 500 metros (m) las cuales se encuentran corregidas para condiciones atmosféricas como gases, aerosoles y dispersión de Rayleigh. Las especificaciones del producto MOD09A1 y se muestran en la tabla 3.

Tabla 3.

Bandas del producto MOD09A1 del sensor MODIS.

Tabla 3.			
Bandas	Descripción	Longitud de onda	Escala
sur_refl_b01	Surface Reflectance Band 1	620-670 nm	0.0001
sur_refl_b02	Surface Reflectance Band 2	841-876 nm	0.0001
sur_refl_b03	Surface Reflectance Band 3	459-479 nm	0.0001
sur_refl_b04	Surface Reflectance Band 4	545-565 nm	0.0001
sur_refl_b05	Surface Reflectance Band 5	1230-1250 nm	0.0001
sur_refl_b06	Surface Reflectance Band 6	1628-1652 nm	0.0001
sur_refl_b07	Surface Reflectance Band 7	2105-2155 nm	0.0001
QA	Surface reflectance 500m band quality control flags	N/A	N/A
SolarZenith	MODIS solar zenith angle	N/A	N/A
ViewZenith	MODIS view zenith angle	N/A	N/A
RelativeAzimuth	MODIS relative azimuth angle	N/A	N/A
StateQA	Surface reflectance 500m state flags	N/A	N/A
Bitmask for StateQA	Julian day of the year for the pixel	N/A	N/A

Nota. Adaptado de *Bands*, Earth Engine Data Catalog. https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/MODIS_061_MOD09A1.

Para este producto se obtuvo una colección de 965 imágenes una vez definido el rango de tiempo estudiado y la geometría del área de estudio, la cual fue empleada

en el Análisis de Imágenes Basado en Objetos Geográficos (GEOBIA) para la determinación de áreas glaciares, el posterior cálculo de las tasas anuales de pérdida y ganancia de nieve y la obtención de la serie temporal que relaciona las estimaciones de variación de la cobertura glaciar de los nevados con respecto a variables climáticas.

Con relación a los datos climáticos, la temperatura superficial media para el periodo de tiempo estudiado se estimó haciendo uso del producto MOD11A2 del sensor MODIS TERRA para la cual se obtuvo un total de 965 imágenes en la colección. Estos datos proporcionan un promedio de la temperatura superficial terrestre (LST) de 8 días en una cuadrícula de 1200 x 1200 km y se obtienen con una frecuencia temporal de 8 días.

Para los datos climáticos de precipitación, se hizo uso del conjunto de datos de TERRACLIMATE el cual utiliza un modelo de balance de agua que incorpora referencia de evapotranspiración, precipitación y capacidad de agua del suelo extraíble de plantas interpoladas a 4.638,3 metros de resolución espacial. Teniendo en cuenta que la temporalidad de la obtención de las imágenes se realiza de manera mensual, para este estudio se empleó una colección con 252 imágenes previamente filtradas por la fecha del periodo de estudio y la geometría del área de estudio.

Para el procesamiento de las imágenes obtenidas desde GEE se hizo uso del software ArcGIS Pro para llevar a cabo tareas repetitivas como la conversión de archivos ráster a archivos vectoriales, la transformación de Sistema de Coordenadas y el cálculo de las áreas de las coberturas presentes en las imágenes, todo esto haciendo uso del paquete ArcPy del lenguaje de programación Python dada la facilidad que brinda para automatizar procesos. Finalmente, el uso de la herramienta

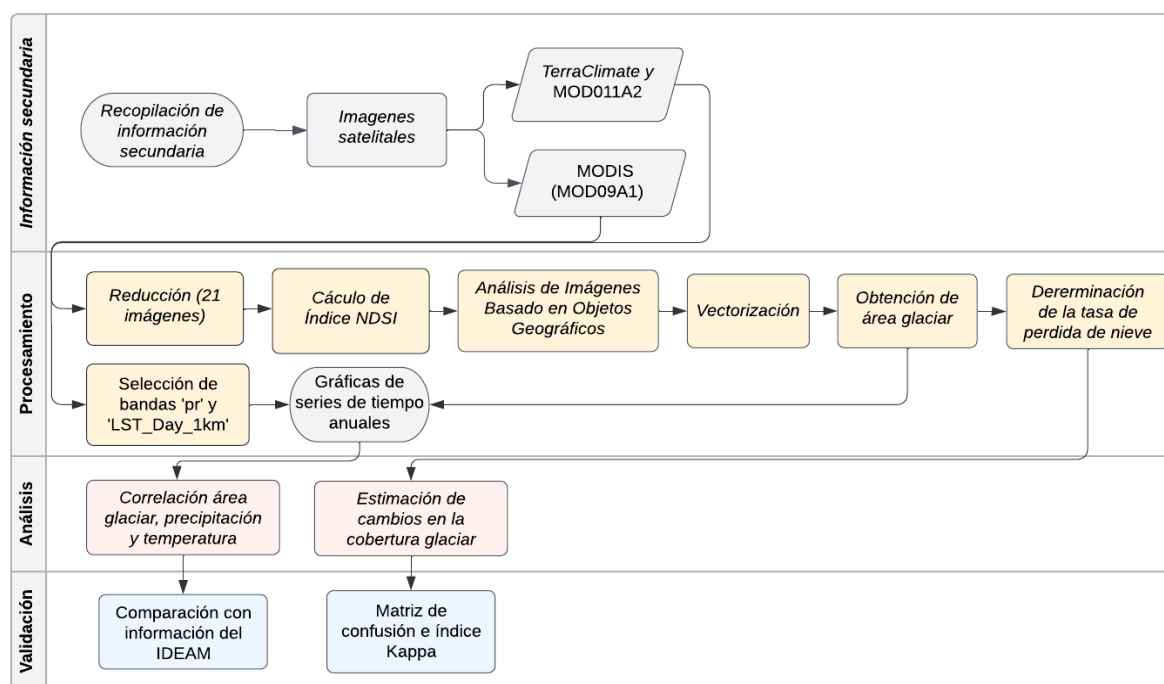
Excel orientada a un enfoque de análisis estadístico se incorpora en esta investigación para sustentar la calidad de la información de los productos obtenidos en las distintas fases del estudio realizado, así como en la validación del proyecto.

6.3. Flujo metodológico.

El flujo metodológico empleado en esta investigación se ilustra en la figura 6, el cual combina enfoques de recopilación de datos, análisis geoespacial, técnicas estadísticas y validación rigurosa de los resultados obtenidos con el objetivo de proporcionar una comprensión completa del impacto del cambio climático en la dinámica de los glaciares que se encuentran en el Parque Nacional Natural los Nevados.

Figura 6.

Diagrama de flujo metodológico.



6.3.1. Recopilación y preparación de la información secundaria.

Inicialmente, se obtienen colecciones de imágenes satelitales desde la plataforma de GEE del producto MODIS (MOD09A1 y MOD11A2) y TERRACLIMATE, se aplican filtros por geometría del área de estudio, temporalidad y se realiza una reducción de los datos recopilados por medio de la media estadística de los valores de cada píxel de todas las bandas coincidentes. Esto, con el objetivo de disminuir significativamente el volumen de datos, lo que resulta en un procesamiento más veloz, y, en el caso de las series de tiempo, conlleva a un análisis más eficiente, al mismo tiempo que garantiza una precisión igualmente alta que los datos originales de toda la serie temporal (Miller, 2017).

Figura 7.

Enmascaramiento de nubes en imágenes MODIS.



Nota. Imágenes filtradas por el área de estudio y reducidas a un año específico A. imagen original. B. imagen obtenida del enmascaramiento realizado.

Posteriormente, se realiza un enmascaramiento de las nubes presentes en las imágenes reducidas mejorando la generación de los productos obtenidos al eliminar considerablemente las nubes, como se observa en la figura 7 y evitar su interferencia

en la visibilidad de las coberturas presentes en las imágenes que serán empleadas en la selección de las zonas de entrenamiento para la implementación de GEOBIA.

Este proceso se lleva a cabo haciendo uso de la banda de control de calidad que contienen las imágenes satelitales MODIS, denominada StateQA para la cual existe un catálogo de valores de bits y su correspondencia a la información que representan en las imágenes. Para este caso se emplearon los bits de 0–1 denominados Cloud State (Ver tabla 4) seleccionando el valor de 0; que corresponde a “Clear”, lo que permitió eliminar un gran porcentaje de nubes presentes en las imágenes.

Tabla 4.

Bits en imágenes MODIS.

Tabla 4.	
Bits	Valores
0-1: Cloud state	0: Clear
	1: Cloudy
	2: Mixed
	3: Not set, assumed clear

Nota. Adaptado de Earth Engine Data Catalog. https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/MODIS_061_MOD09A1

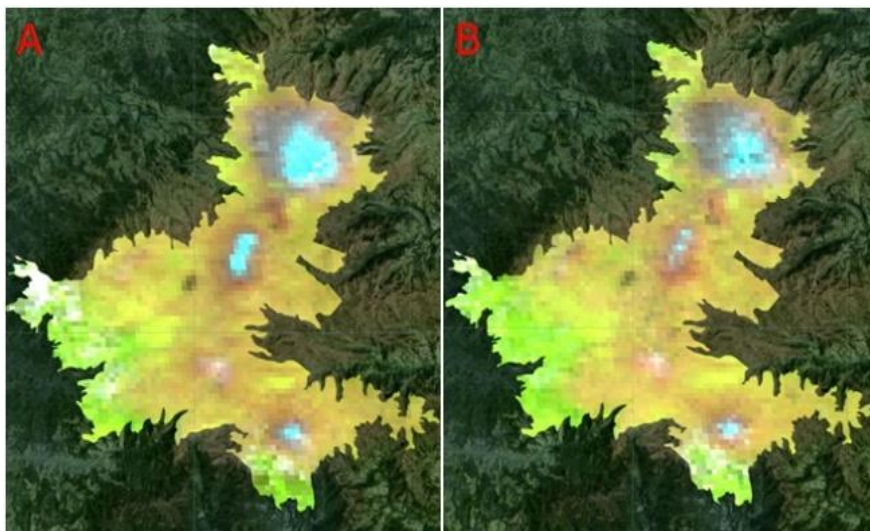
6.3.2. Clasificación Supervisada Orientada a Objetos Geográficos.

Previamente, se realiza un reconocimiento foto-interpretativo de las imágenes obtenidas para el periodo de tiempo estudiado con el objetivo de identificar y seleccionar las zonas o píxeles de entrenamiento. En este proceso, la composición en falso color de las imágenes haciendo uso de las bandas SWIR 1, NIR y red ilustrada en la figura 8, permitió una mejor visualización de las coberturas nevadas para su identificación en tonos cian y no en tonos blancos; como generalmente se

conocen en una combinación en color verdadero, dada la posibilidad de confundirse con nubes.

Figura 8.

Imágenes en falso color empleadas para la detección de nieve.



Nota. Imagen en falso color usando las bandas SWIR 1, NIR y red. La imagen A (Izquierda) corresponde al año 2001 y la Imagen B (derecha) corresponde al año 2021.

Teniendo en cuenta que la zona de estudio cuenta con alta presencia de afloramientos rocosos, suelo expuesto, páramos y lagunas de pequeñas áreas; objetos que no fueron de interés en esta investigación, se optó por unir estas coberturas en una sola clase y denominarlas “otras coberturas” mientras que se dio prioridad a la clasificación de las coberturas glaciares teniendo en cuenta que es la clase sobre la cual se basan los análisis en este estudio. De acuerdo con lo anterior, la clasificación supervisada GEOBIA se llevó a cabo teniendo en cuenta las dos (2) coberturas definidas relacionadas en la tabla 5.

Para la definición de las zonas de entrenamiento se partió de la imagen satelital del año 2001 para su respectiva clasificación mediante puntos elegidos al azar y con el

pasar de los años estos puntos iniciales se ajustaron teniendo en cuenta que las coberturas generalmente son cambiantes año tras año. En algunos casos no fue necesario realizar este ajuste dado que los cambios que se presentaron no fueron significativos. En el caso de las modificaciones realizadas, la plataforma de GEE permitió un flujo de trabajo eficaz al brindar la posibilidad de navegar entre imágenes de distintos años y determinar si las zonas de entrenamiento correspondían a las asignadas inicialmente.

Tabla 5.

Definición de clases para la clasificación supervisada GEOBIA.

Tabla 5.		
Valor	Clase	Color
1.	Zona glaciares y nivales	
2.	Otras coberturas	

Se seleccionaron 40 zonas ubicadas mayormente en las cumbres de los nevados para la clasificación de las zonas glaciares y nivales; teniendo en cuenta que en estos lugares la cobertura de nieve es más estable debido a la condición de altitud y bajas temperaturas. En el caso de las coberturas sin nieve, se seleccionaron 60 zonas, intentando abarcar todas las coberturas presentes en las imágenes y aquellas zonas que inicialmente en una primera clasificación se identificaron como nieve erróneamente. Estas zonas o puntos de entrenamiento se guardaron en un FeatureCollection para su posterior uso en el entrenamiento de la clasificación.

Por otra parte, se construye una banda con los valores del índice NDSI calculado por medio de la ecuación 1, que una vez aplicada la segmentación SNIC, se recalcula de acuerdo con sus valores medios para ser empleada en el entrenamiento de la

clasificación supervisada, permitiendo analizar la respuesta espectral del índice de acuerdo con las coberturas existentes. El uso de este índice en el presente estudio se basa en la literatura consultada, el cual, se destaca por proporcionar mejores resultados en la discriminación de las coberturas nevadas como lo muestra (Monterroso-Tobar et al., 2018) y (Salas Pérez et al., 2019) en estudios realizados al Parque Nacional Natural los nevados y al Volcán Nevado del Ruiz, respectivamente.

