



Cambios en las coberturas de la tierra en el Resguardo Kogui-Malayo-Arhuaco, Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia (1990-2025)

Jenider David Arias Pacheco

José Salvador Soto Quintero

Liliana Marcela Rojas Troncoso

Luisa Fernanda Montoya Correa

Violeta Pardo Sabogal

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

Asesor: Alberto Boada Rodríguez, Doctor (PhD) en Investigación y Docencia

Universidad de Manizales
Facultad de Ciencias e Ingeniería
Especialización en Sistemas de Información Geográfica - Virtual
Manizales, Caldas, Colombia
2025

Cita	(Arias Pacheco et al, 2025)
Referencia	Arias Pacheco, J. D., Soto Quintero, J. S., Rojas Troncoso, L. M., Montoya Correa, L. F., & Pardo Sabogal, V. (2025). <i>Cambios en las coberturas de la tierra en el Resguardo Kogui-Malayo-Arhuaco, Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia (1990-2025) [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Manizales. RIDUM: Repositorio Institucional Universidad de Manizales.</i>
Estilo APA 7 (2020)	



Especialización en Sistemas de Información Geográfica - Virtual, II

Seleccione grupo de investigación UManizales (A-Z)

Seleccione línea de investigación UManizales (A-Z).

Seleccione centro de investigación UManizales (A-Z).

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

Biblioteca y Centro de Recursos: <https://biblioteca.umanizales.edu.co/>

Repositorio Institucional: <http://ridum.umanizales.edu.co/>

Universidad de Manizales: www.umanizales.edu.co

Revistas: <http://revistasum.umanizales.edu.co/>

Fondo Editorial: <https://editorialum.umanizales.edu.co/>

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

Dedicatoria

Primero que todo, damos gracias a Dios por brindarnos fortaleza, compañía y motivación necesaria para que nuestros sueños se vayan cumpliendo

Queremos agradecer de todo corazón a nuestros padres por todo el apoyo brindado y por qué son nuestro pilar de vida, gracias a ellos que nos han enseñado a confiar en nuestras capacidades para así ser capaces de lograr lo que nos proponemos, nos inspiran día a día a encontrar fronteras, sin limitaciones y con determinación a lograr cada uno de nuestros sueños.

Agradecemos a nuestra familia por brindarnos siempre su apoyo, con palabras de aliento y la motivación en cada adversidad.

A nuestros profesores y compañeros que hicieron de nuestra especialización una enseñanza maravillosa, llena de aprendizajes que siempre llevaremos en nuestros corazones.

Agradecimientos

Manifestamos nuestros más sinceros agradecimientos a las personas que hicieron posible culminar este proceso.

A la universidad y a nuestros profesores gracias por brindarnos sus herramientas dentro del desarrollo de este proyecto, por sus valiosas sugerencias y asesorías técnicas, que fueron pilar fundamental en la realización de este proyecto.

Gracias familia por su amor incondicional, comprensión y apoyo durante este proceso.

Tabla de contenido

Resumen	10
Abstract.....	12
1. Introducción	14
2. Planteamiento del problema	16
2.1. Antecedentes	19
3. Justificación.....	22
4. Objetivos	25
4.1. Objetivo general	25
4.2. Objetivos específicos.....	25
5. Pregunta de investigación.....	26
6. Marco teórico	27
6.1. Referente normativo y legal	29
6.1.1. <i>Nivel Fundamental: Constitución Política de Colombia de 1991</i>	29
6.1.2. <i>Nivel Legal: Leyes Nacionales y Tratados Internacionales</i>	30
6.1.3. <i>Nivel Reglamentario: Decretos y Reglamentos</i>	33
6.1.4. <i>Nivel Básico: Actos Administrativos, Acuerdos y Resoluciones</i>	34
7. Metodología	37
7.1. FASE 1: Búsqueda, descarga de Imágenes Satelitales y procesamiento	38
7.1.1. Definición del sistema de clasificación o leyenda para la interpretación.....	47
7.2. FASE 2: Análisis de Cambios en las coberturas	52
7.3. FASE 3: Evaluación de las tendencias y patrones de cambio.....	54
8. Resultados	55
8.1. Identificación y clasificación de coberturas	55