En la aplicación del algoritmo SNIC en mención, se eligió un factor de compacidad de 8 para obtener segmentos de superpíxeles compuestos por grupos de píxeles más compactos, a la vez que visualmente se observó que este valor realizó mejores agrupaciones que otros escogidos inicialmente. Posteriormente, en la implementación del clasificador, en este caso el algoritmo Random Forest (RF) se definió una cantidad de 50 árboles de decisión teniendo en cuenta que es un valor considerado confiable; según la literatura consultada en la sección 5.2.4.3.1. que tiene la posibilidad de cubrir todos los casos o posibilidades, y dado que la complejidad de la clasificación para este estudio no es alta, al considerar solo dos clases de coberturas en las imágenes.

Una vez que se definen los parámetros de los algoritmos a utilizar, se entrena el modelo a partir de las muestras de entrenamiento recolectadas y se configura la paleta de colores de las clases previamente definidas en la tabla 5; es posible obtener las clasificaciones supervisadas de las imágenes para cada uno de los años estudiados. Las clasificaciones obtenidas desde la plataforma GEE son descargadas y posteriormente procesadas haciendo uso del software ArcGIS Pro en el cual se llevaron a cabo ajustes en las clasificaciones obtenidas y procesos en los que se empleó el paquete de ArcPy en tareas como la vectorización, reproyección al sistema de coordenadas Magna-Sirgas Origen Central (3116), cálculo de áreas de las

coberturas por medio de la adición de un campo “Área” en la tabla de atributos y finalmente, la validación de las clasificaciones realizadas por medio de la obtención de matrices de confusión para cada clasificación y su posterior cálculo del índice Kappa.

6.3.3. Obtención de series de tiempo

Una vez implementado el análisis de imágenes y obtenidas las clasificaciones supervisadas junto con los valores en superficie para los nevados, se empleó esta información para construir series de tiempo que relacionan las variables climáticas con el comportamiento de la dinámica glaciaria. Para los datos climáticos se hizo uso del conjunto de datos de TERRACLIMATE y del producto MOD11A2 del sensor MODIS para las variables de precipitación y temperatura, respectivamente. Información que fue reducida de forma anual por medio de la media estadística para un mejor entendimiento y análisis de los datos.

Inicialmente se contempló la incorporación de datos obtenidos de estaciones climáticas como parte fundamental del proceso, con el objetivo de establecer una correlación precisa entre las variables climáticas y la evolución de los glaciares, durante la fase inicial del estudio se encontró un desafío significativo que fue la falta de estaciones climáticas cercanas que proporcionaran datos completos para toda la serie temporal.

Ante esta situación, se decidió aprovechar la disponibilidad de datos en formato ráster con una resolución espacial más generalizada y accesible a nivel global, lo que permitió mantener la continuidad del análisis y la investigación, asegurando la

cobertura temporal y espacial necesaria para abordar de manera integral los procesos y el análisis de la siguiente sección.

No obstante, con la intención de corroborar la información de los parámetros climáticos obtenidos por medio de las imágenes satelitales, se emplearon datos recopilados de la estación climática las Brisas que cuenta con disponibilidad de datos para todos los años estudiados; siendo la estación climática activa más cercana al Volcán Nevado del Ruiz, para comparar por medio de análisis estadísticos su efectiva contribución a los análisis desarrollados en la siguiente sección con respecto a los cambios en superficie glaciar y variables climáticas.

7. RESULTADOS Y ANÁLISIS.

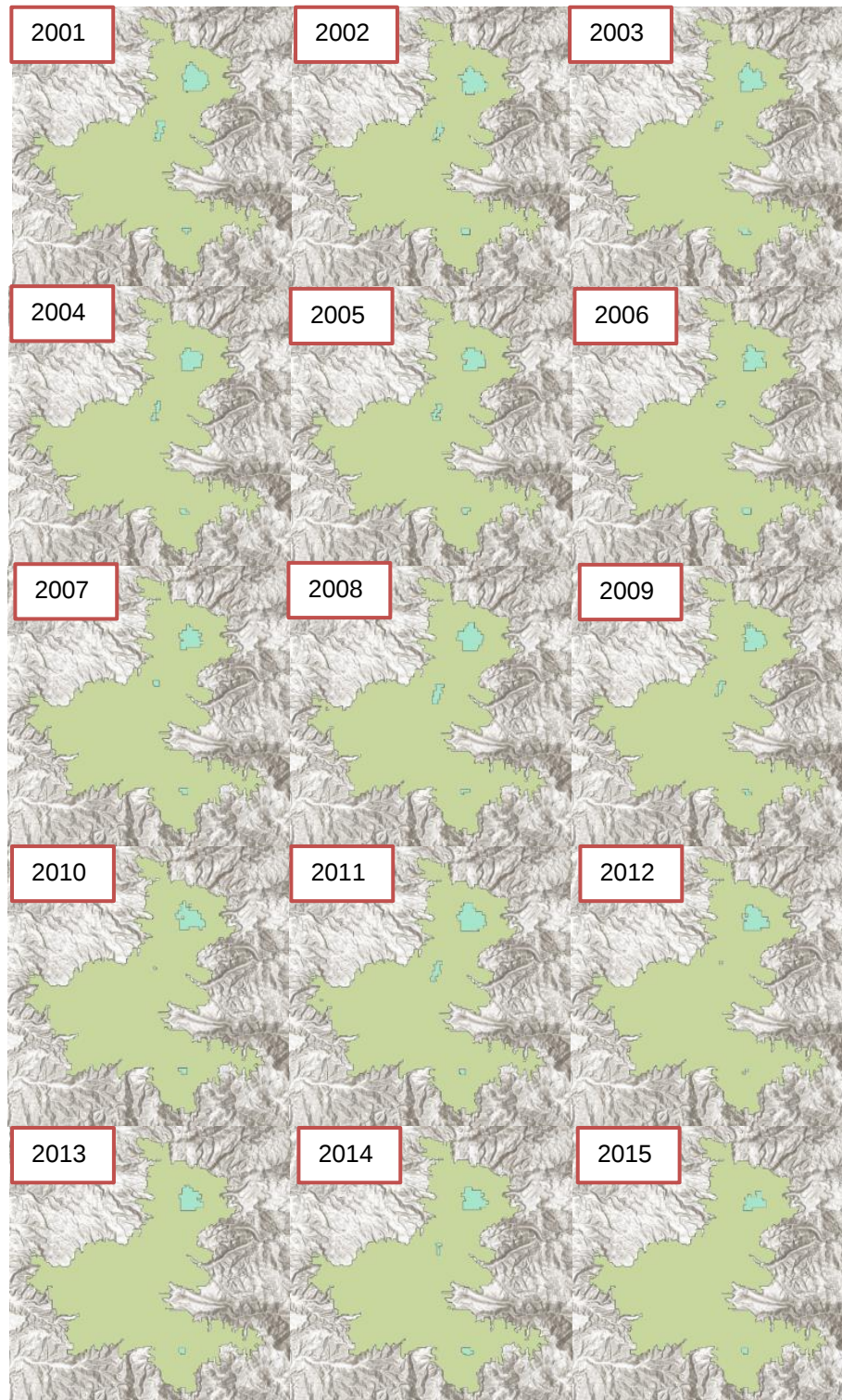
7.1. Estimación de cambios en la dinámica glaciar del PNN los Nevados.

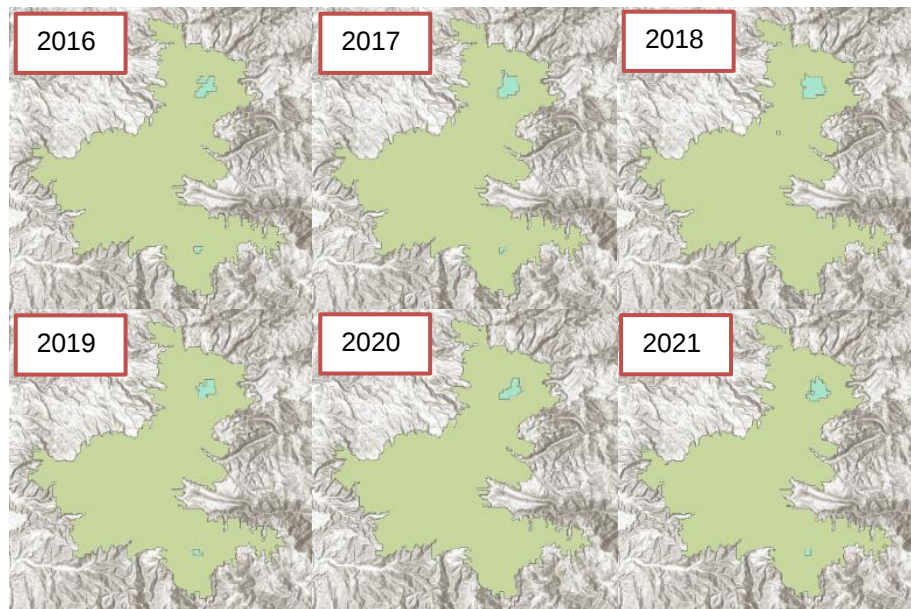
En primera instancia, se obtienen 21 clasificaciones supervisadas de las imágenes para el periodo de tiempo estudiado mediante el Análisis de Imágenes Basados en Objetos Geográficos (GEOBIA) que fueron el punto de partida para los análisis abordados respecto a las diferencias de coberturas en superficie y cambios en la dinámica de los glaciares y su relación con variables y fenómenos climáticos.

Estas clasificaciones supervisadas obtenidas se muestran como un mosaico de imágenes en la figura 9, con la intención de visibilizar los cambios y las transiciones que se presentaron entre coberturas con el pasar del tiempo, brindando en un primer momento una noción clara sobre la evolución de los glaciares de la zona de estudio.

Figura 9.

Clasificaciones supervisadas empleando GEOBIA 2001-2021.

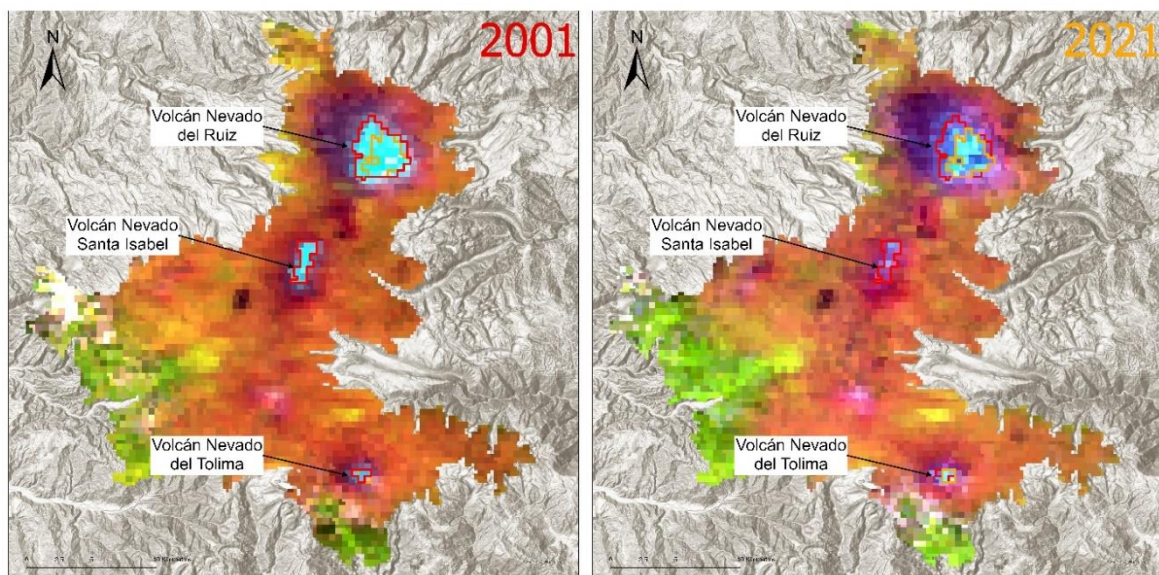




Para una mejor visualización y entendimiento de los resultados obtenidos, se muestra en la figura 10 una superposición de la clasificación inicial del año 2001 y la clasificación final del año 2021 con el objetivo de visibilizar los cambios de las coberturas glaciares con los que se inició y se culminó el presente estudio.

Figura 10.

GEBOIA para años 2001 y 2021.

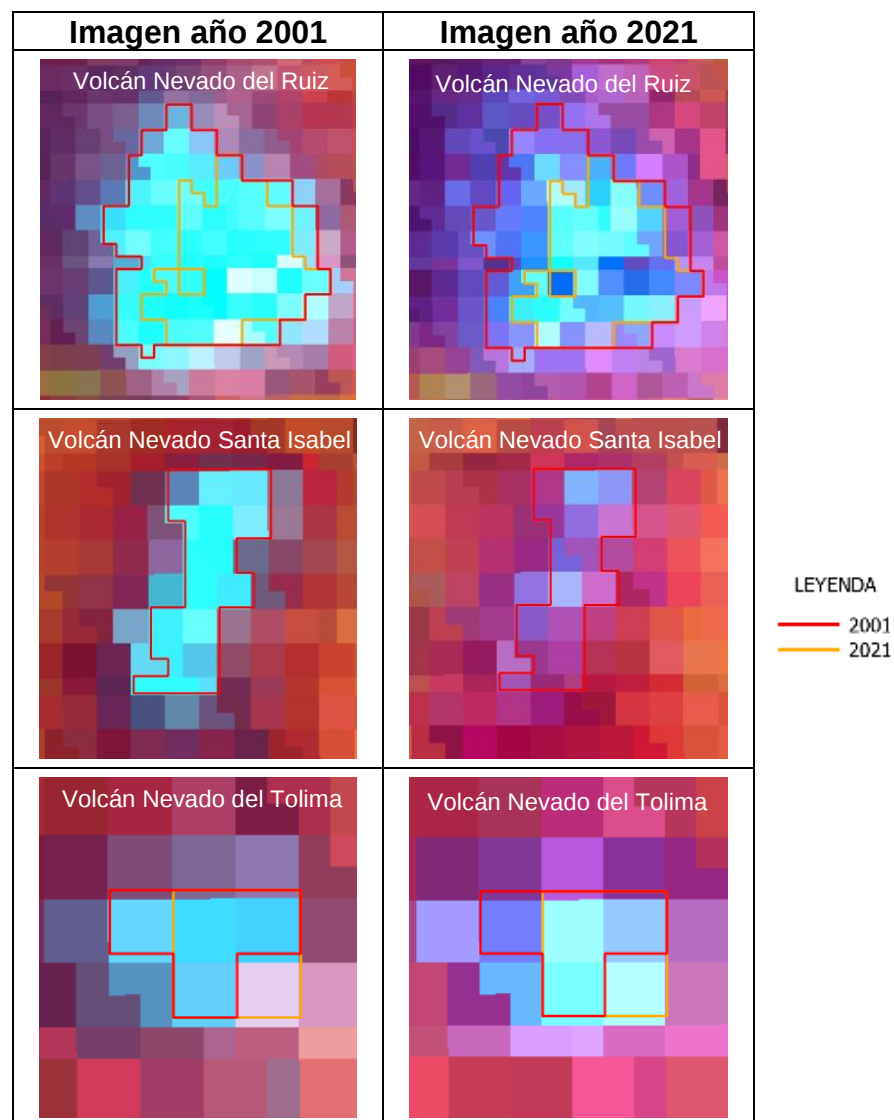


Nota. La imagen del año 2001 (izquierda) y 2021 (derecha) contienen los polígonos producto de las clasificaciones para los años 2001 (rojo) y 2021 (naranja).

Así mismo, en la tabla 6 se observan imágenes detalladas de las coberturas de hielo/nieve para los años 2001 y 2021 de los glaciares estudiados. A partir de esta información se observa que el Volcán Nevado del Ruíz y el Volcán Nevado de Santa Isabel presentaron cambios significativos en sus coberturas mientras que el Volcán Nevado del Tolima se mantuvo estable en sus valores de superficie al inicio y al final del estudio. Por otra parte, se observa que el glaciar Santa Isabel tuvo una reducción significativa de sus coberturas que se refleja en la ausencia de área para el año 2021.

Tabla 6.

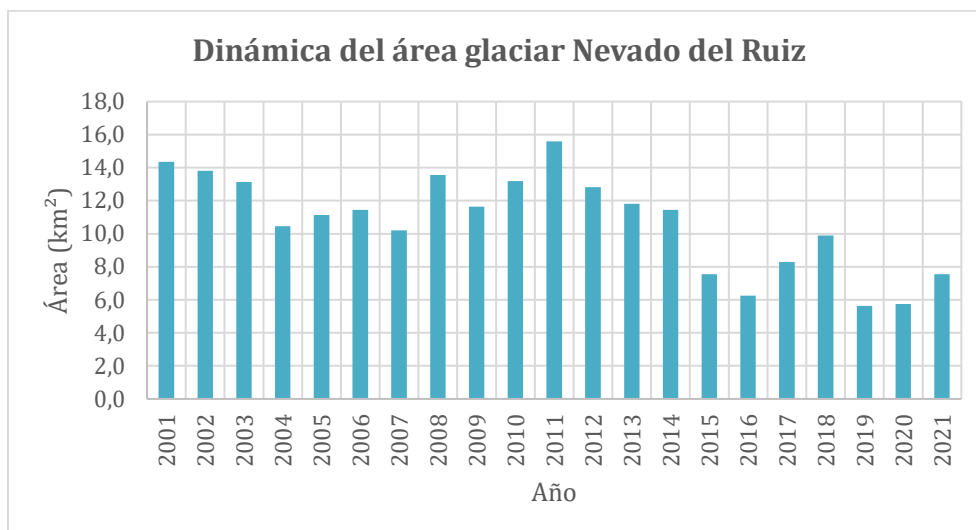
Clasificación supervisada de los glaciares en los años 2001-2021



Las clasificaciones realizadas para el Volcán Nevado de Santa Isabel se verificaron haciendo uso del índice NDSI, encontrando que los valores de las zonas de entrenamiento fueron menores al umbral establecido de 0.4 que representa coberturas de nieve sólidas con un porcentaje mayor al 50% respecto a otras coberturas. Razón por la cual, según la clasificación implementada en el presente estudio, estas zonas corresponden a la clase denominada “otras coberturas”.

El Volcán Nevado del Ruiz con el pasar de los años se ha catalogado como uno de los volcanes nevados más estables de Colombia, lo que se atribuye ampliamente a que aproximadamente el 93% de su superficie está por encima de los 5.000 m.s.n.m. donde la temperatura alcanza valores por debajo de los cero grados Celsius promoviendo la conservación de las coberturas nevadas en esas zonas. Sin embargo, no todo es alentador respecto a este glaciar, pues en el presente estudio se logran estimar dinámicas con tendencias decrecientes presentadas a partir del año 2011 que solo tuvieron un incremento significativo únicamente en los años 2017 y 2018, como se puede observar en la figura 11.

Este decrecimiento en las coberturas glaciares coincide un año después con las actividades volcánicas que se dieron a partir del año 2010 representadas por la caída de ceniza y material piroclástico caliente emitido durante las erupciones volcánicas sobre la superficie del glaciar, la reducción significativa del albedo de las superficies glaciares por la acumulación de cenizas volcánicas y el aumento de la temperatura en el lecho rocoso. Acciones que se relacionan fuertemente con la fusión acelerada de la capa de hielo y nieve en cortos periodos de tiempo en los glaciares situados y a cercanías de estas formaciones activas, como el Volcán Nevado del Ruiz y el Volcán Nevado de Santa Isabel para este caso. (IDEAM, 2001)

Figura 11.*Dinámica glaciar del Nevado del Ruiz*

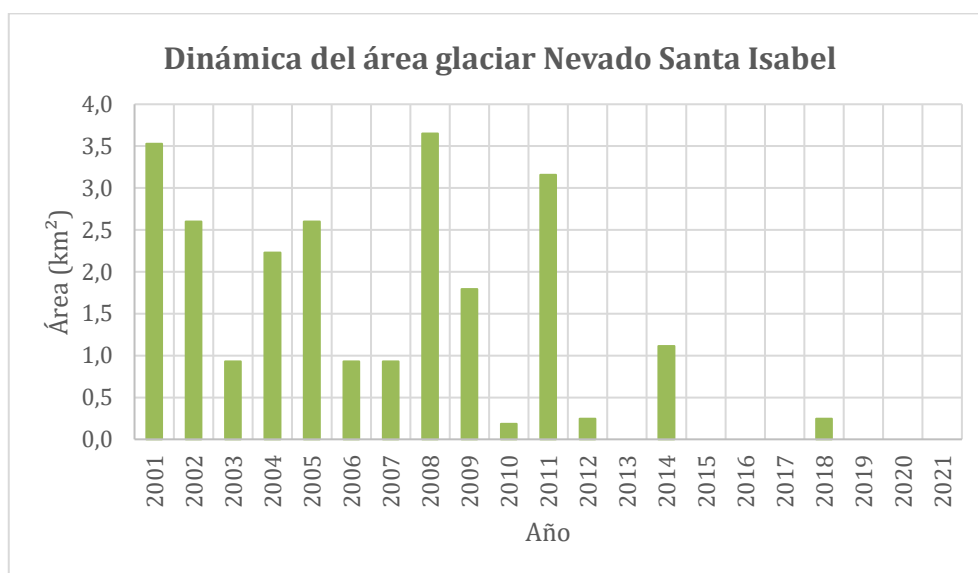
Con respecto al Volcán Nevado de Santa Isabel, el IDEAM ha confirmado que, en mayor proporción, gran parte de sus nieves no son perpetuas (IDEAM, s. f.) viéndose esto reflejado en los resultados de las clasificaciones supervisadas para los últimos años del estudio, en los cuales, la clasificación supervisada entrenada no identificó píxeles con coberturas nevadas en esas zonas. Es decir que las coberturas glaciares no fueron lo suficientemente sólidas y continuas para llegar a ser detectadas.

Es importante recalcar que para el entrenamiento de la clasificación supervisada se apoyó de manera considerable en los valores del índice NDSI para las zonas glaciares que no presentaron coberturas de hielo/nieve en los últimos años como el Volcán Nevado de Santa Isabel y el Volcán Nevado del Tolima, teniendo en cuenta que haciendo uso de las imágenes obtenidas no fue posible determinar con certeza algunas zonas de entrenamiento debido a la baja resolución espacial y las escasas coberturas con nieve que estaban presentes en estas fechas.

De acuerdo con lo anterior, para los años mencionados no se presentaron coberturas glaciares en el Nevado de Santa Isabel para los años 2013, 2015, 2016, 2017, 2019, 2020 y 2021 dado que el índice NDSI fue menor a 0.4, afectando considerablemente la clasificación implementada y dando como resultado valores en su superficie de 0 km², como se observa en la figura 12. De la misma manera, el Nevado del Tolima no registró coberturas de hielo/nieve en los años 2018 y 2020.

Figura 12.

Dinámica glacial del Nevado de Santa Isabel



Es importante aclarar que en las zonas donde las coberturas de nieve se encuentran mezcladas con otras coberturas como rocas, morrenas, agua, etc., el índice NDSI no realiza una diferenciación del hielo/nieve efectiva cuando estas coberturas son menores que el 50% dado que, en un umbral menor al definido, este índice las descarta por no considerarlas nieves perpetuas.

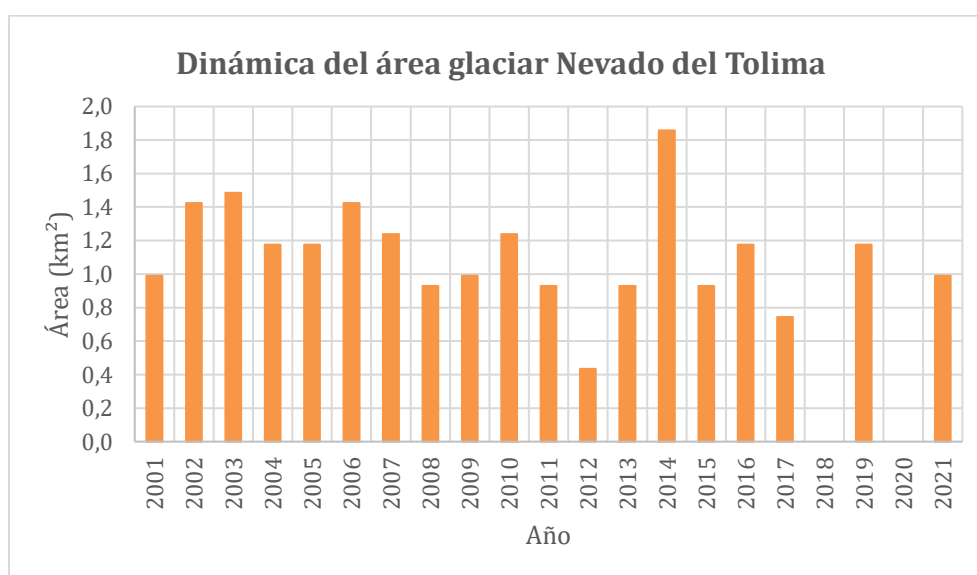
Aquí es importante entender que el índice NDSI según Riggs et al., (2015) se basa en considerar pixeles con nieve a aquellos valores positivos en los que $NDSI > 0$, mientras que los valores negativos del índice donde $NDSI < 0$ los considera como

zonas libres de hielo/nieve. Sin embargo, lo anterior no significa que trabajar con umbrales mayores a cero y menores que 0.4 para detectar hielo/nieve sea conveniente, dado que entre el valor del índice sea más cercano a cero, las probabilidades de la existencia de nieve son mínimas o incluso nulas. Esto se pudo comprobar al elegir diferentes valores de umbrales y obtener clasificaciones sesgadas donde las coberturas no correspondían a lo esperado.

Por otra parte, de manera similar que el Volcán Nevado del Ruiz, el Volcán Nevado del Tolima se conoce como un nevado que no ha tenido un retroceso significativo en sus coberturas. Aunque es un nevado con una superficie menor, su altitud, topografía y morfología cónica favorece y promueve su conservación en el tiempo, como se puede observar en la gráfica de la figura 13 que relaciona el área glaciaria en el tiempo, donde si bien se observan cambios significativos en las dinámicas glaciares, se destaca que se inicia y se termina el estudio con el mismo valor de superficie.

Figura 13.