8.1.1.	<i>Mapa de cobertura para el año 1990.</i>	57
8.1.2.	<i>Mapa de cobertura para el año 1999.</i>	58
8.1.3.	<i>Coberturas para el año 2010.</i>	60
8.1.4.	<i>Mapa de Coberturas para el año 2017.</i>	61
8.1.5.	<i>Mapa Cobertura para el año 2025.</i>	63
8.2.	Comparación de las Coberturas en diferentes periodos	67
8.3.	Análisis de cambios en las coberturas de la tierra en el Resguardo Kogui–Malayo– Arhuaco	69
8.3.1.	<i>Período 1990-1999</i>	69
8.3.2.	<i>Período 1999-2010</i>	71
8.3.3.	<i>Período 2010-2017</i>	74
8.3.4.	<i>Período 2017-2025</i>	76
8.3	Evaluación de las tendencias y patrones de COBERTURAAa lo largo del período de estudio, identificando posibles factores socioambientales que influyen en dichos cambios.	79
9.	Discusión	84
10.	Conclusiones	86
11.	Recomendaciones	89
12.	Referencias	91

Lista de tablas

Tabla 1: <i>Imágenes Landsat utilizadas. Previsualización y datos de cada imagen</i>	39
Tabla 2: <i>Listado de imágenes satelitales seleccionadas para la zona</i>	40
Tabla 3: <i>Coberturas de acuerdo con la metodología Corine Land Cover</i>	49
Tabla 4: <i>Matriz de cambios de coberturas</i>	52
Tabla 5: <i>Imágenes de referencia de tipos de cobertura</i>	55
Tabla 6: <i>Imágenes de referencia de tipos de cobertura</i>	65
Tabla 7: <i>Cambios netos en el uso del suelo entre 1990 y 2025</i>	81

Lista de figuras

Figura 1: <i>Imagen Landsat 2025 composición RGB a falso color 5-4-3, con path/row 08/53 y porcentaje de nubosidad del 7%.</i>	42
Figura 2: <i>Paso a paso para el recorte de imágenes landsat. PASO 1</i>	43
Figura 3: <i>Paso a paso para el recorte de imágenes landsat. PASO 2</i>	43
Figura 4: <i>Paso a paso para el recorte de imágenes landsat. PASO 3</i>	44
Figura 5: <i>Paso a paso para el recorte de imágenes landsat. PASO 4</i>	45
Figura 6: <i>Paso a paso para el recorte de imágenes landsat. PASO 5</i>	45
Figura 7: <i>Proceso de calibración radiométrica y corrección atmosférica en ENVI 5.1</i>	46
Figura 8: <i>Clasificación supervisada en ArcGIS Pro.</i>	47
Figura 9: <i>Generación del archivo de firmas espectrales</i>	48
Figura 10: <i>Aplicación del algoritmo de máxima</i>	48
Figura 11: <i>Aplicación del filtro Majority</i>	49
Figura 12: <i>Validación de coberturas en Google Earth como verificación de la identificación de coberturas en las imágenes Landsat en composición color verdadero.</i>	50
Figura 13: <i>Zona de estudio</i>	56
Figura 14: <i>Mapa de coberturas del año 1990</i>	57
Figura 15: <i>Área de la cobertura para el año 1990</i>	58
Figura 16: <i>Mapa de cobertura para 1999</i>	59
Figura 17: <i>Relación de coberturas para 1999</i>	59
Figura 18: <i>Mapa de cobertura para el año 2010</i>	60
Figura 19: <i>Relación de coberturas para 2010</i>	61
Figura 20: <i>Mapa de coberturas para el año 2017</i>	62
Figura 21: <i>Relación de coberturas para 2017</i>	62
Figura 22: <i>Mapa de Cobertura para el año 2025</i>	63