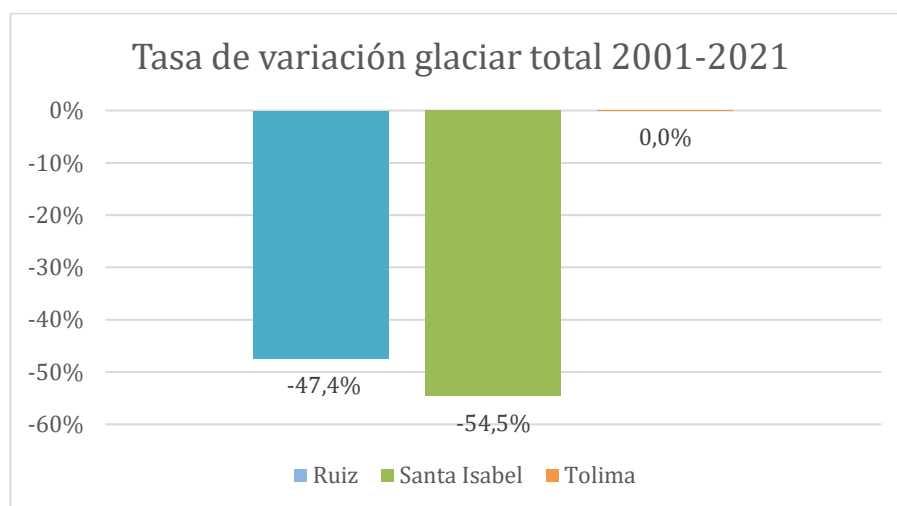
Dinámica glaciaria del Nevado del Tolima



A nivel general, la dinámica glaciaria del Parque Nacional Natural los Nevados presentó una amplia variabilidad, en la cual, se presentan tendencias decrecientes que se definen de acuerdo con los cambios presentados en las áreas de los glaciares para cada año estudiado. Con el objetivo de brindar un estimativo general de los cambios presentados en las coberturas nevadas, se muestra en la figura 14 la tasa de variación global para cada glaciar.

Figura 14.

Tasa de variación glaciaria total de los glaciares estudiados.

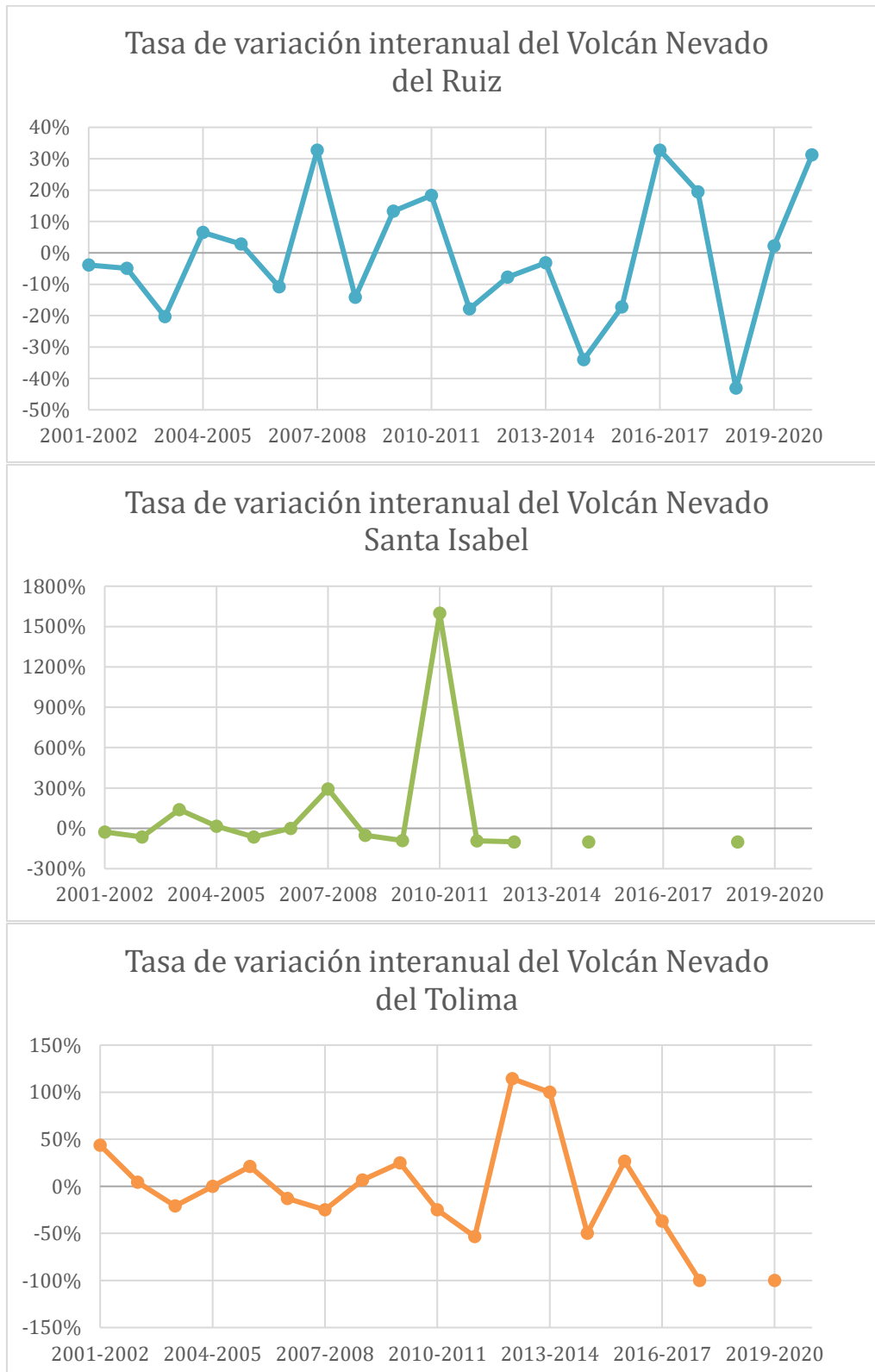


De acuerdo con la figura anterior, se observa que el Volcán Nevado de Santa Isabel es el nevado que más disminución en sus áreas y tendencias negativas presentó, decreciendo a una tasa de -54,5%, seguido por el Volcán Nevado del Ruiz que representa una tasa de pérdida de coberturas de hielo/nieve del -47%. Por su parte, el Volcán Nevado del Tolima presentó una tasa de cambio del 0% respecto a los valores en superficie obtenidos al inicio y al final de esta investigación. Lo anterior no significa que no se presentaron cambios significativos año tras año durante las dos décadas de estudio, sino más bien que el volcán nevado inició y finalizó el estudio con un valor de área igual.

Ya en un análisis más específico, se obtienen las tasas de cambio anuales para las variaciones en superficie de los glaciares del Ruiz, Tolima y Santa Isabel, respectivamente, ilustradas en la figura 15. Se aclara que en periodos puntuales no fue posible calcular las tasas de cambio dado que los valores en superficie se estimaron en 0 km², como lo fueron los últimos años para el Volcán Nevado de Santa Isabel y en dos años para el Nevado del Tolima, siendo imposible aplicar la ecuación que define la tasa de variación interanual.

A partir de esta información es de notar que los últimos 6 periodos del Volcán Nevado del Ruiz, los periodos 2012-2013 y 2014-2015 para el Volcán Nevado del Tolima y 2010-2011 para el Volcán Nevado de Santa Isabel, presentaron comportamientos diferenciados respecto a los demás periodos de tiempo, lo cual se refleja en crecimientos y decrecimientos abruptos. Por ejemplo, el Volcán Nevado de Santa Isabel en el periodo 2010-2011 presentó el aumento más significativo en las coberturas glaciares, pasando de 0.2 km² a 3.2 km², lo que se traduce en un aumento de 3 km² en su área. Un caso similar se observa en el Volcán Nevado del Tolima, con un aumento de 114%, pasando de 0.43 km² a 0.93 km² para el periodo 2012-2013 y finalmente, se tiene el nevado del Ruiz con tasas de variación mayores al 30% para los periodos 2007-2008, 2016-2017 y 2020-2021.

Por el contrario, en cuanto a las variaciones negativas, se tiene el periodo 2018-2019 del Nevado del Ruiz, presentando la variación más significativa representada por la pérdida de -43.1% de cobertura glaciar. Los Volcanes Nevados de Santa Isabel y el Tolima presentaron tasas de variación que se vieron influenciadas de forma negativa debido a los valores en superficie de 0 km², obteniendo como resultado tasas de cambio interanuales cercanas o superiores al -100% en periodos de tiempo puntuales.

Figura 15.*Tasa de variación interanual de los glaciares estudiados*

El IDEAM en sus estudios de monitoreo y seguimiento a los glaciares colombianos ha dispuesto de información relacionada con el estado de los glaciares para años específicos que concuerdan con algunos estudiados en esta investigación. Teniendo en cuenta esto, se realiza la respectiva recopilación de datos de estudios realizados por el IDEAM con la finalidad de comparar las áreas obtenidas en este estudio. La información se relaciona en la tabla 7.

Tabla 7.

Diferencia entre áreas del IDEAM y las áreas calculadas en este trabajo.

Volcán Nevado del Ruiz		
Año	Área glaciar Estudio (km²)	Área glaciar IDEAM (km²)
2010	13,2	10,3
2016	6,3	9,3
2017	8,3	8,9
2019	5,6	8,4
2020	5,8	8,1
Volcán Nevado Santa Isabel		
Año	Área glaciar Estudio (km²)	Área glaciar IDEAM (km²)
2010	0,2	1,9
2016	0	1
2017	0	0,65
2019	0	0,52
2020	0	0,45
Volcán Nevado del Tolima		
Año	Área glaciar Estudio (km²)	Área glaciar IDEAM (km²)
2010	1,2	0,8
2016	1,2	0,6
2017	0,7	0,6
2019	1,2	0,6
2020	0	0,5

De acuerdo con la información anterior se corrobora que el Nevado de Santa Isabel presenta las mayores diferencias en las estimaciones de área teniendo valores muy

por debajo respecto a la información tomada como referencia. El caso contrario se observa para el Volcán Nevado del Tolima donde las estimaciones se encontraron superiores a la información de referencia, mientras que para el Nevado del Ruiz se obtuvieron mejores resultados de acuerdo con el porcentaje de cambio calculado a los datos, siendo este valor del 26%.

Los resultados anteriores confirman la dificultad expuesta en este estudio en cuanto a detectar coberturas de pequeñas áreas glaciares dada la gruesa resolución espacial de las imágenes empleadas, mientras que fuentes de información oficial como el IDEAM cuentan con imágenes de alta resolución espacial obtenidas con drones y apoyo mediante métodos directos llevados a cabo en terreno que les permite obtener resultados más precisos en este tipo de estudios para la determinación de áreas y tasas de variación en las coberturas glaciares en un periodo de tiempo dado.

Por otra parte, con respecto a la disminución significativa de las coberturas glaciares es importante retomar un aspecto alarmante sobre las implicaciones del derretimiento de los glaciares, pues esta acción representa un aumento de la esorrentía de las zonas cercanas a los mismos; que después de alcanzar un pico hídrico, eventualmente va en disminución hasta que la contribución hídrica del derretimiento del glaciar a las importantes fuentes hídricas sea nula. En ese momento, el glaciar desaparece por completo afectando considerablemente el sistema hídrico y a las comunidades que se abastecen de este recurso.

Con base en lo anterior y teniendo en cuenta los resultados desalentadores de los últimos años para el Volcán Nevado de Santa Isabel en el presente estudio, se espera que las afirmaciones por parte del IDEAM de la ocurrencia de un derretimiento

acelerado sucedan en los próximos años, evidenciando un desabastecimiento de la red hídrica en la parte occidental sobre los municipios de Villamaría, Santa Rosa de Cabal y Pereira a través de los ríos Claro, Otún y Campoalegre, tributarios del río Cauca y hacia la parte oriental el dejando de alimentar los ríos Totarito, Azul y Mozul, que benefician a los municipios de Murillo y Santa Isabel de la cuenca del río Magdalena. Mientras que los Volcanes Nevados del Ruiz y Tolima continúan considerándose nevados con resultados más alentadores, pues no suponen una situación similar a la del Volcán Nevado de Santa Isabel, si no que presentan áreas más significativas y no presentan tendencias decrecientes muy marcadas en los últimos años.

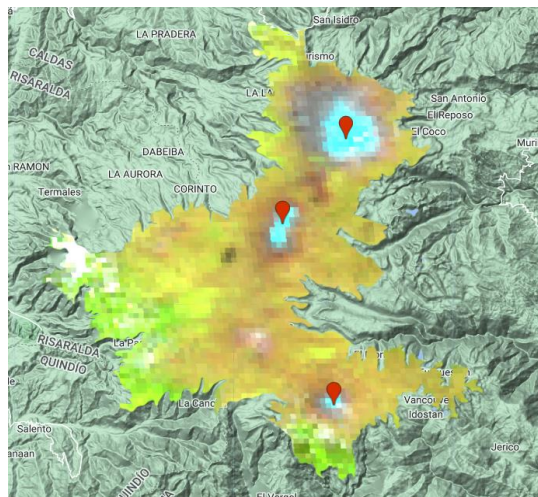
7.2. Cambios en las coberturas glaciares y variables climáticas.

De acuerdo con el objetivo propuesto de analizar la correlación entre los cambios presentados en las coberturas glaciares, la temperatura y la precipitación de la zona de estudio, se seleccionaron píxeles en las cumbres de los volcanes nevados, como se ilustra en la figura 16, para analizar el comportamiento de estas variables estudiadas por medio de la implementación de series de tiempo.

De acuerdo con lo anterior, se ilustra en la figura 17 el comportamiento del índice NDSI para las zonas seleccionadas que se observan en la figura 16. A partir de esta información se puede afirmar que el Volcán Nevado del Ruiz los primeros 10 años de estudio mantuvo umbrales iguales o superiores a 0.4 para el índice NDSI; lo que se traduce en nieves perpetuas y sólidas para esos años. Mientras que los Volcanes Nevados del Tolima y Santa Isabel en toda la serie de tiempo no superaron el umbral del índice esperado.

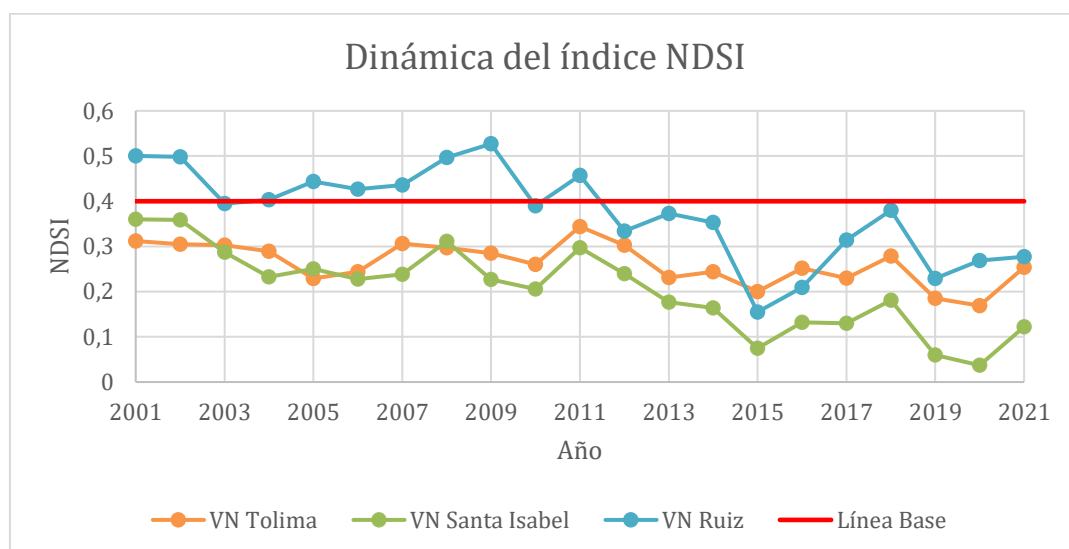
Figura 16.

Zonas de análisis por medio de series de tiempo.



Continuando con el análisis del índice NDSI para los Volcanes Nevados estudiados, se observa que a partir del año 2011 aparecen tendencias decrecientes para las 3 zonas que nuevamente tienen dos incrementos en los años 2018 y 2021. Se observa también que al inicio del estudio el Volcán Nevado de Santa Isabel contaba con valores superiores en el índice NDSI con respecto a los del Volcán Nevado del Tolima. Sin embargo, al final del estudio, este glaciar pasó a presentar los menores valores del índice en comparación con las otras dos zonas estudiadas.

Es importante recordar que la altitud es una condición importante para que los impactos del cambio o fenómenos climáticos extremos no afecten de manera significativa el balance de masa de los glaciares, condición que el nevado de Santa Isabel no cumple. Motivo por el cual se ve amenazado debido a que sus masas glaciares alcanzan en promedio los 4.700 msnm en su límite inferior según el IDEAM (IDEAM, 2021) siendo principalmente las zonas de este glaciar más susceptibles a deshielos acelerados.

Figura 17.*Dinámica del índice NDSI.*

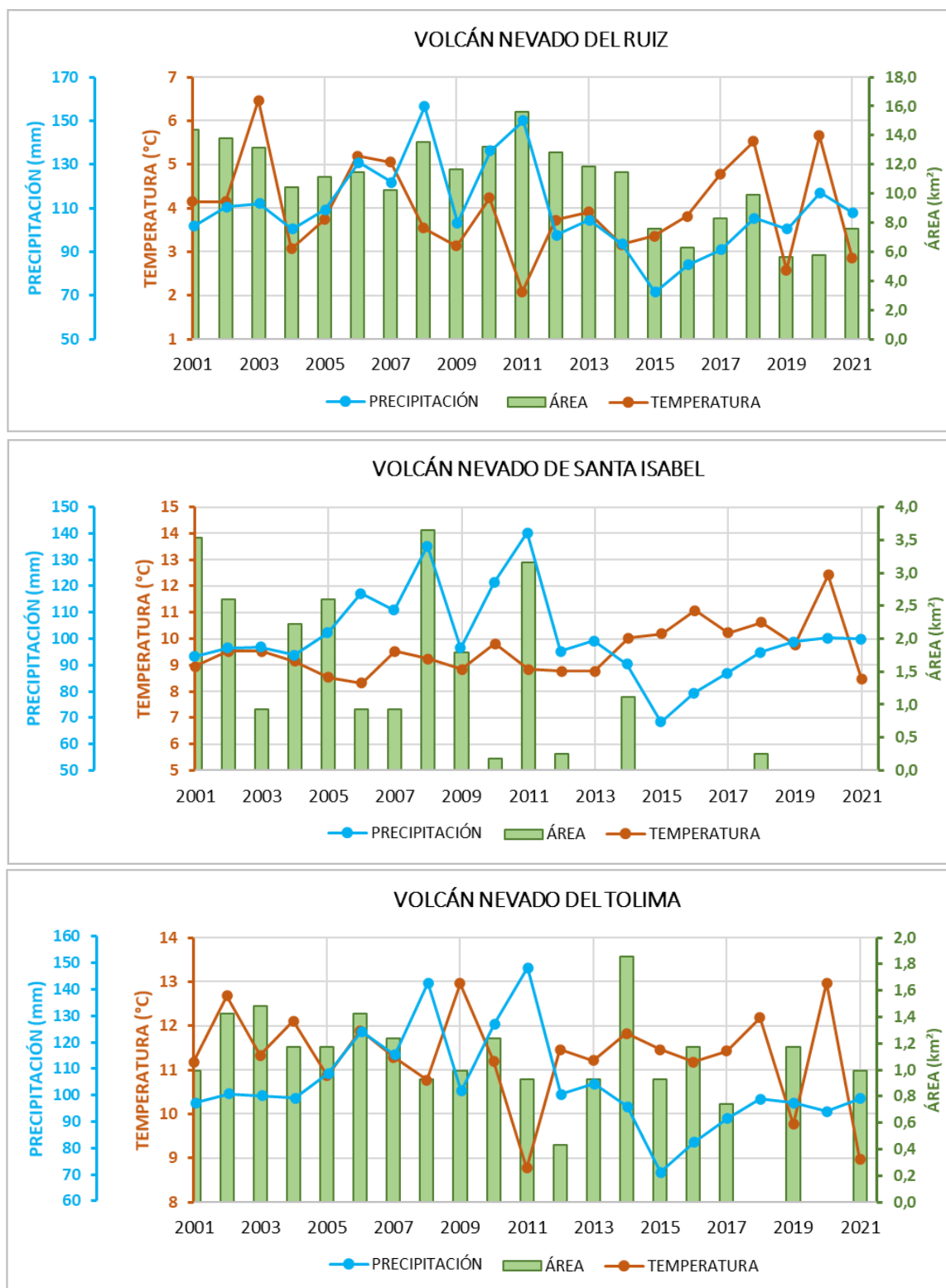
Nota. La línea base corresponde al valor de umbral de 0.4 definido en este estudio.

En las gráficas de la figura 18 que relacionan las superficies y variables climáticas de temperatura y precipitación para los nevados del Ruiz, Tolima y Santa Isabel, se distinguen tendencias decrecientes no muy significativas en los valores de precipitaciones para las tres zonas de estudio, a la vez que los valores en las temperaturas disminuyen; también de forma no muy representativa, lo anterior a excepción de la zona analizada que se encuentra en el nevado de Santa Isabel, donde se observa que las temperaturas van en aumento.

También, es posible observar comportamientos similares en los mismos periodos de tiempo, como es el caso de los picos positivos en la variable precipitación dados en los años 2008 y 2011, que se traducen en una abundancia en las precipitaciones en toda esa región, que contribuyeron a que, en ese año, los glaciares del Volcán Nevado del Ruiz y de Santa Isabel presentaran áreas superiores en comparación a los demás años de estudio.

Figura 18.

Relación área glaciaria, temperatura y precipitación.



De manera similar a lo anterior sucede con la temperatura, donde se destacan comportamientos con tendencias muy parecidas en las tres gráficas para los años 2011 y 2020, donde para el primer año, las temperaturas cayeron de manera significativa, siendo el registro más bajo registrado en el Glaciar Nevado del Ruiz y el Glaciar Nevado del Tolima.

Mientras que, por el contrario, para el año 2020 se presentaron los registros más altos históricos para dos de las tres zonas analizadas, influyendo de forma negativa en la cobertura de hielo/nieve que se observa en el nevado del Ruiz, al ser el segundo registro más bajo en superficie de la serie de tiempo y para el Nevado de Santa Isabel y Tolima, donde la disminución en las coberturas de hielo/nieve no permitieron que el modelo entrenado detectara estas zonas dados los bajos valores en el índice NDSI.

El siguiente punto a analizar es respecto a los valores de correlación obtenidos entre las superficies de los nevados y las precipitaciones de la muestra de estudio. Con respecto a esto, se obtiene un coeficiente de correlación promedio de 37% que indica una asociación positiva de los datos, lo cual permite afirmar que los valores de las superficies glaciares aumentan a medida que las cantidades en las precipitaciones aumentan, una relación directamente proporcional.

Por su parte, para la relación entre la temperatura y los valores en superficie obtenidos, se observa que no existe una correlación fuerte, siendo el valor promedio del coeficiente de correlación calculado del -20%, confirmando una asociación negativa que indica el aumento de la temperatura, y, por otro lado, la disminución en las superficies glaciares. La relación de estas correlaciones se muestra en la tabla 8.

Tabla 8.

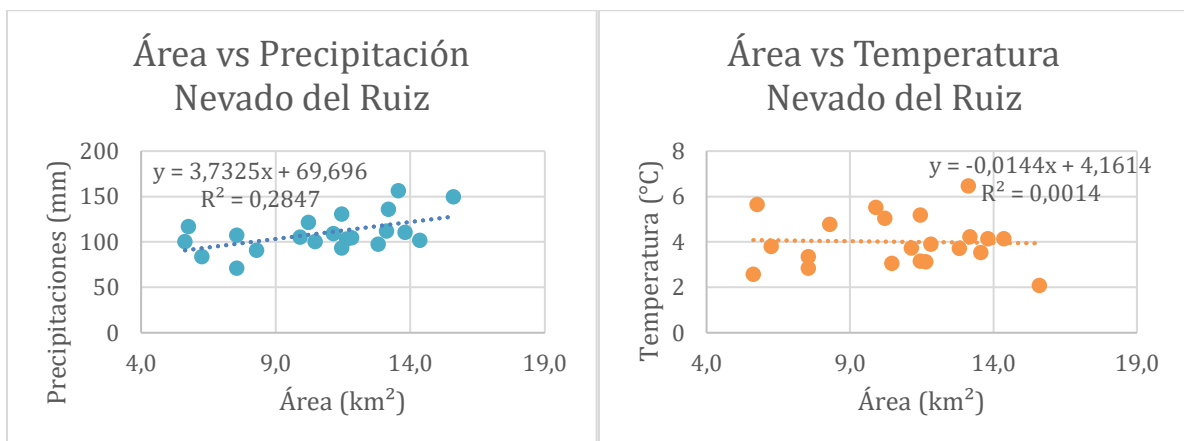
Correlaciones en superficie, precipitación y temperatura.

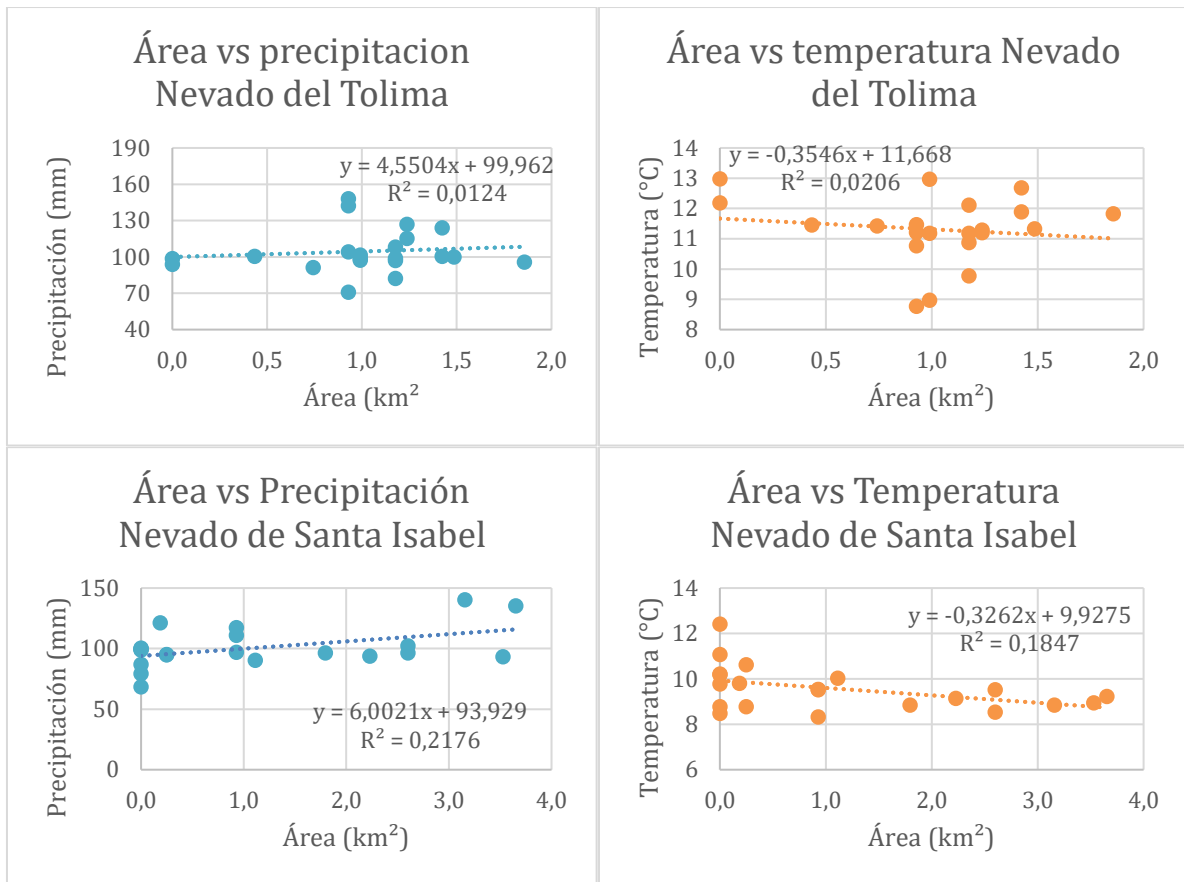
Tabla 8.		
Volcán Nevado	Precipitación	Temperatura
Ruiz	53%	-4%
Santa Isabel	47%	-43%
Tolima	11%	-14%
Promedio	37%	-20%

También, se analizan las dispersiones entre las variables mencionadas en cada glaciar con ayuda de las gráficas de la figura 19, encontrando en primer momento que la dispersión en los datos es mayor en el Volcán Nevado del Tolima para la relación entre ambas variables climáticas y los valores en superficie. Se encuentra que Volcán Nevado del Tolima tiene dispersiones menores en la variable de precipitación con un R^2 de 0.28, mientras que el Volcán Nevado de Santa Isabel presenta mayores valores de R^2 en la relación de las superficies con las temperaturas, siendo este valor de 0.18. Así mismo se observa que la variable de precipitación es la que tiene un mejor ajuste de los datos en las tres gráficas de acuerdo con los valores de R^2 en comparación con los valores que relacionan las superficies y las temperaturas.