Figura 23: <i>Relación de coberturas para 2025</i>	64
Figura 24: <i>Mapa de Validación de Coberturas en Campo</i>	67
Figura 25: <i>Índice de vegetación, categorizado en varias clases de acuerdo con la densidad de la vegetación para el año inicial y final.</i>	68
Figura 26: <i>Porcentaje de área cambios en las coberturas 1990 a 1999</i>	69
Figura 27: <i>Porcentaje de área cambios en las coberturas 1990 a 1999</i>	71
Figura 28: <i>Porcentaje de área cambios en las coberturas 1999 a 2010</i>	72
Figura 29: <i>Mapa de cambios en las coberturas 1990 a 1999</i>	73
Figura 30: <i>Porcentaje de área cambios en las coberturas 2010 a 2017</i>	74
Figura 31: <i>Porcentaje de área cambios en las coberturas 2010 a 2017</i>	75
Figura 32: <i>Porcentaje de área cambios en las coberturas 2017 a 2025</i>	76
Figura 33: <i>Mapa cambios en las coberturas 2017 a 2025</i>	78
Figura 34: <i>Porcentaje de área cambios en las coberturas 1990 a 2025</i>	79
Figura 35: <i>Evolución de las coberturas del suelo en el Resguardo Kogui-Malayo-Arhuaco entre 1990 y 2025.</i>	81

Resumen

El Resguardo Indígena Kogui Malayo Arhuaco, situado en la Sierra Nevada de Santa Marta, constituye un territorio ancestral de enorme relevancia cultural y ambiental. Es hogar de los pueblos Kogui, Arhuaco y Wiwa, comunidades que mantienen un vínculo milenario con sus ecosistemas. En su interior coexiste una diversidad de ambientes que abarcan desde bosques secos tropicales hasta páramos y glaciares, conformando un mosaico ecológico único.

Durante las últimas décadas, el territorio ha enfrentado transformaciones notables en el uso y la cobertura del suelo, impulsadas tanto por actividades humanas como por factores ambientales. Este estudio tiene como objetivo examinar las tendencias y patrones de cambio en la cobertura y uso del suelo del resguardo, considerando la influencia de procesos antropogénicos y de la variabilidad y el cambio climático en el período comprendido entre 1990 y 2025.

La investigación se desarrolló con un enfoque mixto, combinando análisis cuantitativo y descriptivo, apoyado en el procesamiento de imágenes satelitales y herramientas de sistemas de información geográfica (SIG). Se implementó un análisis multitemporal que contrastó los resultados con datos sobre presiones humanas y patrones climáticos. La metodología comprendió tres fases principales: (1) búsqueda, descarga y procesamiento de imágenes satelitales; (2) análisis de los cambios en las coberturas; y (3) evaluación de tendencias y patrones a lo largo del tiempo.

Los resultados evidencian transformaciones significativas en la estructura del paisaje: la cobertura de bosque denso, aunque sigue siendo dominante, ha disminuido de más del 35 % en 1999 a alrededor del 28 % en 2017–2025. La fragmentación del bosque denso alcanzó su máximo en 1999–2010 y luego descendió, mientras que la pérdida de bosque se mantuvo entre el 3 % y el 6 %. Un aspecto positivo es la recuperación del bosque, que pasó de cerca del 12 % en 1990–1999 a un 22 % en 2010–2017, estabilizándose en torno al 17 % en 2017–2025. Las categorías de bosque

fragmentado sin cambios y zonas sin vegetación sin cambios permanecen estables, reflejando áreas de vegetación discontinua persistente.

Se concluye, que a partir de los resultados obtenidos la importancia de utilizar herramientas de teledetección junto con metodologías de clasificación homologadas para caracterizar procesos territoriales complejos. Dado que, la integración de estos enfoques permitió construir una base sólida de información espacial, útil tanto para la planificación institucional como para el fortalecimiento de las capacidades locales de monitoreo y gestión ambiental en el resguardo indígena.

Palabras clave: Sierra Nevada, riqueza ambiental y cultural, análisis multitemporal, cobertura del suelo y ecosistemas.

Abstract

The Kogui Malayo Arhuaco Indigenous Reserve, located in the Sierra Nevada de Santa Marta, is an ancestral territory of great cultural and environmental significance. It is home to the Kogui, Arhuaco, and Wiwa peoples, communities that have maintained a deep, millennia-old relationship with their ecosystems. Within its boundaries lies a remarkable variety of environments, ranging from tropical dry forests to páramos and glaciers, forming a unique ecological mosaic.

In recent decades, the reserve has undergone significant transformations in land use and cover, driven by both human activities and environmental factors. This study aims to examine trends and patterns in land cover and land use change within the reserve, taking into account anthropogenic processes as well as climate variability and change from 1990 to 2025.