Figura 19.

Correlación de variables climáticas y superficie glaciar.



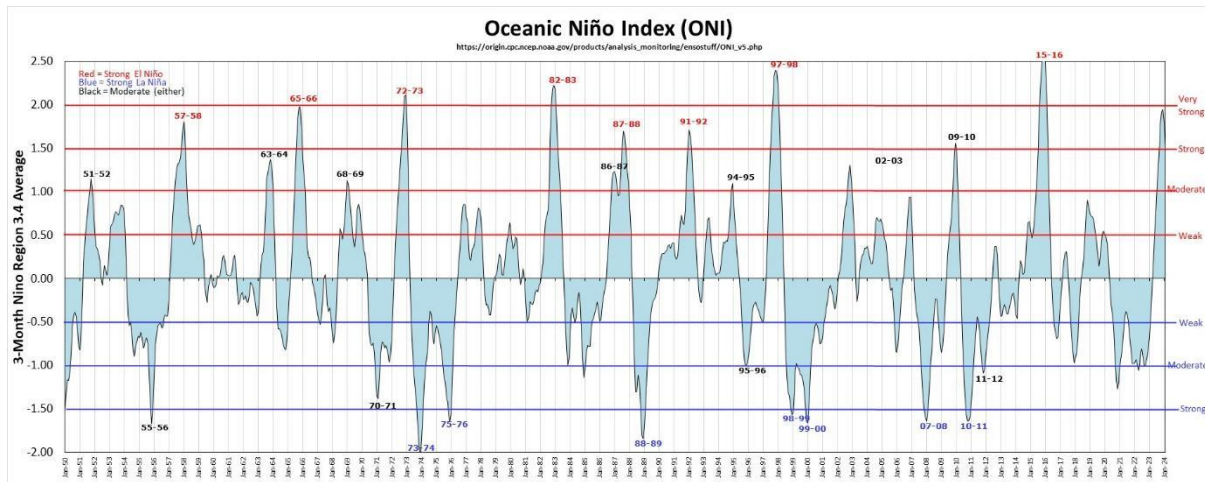


Por otra parte, con la intención de asociar los comportamientos presentados en las variables estudiadas con el fenómeno de El Niño y La Niña, se toma como referencia la figura 20 tomada de la Golden Gate Weather Services que emplea los datos proporcionados por la National Oceanic and Atmospheric Administration - NOAA que muestra la dinámica del Oceanic Niño Index (ONI) conocido por muchos países como una fuente de referencia para el monitoreo del fenómeno de El Niño y La Niña.

De la figura 20 se observa que los periodos 2007-2008 y 2010-2011 fueron los periodos con categoría más fuertes del fenómeno de la niña, mientras que el periodo 2015-2016 fue el periodo del niño con categoría muy fuerte presentado que concuerda con los años de este estudio. En categoría moderada se tiene el periodo 2011-2012 (La Niña) y los periodos 2002-2003 y 2009-2010 (El Niño).

Figura 20.

Oceanix Niño Index (ONI).



Nota. Tomado de Oceanic Niño Index (ONI), Golden Gate Weather Services.

<https://www.ggweather.com/enso/oni.jpg>

Teniendo en cuenta esta información, es posible observar que puntualmente en esos años críticos para el fenómeno del Niño y La Niña mencionados, los comportamientos en las variables estudiadas presentaron cambios abruptos, como se analizó anteriormente por medio de la figura 18 permitiendo establecer una correcta relación de fenómenos climáticos globales con las condiciones locales de la zona de estudio.

Visibilizando lo anterior, en el fenómeno de La Niña presentado en los años 2010-2011 las coberturas glaciares del Volcán Nevado del Ruiz fueron las más altas para todo el periodo de tiempo estudiado resultando en un incremento del 18% de la superficie glaciar en dos años. Por su parte, el Volcán Nevado de Santa Isabel también tuvo un incremento significativo de su superficie, pasando de 0.2 a 3.2 km² en el mismo periodo de tiempo.

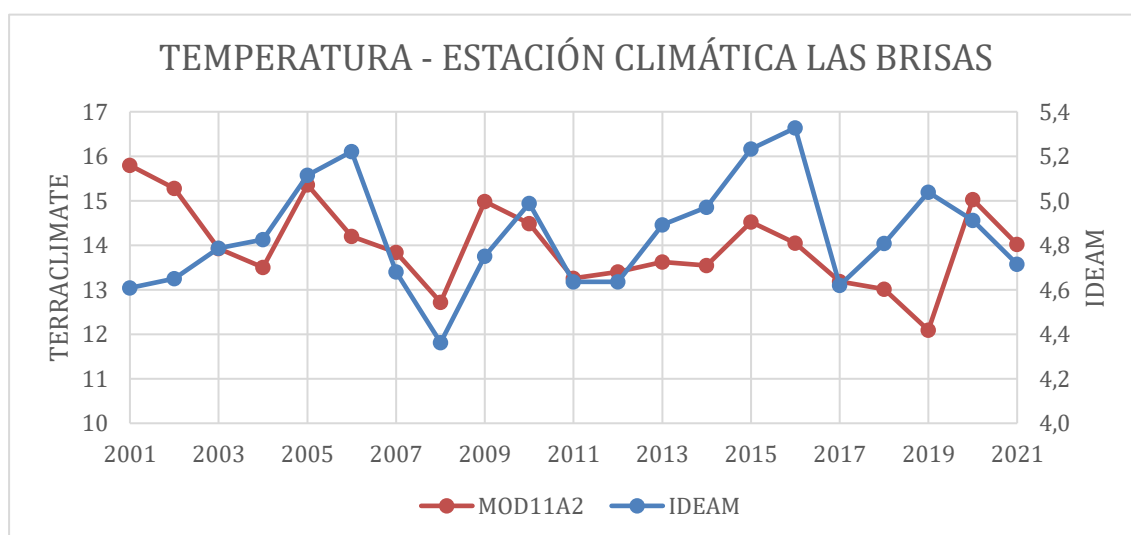
Por otro lado, en el periodo del fenómeno del Niño dado en los años 2015-2016, conocido como uno de los periodos de altas temperaturas y sequías más fuertes de

la historia en Colombia y países de la región (Food and Agriculture Organization of the United Nations - FAO, 2016), se registraron decrecimientos de área para el mismo Nevado y para el Nevado de Santa Isabel, que, dada la importante disminución en su superficie, no fue posible determinar los valores cercanos a su área dada la resolución espacial gruesa de las imágenes del producto MODIS empleadas.

En otros aspectos, como se había mencionado previamente, fue de interés corroborar la información de los parámetros climáticos obtenidos por medio de las imágenes satelitales en series de tiempo para dar validez a los análisis realizados por medio de los datos obtenidos a una resolución mayor. Para esto, se muestra en la figura 21 la comparación de los valores de temperatura media del aire de la ubicación espacial de la estación Las Brisas donde se tienen valores diferenciados para los valores de temperatura superficial terrestre de las imágenes MOD11A2, Sin embargo, se observan tendencias similares en el comportamiento de las variables en periodos de tiempo puntuales como del 2003-2005, 2007-2015 y 2020-2021.

Figura 21.

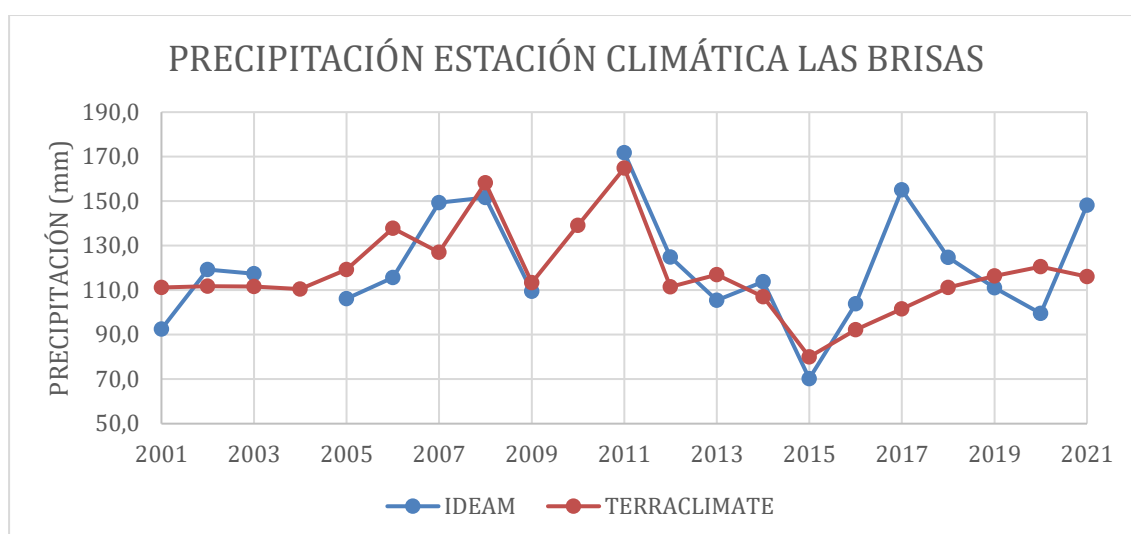
Relación de temperatura entre IDEAM y MODIS.



De la misma manera, se observan comportamientos similares en los datos de las precipitaciones relacionados en la figura 22, encontrando valores en comparación con tendencias similares en toda la serie de tiempo, a excepción del año 2017 que muestra un aumento notable de las precipitaciones según datos recopilados de la estación climática Las Brisas del IDEAM respecto a los datos recopilados de la serie de tiempo de TERRACLIMATE. Los años 2004 y 2010 no contaron con registros de datos por parte de la estación climática observada.

Figura 22.

Relación de precipitaciones entre IDEAM y TERRACLIMATE.



Se concluye esta sección afirmando que los cambios en las coberturas nevadas de los volcanes estudiados en gran proporción se relacionan con las alteraciones o variaciones de los parámetros y fenómenos climáticos analizados. Si bien existen otros factores mencionados como la altitud y las actividades volcánicas que contribuyen a que se presenten deshielos acelerados, no se descarta que las tendencias decrecientes de los últimos años se atribuyan en gran manera a las alteraciones en los parámetros climáticos, producto del cambio climático.

8. VALIDACIÓN.

8.1. Análisis de Imágenes basados en Objetos Geográficos – GEOBIA

La validación de las clasificaciones supervisadas obtenidas del análisis de las imágenes basados en objetos se realizó por medio de matrices de confusión y el posterior cálculo del índice Kappa teniendo en cuenta su efectividad para analizar el desempeño de modelos de clasificaciones de imágenes.

Para llevar a cabo lo anterior, inicialmente se obtuvo del IDEAM capas de información que evidencian la evolución multitemporal de la superficie glaciar de los Volcanes Nevados del Ruiz, Santa Isabel y Tolima para los cuales se seleccionaron dos periodos de tiempo coincidentes con los años estudiados para corroborar la información obtenida.

Los dos años empleados para llevar a cabo la validación de los resultados obtenidos fueron el año 2010 y el año 2016 dada escasa la disponibilidad de información oficial abierta al público. La información obtenida de la cartografía de cobertura glaciar del IDEAM se utilizó en la selección de zonas aleatorias posterior a un proceso de fotointerpretación para asignar clasificaciones de acuerdo con las clases definidas en el presente estudio ilustradas en la tabla 5.

En total, para la construcción de las matrices de confusión se emplearon 100 zonas de las cuales 50 representaron zonas glaciares y nivales y las otras 50 zonas representaron otra clase de coberturas. Los resultados de estas validaciones se muestran en las tablas 9 y 10 para los años 2010 y 2016, respectivamente.