The research employed a mixed methodological approach, combining quantitative and descriptive analyses based on satellite imagery and geographic information system (GIS) tools. A multitemporal analysis was carried out, contrasting the results with data on human pressures and climate patterns. The methodology consisted of three main phases: (1) acquisition, processing, and preparation of satellite images; (2) analysis of land cover changes; and (3) assessment of long-term trends and patterns.

The findings reveal substantial changes in the landscape structure: dense forest cover, while still dominant, declined from over 35% in 1999 to around 28% in 2017–2025. Dense forest fragmentation peaked in 1999–2010 before decreasing, whereas forest loss remained between 3% and 6%. Notably, forest recovery increased from about 12% in 1990–1999 to 22% in 2010–2017, later stabilizing at approximately 17% in 2017–2025. Categories of fragmented forest without change and areas without vegetation remained relatively stable, reflecting the persistence of discontinuous vegetation areas.

The conclusion is drawn from the results obtained, highlighting the importance of using remote sensing tools in conjunction with standardized classification methodologies to characterize complex territorial processes. The integration of these approaches allowed for the construction of a solid base of spatial information, useful both for institutional planning and for strengthening local environmental monitoring and management capacities in the Indigenous reservation.

Keywords: Sierra Nevada, Environmental and Cultural Wealth, Multitemporal Analysis, Land Cover and Ecosystems.

1. Introducción

La transformación de las coberturas y usos del suelo es uno de los fenómenos más relevantes en el estudio del medio ambiente, pues refleja las presiones que ejercen las actividades humanas sobre los ecosistemas y revela las dinámicas socioecológicas que inciden en la sostenibilidad del territorio. En el contexto del cambio climático y la creciente demanda de recursos naturales, el monitoreo de estos cambios se ha convertido en una herramienta fundamental para la planificación ambiental, el ordenamiento territorial y la preservación de la biodiversidad. Los avances tecnológicos en percepción remota y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) han permitido analizar con mayor precisión las tendencias y patrones espaciales de estos procesos, especialmente en territorios sensibles desde el punto de vista ecológico y cultural.

El resguardo indígena Kogui Malayo Arhuaco, se ubica en la Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM) en el norte de Colombia, que representa uno de los territorios más biodiversos y culturalmente significativos del país. Reconocida por su singularidad geográfica como el sistema montañoso litoral más alto del mundo, la SNSM alberga numerosos ecosistemas estratégicos y es hogar de comunidades indígenas que han conservado sus prácticas ancestrales de manejo del territorio. Sin embargo, en las últimas décadas, este territorio ha experimentado profundas alteraciones en la cobertura vegetal debido a la expansión de actividades agropecuarias, la minería ilegal, el crecimiento urbano y los efectos del cambio climático. Estas transformaciones ponen en riesgo tanto los recursos naturales como los valores culturales que históricamente han coexistido en equilibrio en la región.

Este trabajo de grado tuvo como objetivo analizar de manera multitemporal los cambios en la cobertura y el uso del suelo en el Resguardo Indígena Kogui Malayo Arhuaco entre los años

1990 y 2025, con el propósito de identificar las principales tendencias y patrones espaciales, y comprender su relación con las actividades humanas y los cambios climáticos. Para ello, se emplearon herramientas SIG y datos satelitales. Los resultados obtenidos pretenden aportar información clave para la toma de decisiones en materia de conservación, gestión territorial y reconocimiento de los derechos ancestrales, en un contexto donde se entrelazan la protección del ambiente y la justicia territorial.

2. Planteamiento del problema

El Resguardo Indígena Kogui Malayo Arhuaco está ubicado al norte de La Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM), es un sistema montañoso triangular, independiente de la cordillera de los Andes, que alberga los picos más altos del país, como el Simón Bolívar y el Cristóbal Colón, con altitudes que alcanzan los 5.775 metros sobre el nivel del mar. Este sistema montañoso se caracteriza por un marcado gradiente altitudinal que genera una amplia variedad de climas y ecosistemas, que van desde zonas cálidas costeras hasta áreas de nieve permanente. El Resguardo indígena Malayo Arhuaco se sitúa entre los departamentos de Magdalena, La Guajira y Cesar, y contiene una red hidrográfica que abarca desde el río Turinca en el Magdalena hasta el río Ranchería en la Guajira, así como una extraordinaria biodiversidad distribuida en ecosistemas de bosque seco tropical, humedales, zonas xerofíticas y playas (Aguirre et al., 2024).