Tabla 9.*Matriz de confusión año 2010.*

Clase	Zonas glaciares y nivales	Otras coberturas	Total	Precisión
Zonas glaciares y nivales	40	11	51	78,43
Otras coberturas	10	39	49	79,59
total	50	50	100	0,79

Índice Kappa (k) = 0,580

Tabla 10.*Matriz de confusión año 2016*

Clase	Zonas glaciares y nivales	Otras coberturas	Total	Precisión
Zonas glaciares y nivales	27	5	32	84,38
Otras coberturas	23	45	68	66,18
total	50	50	100	0,72

Índice Kappa (k) = 0,440

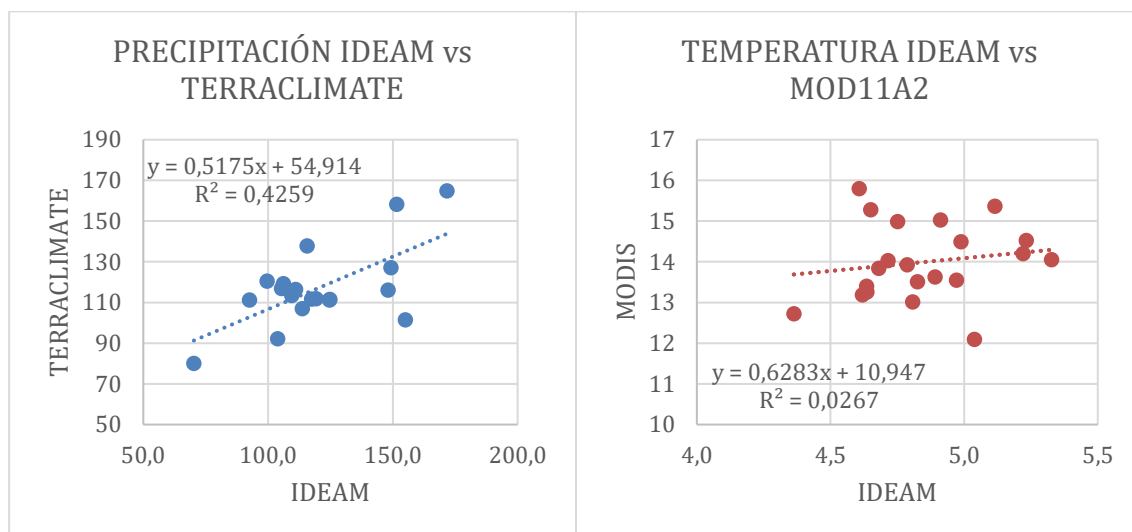
Respecto a los resultados de la validación se obtuvo un índice Kappa ligeramente mayor en la clasificación del año 2010 en comparación con el año 2016 y se infiere que en promedio las clasificaciones realizadas alcanzaron un grado de acuerdo del 51% según el índice Kappa y se encontraron en un grado de concordancia moderado según la escala de valoración del índice propuesto por Landis y Koch, (1977) corroborando una concordancia media en implementación de la clasificación supervisada GEOBIA para la discriminación de coberturas nevadas en un paisaje que comprende bosques, páramos y demás coberturas.

8.2. Comparación de datos climáticos.

Se analizaron las correlaciones de los datos de temperatura y precipitación obtenidos de la estación climática las brisas y de imágenes satelitales de las fuentes empleadas en este estudio por medio de gráficos de dispersión ilustrados en la figura 22.

Figura 23.

Dispersión datos climáticos de datos ráster respecto al IDEAM.



Para estos datos se encontró un ajuste de los datos de imágenes satelitales con el IDEAM en la variable de precipitación de un valor de R^2 de 0,43 mientras que se encontró una dispersión mayor de los datos para las temperaturas con un ajuste bajo de los datos según el coeficiente R^2 de 0,03. Se resalta que la temperatura se mide de dos maneras diferentes según la fuente de información y es presentada en formatos y a escalas diferentes; la temperatura media del aire que mide la estación las Brisas y los valores de temperatura superficial terrestre que se presentan en las imágenes MOD11A2. Por último, se aclara que el objetivo de esta comparación fue de observar tendencias similares que validaran el comportamiento de las variables más allá de obtener similitudes en las magnitudes de las variables analizadas.

9. CONCLUSIONES.

Se obtuvo clasificaciones supervisadas por medio de la implementación de Análisis de Imágenes Basados en Objetos Geográficos (GEOBIA) los cuales visibilizaron un retroceso significativo de los volcanes nevados de Santa Isabel y Ruiz cerrando este estudio con tasas de pérdida de coberturas nevadas para el periodo de tiempo analizado de -53% y -47%, respectivamente.

Las series de tiempo obtenidas permitieron establecer una correlación significativa para los parámetros climáticos de precipitación y temperatura. Para el primer parámetro se obtuvo una correlación del 37% para los cambios presentados entre las coberturas glaciares y las precipitaciones, confirmando una asociación positiva de las mismas. Por su parte, la correlación de los cambios en las coberturas glaciares y la temperatura se estimó en -20%, que indica el aumento de una variable (temperatura) y, por otro lado, la disminución de la otra variable estudiada (cobertura glaciar).

Se evaluó el grado de concordancia de las clasificaciones supervisadas realizadas para dos años mostrando una concordancia inter-observador en las asignaciones de las clasificaciones moderada en las imágenes de ($k=0,58$) para el año 2010 y ($k=0,44$) para el año 2016. Mientras que los ajustes de los datos de parámetros climáticos de la estación las brisas respecto al IDEAM presentaron valores de R^2 de 0,43 para las precipitaciones, para las temperaturas obtenidas se encontró una dispersión mayor de los datos, con un ajuste de los datos según el coeficiente R^2 de 0,03.

Si bien, la resolución espacial de las imágenes empleadas en este estudio no fue suficiente para diferenciar las estructuras de hielo heterogéneas y de pocas áreas

afectando en gran manera la efectiva determinación de las zonas de entrenamiento y de la validación de la clasificación y poniendo en riesgo el buen desempeño de la misma. Se debe tener en cuenta que se priorizó la obtención de un mayor número de datos representado por la frecuencia temporal de las imágenes con el objetivo de eliminar las nubes de las imágenes por medio de un enmascaramiento y nutrir la serie de tiempo con una importante cantidad de datos.

Por otra parte, se debe aclarar que la finalidad de este estudio se limitaba a discriminar las coberturas nevadas de las demás coberturas presentes en las imágenes tal que los valores del índice NDSI fueran igual o mayor a 0.4. Umbral que se basa en discriminar como hielo/nieve a aquellas zonas u objetos que tengan un promedio del 50% de hielo/nieve más que de otras coberturas. Por lo anterior, los análisis relacionados con coberturas heterogéneas encontradas mezcladas con hielo/nieve no se llevan a cabo, puesto que no están dentro de las finalidades de este estudio.

En los análisis de las imágenes basados en objetos geográficos es importante tener en cuenta que, si bien, en los procesos de entrenamiento y validación de las clasificaciones obtenidas, la fotointerpretación de las imágenes es fundamental pues es la que define los parámetros iniciales con los que se desarrolla el modelo y da un indicador sobre la efectividad del mismo, estos procesos se pueden acompañar con el cálculo de un índice que brinde mayor certeza sobre las coberturas existentes de acuerdo a sus valores en zonas donde no sea posible identificar las coberturas presentes ya sea por presencia de nubosidad o por la resolución espacial gruesa de las imágenes empleadas.

Finalmente, se concluye esta sección que el análisis de los nevados intertropicales es de gran importancia en un contexto de planeación y acciones ante el cambio climático. Los resultados de este trabajo muestran la importancia de monitorear variables y fenómenos climáticos en función de dicho retroceso.

10. RECOMENDACIONES

Se debe considerar trabajar con imágenes de resolución espacial alta como Landsat y Sentinel para obtener resultados más precisos en la clasificación supervisada, sin embargo, se debe tener en cuenta que la temporalidad de estas imágenes es baja, por lo cual, no se puede contar con una amplitud de datos que son útiles para realizar enmascaramiento de las nubes que pueden estar presentes en las imágenes dada las condiciones climáticas que se desarrollan en estas zonas por su condición de altitud, representando dificultades para definir las zonas de entrenamiento y validación de la clasificación supervisada.

Por su parte, se pensó en el uso de la interferometría de SAR en el estudio de los glaciares dado que con mayor frecuencia se emplea para llevar a cabo mediciones de elevaciones en el terreno, así como para medir el movimiento de hielo con una alta precisión (mapa de velocidades), e incluso se han combinado imágenes SAR con imágenes ópticas para llevar a cabo clasificaciones supervisadas dada la ventaja de estos sensores de atravesar las nubes. Sin embargo, dado que las colecciones de imágenes empleadas permitieron llevar a cabo un enmascaramiento de las nubes, se descartó esta técnica.

Con respecto al análisis de imágenes basados en objetos (GEOBIA) se recomienda abordar clases temáticas más amplias dado que las estructuras de hielo/nieve pueden

ser muy heterogéneas. Esto puede dar paso a un análisis profundo de la dinámica glaciar, la transición a otras coberturas y su influencia en la determinación final de las coberturas de hielo y nieve.

Finalmente, realizar el análisis en años específicos puede ser una alternativa que brinde información relevante sobre los cambios a mediano plazo de las coberturas nevadas de los glaciares, dado que realizar clasificaciones año tras año en un periodo de tiempo tan extenso resulta un trabajo arduo. Adicionalmente, se recomienda entrenar un modelo con las clases previamente definidas que brinde la posibilidad de cargar imágenes satelitales y que la clasificación se realice de forma automatizada.

11. BIBLIOGRAFÍA

- Abraira, V. (2001). El índice Kappa. *SEMERGEN - Medicina de Familia*, 27(5), 247–249. [https://doi.org/10.1016/s1138-3593\(01\)73955-x](https://doi.org/10.1016/s1138-3593(01)73955-x)
- Achanta, R., & Süsstrunk, S. (2017). Superpixels and Polygons using Simple Non-Iterative Clustering. *IEEE Explore*. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2017.520>
- Alva Huayaney, M. E., & Melendez de la Cruz, J. F. (2014). Aplicación de la Teledetección para el análisis multitemporal de la regresión glaciar en la Cordillera Blanca. *Investigaciones Sociales*, 13(22), 71–83. <https://doi.org/10.15381/IS.V13I22.7216>
- Amani, M., Mahdavi, S., Afshar, M., Brisco, B., Huang, W., Mirzadeh, S. M. J., White, L., Banks, S., Montgomery, J., & Hopkinson, C. (2019). Canadian Wetland Inventory using Google Earth Engine: The First Map and Preliminary Results. *Remote Sensing 2019*, Vol. 11, Page 842, 11(7), 842. <https://doi.org/10.3390/RS11070842>
- Arora, M. K., Shukla, A., & Gupta, R. P. (2011). Digital image information extraction techniques for snow cover mapping from remote sensing data. *Encyclopedia of Earth Sciences Series, Part 3*, 213–232. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2642-2_498/COVER
- Blaschke, T. (2010). Object based image analysis for remote sensing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65(1), 2–16. <https://doi.org/10.1016/J.ISPRSJPRES.2009.06.004>
- Blaschke, T., Lang, S., Lorup, E., Strobl, J., & Zeil, P. (2000). *Object-Oriented Image Processing in an Integrated GIS/Remote Sensing Environment and Perspectives for Environmental Applications*. https://www.researchgate.net/publication/250030480_Object-Oriented_Image_Processing_in_an_Integrated_GISRemote_Sensing_Environment_and_Perspectives_for_Environmental_Applications
- Brinkhoff, J., Vardanega, J., & Robson, A. J. (2019). Land Cover Classification of Nine Perennial Crops Using Sentinel-1 and -2 Data. *Remote Sensing 2020*, Vol. 12, Page 96, 12(1), 96. <https://doi.org/10.3390/RS12010096>
- Castilla, G., & Hay, G. J. (2008). Image objects and geographic objects. En *Lecture Notes in Geoinformation and Cartography* (Vol. 0, Número 9783540770572). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. https://doi.org/10.1007/978-3-540-77058-9_5/COVER
- Cerda Lorca, J., & Villarroel Del P., L. (2008). Evaluation of the interobserver concordance in pediatric research: the Kappa Coefficient. *Revista chilena de pediatría*, 79(1), 54–58. <https://doi.org/10.4067/S0370-41062008000100008>
- Chu, D. (2018). Spatiotemporal variability of snow cover on Tibet, China using MODIS remote-sensing data. *International Journal of Remote Sensing*, 39(20), 6784–6804. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1466075>