A pesar de su importancia ecológica y cultural, esta región enfrenta una grave crisis ambiental. De las 412.871 hectáreas que lo componen, apenas un 15 % se considera bosque poco modificado o casi intacto. El 85 % restante ha sido intervenido por actividades humanas y económicas, lo que ha deteriorado sus ecosistemas de forma significativa (Viloria, 2005). La expansión agrícola, la tala indiscriminada, la conversión de bosques en pastizales, la introducción de nuevas variedades de cultivos y la proliferación de cultivos ilícitos han generado deforestación masiva, fragmentación de hábitats, erosión, deslizamientos y pérdida de biodiversidad (CORPAMAG, 2021; Huertas et al., 2017).

Estos impactos se ven agravados por la contaminación de cuerpos de agua y la presión del cambio climático, que modifica los patrones de precipitación y temperatura, aumentando la vulnerabilidad de los ecosistemas. Como advierte Badio (2021), estas amenazas comprometen los

servicios ecosistémicos que la SNSM provee, como la regulación hídrica, la captura de carbono y la conservación de especies endémicas.

Estudios como el de Vilorio (2005) evidencian que regiones específicas como Guachaca, Don Diego y Mendihuaca son algunas de las más afectadas por la actividad agrícola no planificada. La rápida expansión de monocultivos y el avance de la frontera agropecuaria han transformado drásticamente el paisaje, reduciendo el hábitat disponible y elevando el riesgo de extinción de numerosas especies. En esta misma línea, Palacios y Peres (2007) subrayan que esta pérdida de cobertura vegetal también debilita la resiliencia de los ecosistemas frente a perturbaciones externas.

Esta problemática no es un caso aislado. A nivel global, el cambio en la cobertura y uso del suelo es uno de los procesos más críticos que afectan los ecosistemas terrestres. Factores como el crecimiento poblacional, la urbanización, el desarrollo de infraestructura y el cambio climático han impulsado transformaciones profundas en el paisaje. Según el Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 2023 de las Naciones Unidas, aproximadamente el 31 % de la superficie terrestre mundial está cubierta por bosques, pero cada año se pierden cerca de 10 millones de hectáreas. Además, el ODS 15 (Vida en los Ecosistemas Terrestres) advierte que cerca del 75 % de la superficie terrestre ha sido significativamente alterada por actividades humanas, lo que evidencia la urgencia de implementar acciones para monitorear y gestionar los cambios del uso del suelo con miras a la sostenibilidad.

En este contexto, Colombia —reconocido como uno de los países más biodiversos del planeta— enfrenta grandes retos en la gestión de sus recursos naturales. Las transformaciones en las coberturas vegetales han sido impulsadas por prácticas como la ganadería extensiva, la agricultura intensiva, la minería ilegal y la expansión de asentamientos humanos. Estos procesos han provocado la degradación de ecosistemas estratégicos como bosques andinos, páramos y selvas

tropicales. A pesar de contar con políticas públicas de conservación, persisten debilidades en la implementación de estrategias efectivas de ordenamiento territorial y gestión ambiental.

El Resguardo indígena Kogui Malayo Arhuaco al estar localizado en La Sierra Nevada de Santa Marta, por su valor ecológico, cultural e hidrológico, es considerada una prioridad para la conservación en Colombia. Además de su riqueza en biodiversidad, es fuente de agua para amplias zonas del Caribe colombiano y hogar ancestral de los pueblos indígenas: Kogui, Arhuaco y Wiwa, quienes habitan resguardos legalmente reconocidos y desempeñan un rol fundamental en la protección del territorio. Sin embargo, estos pueblos se ven gravemente afectados por los cambios en la cobertura y uso del suelo, que amenazan sus prácticas tradicionales, su seguridad alimentaria y su integridad territorial. Según datos del Banco de la República y entidades nacionales, en los últimos 30 años la deforestación en la SNSM ha aumentado notablemente, especialmente en zonas de amortiguamiento y áreas de páramo, registrándose una pérdida del 12 % de la cobertura forestal.