- Cohen, J. (1960). A Coefficient of Agreement for Nominal Scales. *Educational and Psychological Measurement*, 20(1), 37–46.
<https://doi.org/10.1177/001316446002000104>
- Costa Posada, C. (2007). La adaptación al cambio climático en Colombia. *Revista de Ingeniería*, 26, 74–80.
http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0121-49932007000200010&lng=en&nrm=iso&tlng=es
- Cracknell, A. P. (1994). Climate Change — The Background. *Remote Sensing and Global Climate Change*, 1–33. https://doi.org/10.1007/978-3-642-79287-8_1
- Delgadillo Ruiz, O., Ramírez-Moreno, P. P., Leos Rodríguez, J. A., Salas González, J. M., & Valdez Cepeda, R. D. (2016). Pronósticos y series de tiempo de rendimientos de granos básicos en México. *Acta Universitaria*, 26(3), 23–32.
<https://doi.org/10.15174/AU.2016.882>
- Echegaray Cristobal, D. Z. (2015). Efecto de la cobertura vegetal nativa sobre la desglaciación del nevado Huaytapallana en diferentes altitudes [Universidad Nacional del Centro del Perú]. En *Universidad Nacional del Centro del Perú*.
<http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/3501>
- Eduardo, O., Chavez, R., Alberto, H., & Bautista, A. (s. f.). *MANUAL PARA EL MANEJO Y PROCESAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES OBTENIDAS DEL SENSOR REMOTO MODIS DE LA NASA, APLICADO EN ESTUDIOS DE INGENIERIA CIVIL*.
- Esri. (s. f.). *Understanding segmentation and classification*. Recuperado 13 de abril de 2024, de <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/image-analyst/understanding-segmentation-and-classification.htm>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations - FAO. (2016). *2015-2016 El Niño Early action and response for agriculture, food security and nutrition*.
<https://www.fao.org/3/i6049e/i6049e.pdf>
- Francou, B., & Pouyaud, B. (2007). Retroceso glaciar y cambio climático en los Andes Centrales. *Secretaría General de la Comunidad Andina, el Instituto de Investigación para el Desarrollo, el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, Oficina Regional para América Latina y el Caribe y la Agencia Española de Cooperación Internacional*. <https://www.researchgate.net/publication/280634722>
- García, J., & Consuegra, B. (1997). Problemática en la clasificación de imágenes de satélite Landsat. *Revista de la Facultad de Educación de Albacete*, 12, 319–330.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2291888>
- Gómez López, I. (2020, julio). *Técnicas de Clasificación de Imágenes en la Teledetección*. EcoScript. <https://ecoscript.org/tecnicasclasificacionimagenes/>
- GREENPEACE. (2009). *Cambio Climático: Futuro Negro para los Páramos*.
https://greenpeace.co/pdf/paramos/informe_todo3.pdf
- Guo, S., Du, P., Xia, J., Tang, P., Wang, X., Meng, Y., & Wang, H. (2021). Spatiotemporal changes of glacier and seasonal snow fluctuations over the Namcha Barwa–Gyala Peri massif using object-based classification from Landsat time series. *ISPRS Journal*

- of *Photogrammetry and Remote Sensing*, 177, 21–37.
<https://doi.org/10.1016/J.ISPRSJPRS.2021.04.018>
- Hall, D. K., & Riggs, G. A. (2011). Normalized-difference snow index (Ndsi). *Encyclopedia of Earth Sciences Series, Part 3*, 779–780. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2642-2_376/COVER
- Hossain, M. D., & Chen, D. (2019). Segmentation for Object-Based Image Analysis (OBIA): A review of algorithms and challenges from remote sensing perspective. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 150, 115–134.
<https://doi.org/10.1016/J.ISPRSJPRS.2019.02.009>
- IBM. (2023, agosto 4). *Introducción a las series temporales - Documentación de IBM*.
<https://www.ibm.com/docs/es/spss-statistics/saas?topic=forecasting-introduction-time-series>
- IDEAM. (s. f.). *Volcán Nevado Santa Isabel*. 2022. Recuperado 13 de abril de 2024, de <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/volcan-nevado-santa-isabel>
- IDEAM. (2001). *Los glaciares colombianos, expresión del cambio climático global*.
<https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/18818>
- IDEAM. (2021). *Informe del Estado de los Glaciares Colombianos 2020*.
http://www.ideam.gov.co/documents/11769/229819/IEAG_2020_v_preliminar/632f26b1-2ef9-48fe-8a99-86d4596ea554
- IDEAM, & Universidad Nacional de Colombia. (1997). *Geosistemas de la alta montaña*.
- IPCC. (2014). *Cambio climático 2014 Impactos, adaptación y vulnerabilidad*. www.ipcc.ch.
- IPCC. (2021). *Un resumen para Cambio Climático 2021: todo el mundo*.
https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/outreach/IPCC_AR6_WGI_SummaryForAll_Spanish.pdf
- Ke, L., Ding, X., Li, W., & Qiu, B. (2017). Remote Sensing of Glacier Change in the Central Qinghai-Tibet Plateau and the Relationship with Changing Climate. *Remote Sensing*, 9(2), 114. <https://doi.org/10.3390/rs9020114>
- Keshri, A. K., Shukla, A., & Gupta, R. P. (2009). ASTER ratio indices for supraglacial terrain mapping. *International Journal of Remote Sensing*, 30(2), 519–524.
<https://doi.org/10.1080/01431160802385459>
- Khali, H., Pandey, P., Ali, S. N., & Champatiray, P. K. (2022). MODIS Observed Spatiotemporal Variation of Snow Cover in Zaskar Valley, North-Western Himalaya. *Frontiers in Water*, 4. <https://doi.org/10.3389/frwa.2022.853146>
- Kozhikkodan Veetil, B., Ruiz Pereira, S. F., Wang, S., Teixeira Valente, P., Bica Grondona, A. E., Becerra Rondón, A. C., Rekowsky, I. C., de Souza, S. F., Bianchini, N., Bremer, U. F., & Cardia Simoes, J. (2016). Un análisis comparativo del comportamiento diferencial de los glaciares en los Andes Tropicales usando teledetección. *Investigaciones geográficas (Chile)*, ISSN 0716-0364, N° 51, 2016, págs. 3-36, 51, 3–36.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6867242&info=resumen&idioma=SPA>

- Landis, J. R., & Koch, G. G. (1977). The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. *Biometrics*, 33(1), 159. <https://doi.org/10.2307/2529310>
- Lemke, P., Ren, J., Alley, R. B., Allison, I., Carrasco, J., Flato, G., Fujii, Y., Kaser Austria, G., Mote, P., Thomas, R. H., Barry, R., Koike, T., Ren, J., Alley, R., Allison, I., Carrasco, J., Flato, G., Fujii, Y., Kaser, G., ... Zhang, T. (2007). Observations: Changes in Snow, Ice and Frozen Ground. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.*
- Liu, Y., Wang, Y., & Zhang, J. (2012). New machine learning algorithm: Random Forest. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 7473 LNCS, 246–252. https://doi.org/10.1007/978-3-642-34062-8_32/COVER
- Manuel, J., & Muñoz, S. (2016). Análisis de Calidad Cartográfica mediante el estudio de la Matriz de Confusión. *Pensamiento Matemático*, ISSN-e 2174-0410, Vol. 6, Nº. 2, 2016, págs. 9-26, 6(2), 9–26. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5998855&info=resumen&idioma=ENG>
- Mather, P., & Tso, B. (2009). Classification Methods for Remotely Sensed Data. En *CRC Press*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420090741>
- Miller, M. (2017). *Series Temporales de Imágenes de Satélite, para el Análisis de Cambio en la Vegetación, en un Contexto de Explotación Minera a Cielo Abierto* [Universidad Politécnica de Madrid]. https://oa.upm.es/45707/1/TFM_Manuel_Miller.pdf
- Monterroso-Tobar, M. F., Londoño-Bonilla, J. M., & Samsonov, S. (2018). Determination of glacier retreat at nevado del ruiz, santa isabel and tolima volcanoes, colombia through optical image and din-SAR. *DYNA (Colombia)*, 85(206), 329–337. <https://doi.org/10.15446/dyna.v85n206.66570>
- Moore, R. T., & Hansen, M. C. (2011). Google Earth Engine: a new cloud-computing platform for global-scale earth observation data and analysis. *AGU Fall Meeting Abstracts*, 2011.
- National Snow and Ice Data Center. (s. f.). *Glaciers*. National Snow and Ice Data Center. Recuperado 13 de abril de 2024, de <https://nsidc.org/learn/parts-cryosphere/glaciers/science-glaciers>
- Noi Phan, T., Kuch, V., & Lehnert, L. W. (2020). Land Cover Classification using Google Earth Engine and Random Forest Classifier—The Role of Image Composition. *Remote Sensing* 2020, Vol. 12, Page 2411, 12(15), 2411. <https://doi.org/10.3390/RS12152411>
- Nussbaum, S. (2009). Object-based image analysis. *International Safeguards and Satellite Imagery*, 107–111. https://doi.org/10.1007/978-3-540-79132-4_8/COVER
- Páez Gonzáles, B. L., & García, C. A. (2016). *Análisis Multitemporal del Retroceso Glaciar en la Sierra Nevada De Santa Marta – Colombia- para los Períodos 1986, 1996, 2007 Y 2014*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

- Paludo, A., Becker, W. R., Richetti, J., Silva, L. C. D. A., & Johann, J. A. (2020). Mapping summer soybean and corn with remote sensing on Google Earth Engine cloud computing in Parana state – Brazil. *International Journal of Digital Earth*, 13(12), 1624–1636. <https://doi.org/10.1080/17538947.2020.1772893>
- Parques Nacionales Naturales de Colombia. (2017). *Plan de Manejo 2017 – 2022 Parque Nacional Natural los Nevados*. <https://www.parquesnacionales.gov.co/wp-content/uploads/2020/10/plan-de-manejo-pnn-los-nevados.pdf>
- Pei, T., Xu, J., Liu, Y., Huang, X., Zhang, L., Dong, W., Qin, C., Song, C., Gong, J., & Zhou, C. (2021). GIScience and remote sensing in natural resource and environmental research: Status quo and future perspectives. *Geography and Sustainability*, 2(3), 207–215. <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2021.08.004>
- Pérez Gutiérrez, C., Pérez Gutiérrez, C., & Muñoz Nieto, Á. L. (2002). Introducción a la Teledetección Espacial. *Dialnet*, 1–15. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=1010787>
- Phiri, D., & Morgenroth, J. (2017). Developments in Landsat land cover classification methods: A review. En *Remote Sensing* (Vol. 9, Número 9). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/rs9090967>
- Richards, J. A. (2022). Remote sensing digital image analysis. En *Remote Sensing Digital Image Analysis* (6ª ed.). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-82327-6>
- Riggs, G., Hall, D., & Román, M. O. (2015). *VIIRS Snow Cover Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD)*.
- Salas Pérez, C., Salazar Bejarano, E. G., Coy Castro, D. F., Meza Alcarcel, J. C., & Upegui, E. S. (2019). Análisis histórico del retroceso glaciar en el nevado del Ruiz considerando el fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur. *UD y la geomática*, 14. <https://doi.org/10.14483/23448407.15660>
- Schoolmeester, T., Johansen, K. S., Alfthan, B., Baker, E., Hesping, M., & Verbist, K. (2018). *Atlas de Glaciares y Aguas Andinos: el impacto del retroceso de los glaciares sobre los recursos hídricos* (T. Schoolmeester & K. Verbist, Eds.). Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000266209>
- Shimamura, Y., Izumi, T., & Matsuyama, H. (2006). Evaluation of a useful method to identify snow-covered areas under vegetation - Comparisons among a newly proposed snow index, normalized difference snow index, and visible reflectance. *International Journal of Remote Sensing*, 27(21), 4867–4884. <https://doi.org/10.1080/01431160600639693>
- Sholarin, E. A., & Awange, J. L. (2015). *Environmental Project Management*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-27651-9>
- Tarback, E. J., Lutgens, F. K., & Tasa, D. (2005). *Ciencias de la Tierra. Una introducción a la geología física* (8ª ed.). Pearson Educación S.A. www.pearsoneducacion.com

- Tassi, A., & Vizzari, M. (2020). Object-Oriented LULC Classification in Google Earth Engine Combining SNIC, GLCM, and Machine Learning Algorithms. *Remote Sensing* 2020, Vol. 12, Page 3776, 12(22), 3776. <https://doi.org/10.3390/RS12223776>
- Tu, Y., Chen, B., Zhang, T., & Xu, B. (2020). Regional Mapping of Essential Urban Land Use Categories in China: A Segmentation-Based Approach. *Remote Sensing* 2020, Vol. 12, Page 1058, 12(7), 1058. <https://doi.org/10.3390/RS12071058>
- Velásquez, J. D., Dyner, I. R., & Souza, R. C. (2006). Tendencias en la predicción y estimación de los intervalos de confianza usando modelos de redes neuronales aplicados a series temporales. *Dyna*, 73, 141–147.
- Villegas Vega, H. (2008). *Introducción a la Percepción Remota y sus Aplicaciones Geológicas*.
- Wang, L. chen, Yu, K., Chang, L., Zhang, J., Tang, T., Yin, L. he, Gu, X. fan, Dong, J. qiu, Li, Y., Jiang, J., Yang, B. chao, & Wang, Q. (2021). Response of glacier area variation to climate change in the Kaidu-Kongque river basin, Southern Tianshan Mountains during the last 20 years. *China Geology*, 4(3), 389–401. <https://doi.org/10.31035/cg2021055>
- Wang, L., Yu, K., Chang, L., Zhang, J., Tang, T., Yin, L., Gu, X., Dong, J., Li, Y., Jiang, J., Yang, B., Wang, Q., Wang, L., Yu, K., Chang, L., Zhang, J., Tang, T., Yin, L., Gu, X., ... Wang, Q. (2021). Response of glacier area variation to climate change in the Kaidu-Kongque river basin, Southern Tianshan Mountains during the last 20 years. *China Geology*, 2021, Vol. 4, Issue 3, Pages: 389-401, 4(3), 389–401. <https://doi.org/10.31035/CG2021055>
- Willington, E., Nolasco, M., & Bocco, M. (2013). Clasificación supervisada de suelos de uso agrícola en la zona central de Córdoba (Argentina): comparación de distintos algoritmos sobre imágenes Landsat. *Congreso Argentino de AgroInformatica*.
- Xiao, X., Shen, Z., & Qin, X. (2001). Assessing the potential of VEGETATION sensor data for mapping snow and ice cover: a Normalized Difference Snow and Ice Index. *International Journal of Remote Sensing*, 22(13), 2479–2487. <https://doi.org/10.1080/01431160010002902>
- Yuheng, S., & Hao, Y. (2017). Image Segmentation Algorithms Overview. *ArXiv*. https://www.researchgate.net/publication/318315979_Image_Segmentation_Algorithms_Overview
- Zarza, L. (s. f.). *¿Qué es un glaciar?* iagua. Recuperado 13 de abril de 2024, de <https://www.iagua.es/respuestas/que-es-glaciar>