Las causas principales de esta transformación incluyen el aumento de la población rural y urbana, la intensificación de actividades agropecuarias, el desarrollo de infraestructura sin planificación adecuada y la minería ilegal. A ello se suma la creciente variabilidad climática, que ha afectado los ciclos hidrológicos y la capacidad adaptativa de los ecosistemas locales. Esta situación ha generado conflictos socioambientales complejos que ponen en tensión la conservación del ecosistema y los derechos de los pueblos indígenas.

Los impactos de estos cambios no solo son ambientales, sino también socioculturales. La pérdida de cobertura forestal y la fragmentación de hábitats comprometen la supervivencia de especies endémicas y la calidad de los servicios ecosistémicos. Desde una perspectiva social, las alteraciones en el entorno natural ponen en riesgo los medios de vida, la soberanía alimentaria y la continuidad cultural de las comunidades indígenas. Asimismo, el deterioro ambiental reduce la capacidad de adaptación al cambio climático, afectando a toda la región.

Frente a este panorama, es urgente diseñar e implementar estrategias de gestión territorial que integren la conservación ambiental con el respeto a los derechos de las comunidades indígenas. El fortalecimiento de la gobernanza local, la promoción de prácticas agroecológicas sostenibles, el monitoreo continuo mediante tecnologías de sistemas de información geográfica (SIG) y teledetección, y la creación de áreas protegidas son acciones clave. Además, la incorporación del conocimiento tradicional en los procesos de planificación puede contribuir a una gestión más armónica, resiliente y respetuosa del territorio ancestral.

2.1. Antecedentes

La singularidad geográfica y ecológica de la Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM) ha atraído a numerosos investigadores que han estudiado sus dinámicas ambientales mediante diversas herramientas, especialmente aquellas basadas en teledetección y análisis multitemporal.

Un ejemplo de esto es el análisis realizado por Mesa (2022) sobre los ecosistemas de páramo en Colombia, incluyendo la Sierra Nevada. Usando herramientas SIG, identificó que la vegetación de páramo representa entre el 55 % y el 58 % de la cobertura total, mostrando una notable estabilidad en zonas altas, pero vulnerabilidad en las áreas de transición.

Otro estudio relevante es el de Correal (2022), quien evaluó el retroceso glaciar en la SNSM entre 2016 y 2022 mediante procesamiento de imágenes satelitales, cuantificando con precisión la pérdida de superficie glaciar en un contexto de cambio climático.

De manera similar, Rodríguez (2018) aplicó análisis multitemporal en la cuenca del río Toribio (zona de influencia de la SNSM) desde 1984 hasta 2018, detectando variaciones significativas en la cobertura vegetal, mientras que Ramos (2019) estimó una pérdida aproximada de 808 km² de cobertura glaciar entre 2014 y 2018, con una tasa de retroceso de 0,2 km² por año.

Díaz (2021) profundizó en esta línea al analizar el retroceso glaciar en la Sierra entre 2000 y 2020, utilizando imágenes Landsat y generando datos clave para la gestión ambiental en zonas de alta montaña. Por su parte, Anaya et al. (2023) elaboraron un mapa de cobertura terrestre para el Caribe colombiano con datos de Sentinel-1 y Sentinel-2, aplicando algoritmos avanzados para mejorar la clasificación de bosques, especialmente en zonas fragmentadas.

Además, estudios como el de Vaca (2024) sobre sequías repentinas y su impacto en la agricultura regional han demostrado el valor de la teledetección para identificar tendencias hidrológicas críticas. Igualmente, Afanador et al. (2021) evaluaron el uso de índices de vegetación para planificar cultivos sostenibles en áreas previamente degradadas por cultivos ilícitos, proponiendo alternativas agroecológicas viables.

De forma complementaria, Poveda et al. (2017) identificaron una pérdida sostenida de cobertura vegetal en la vertiente occidental de la SNSM entre 1986 y 2015, con un 25 % del área transformada, principalmente por conversión de bosques a usos agrícolas y ganaderos. Su enfoque multitemporal con imágenes Landsat proporciona un precedente técnico valioso.

A escala nacional, Etter et al. (2006) caracterizaron los ecosistemas transformados de Colombia y señalaron que el Caribe colombiano ha perdido cerca del 72 % de sus ecosistemas originales, debido a prácticas como la ganadería extensiva, la expansión urbana y la minería ilegal.

Finalmente, Correa Ayram et al. (2017) propusieron métricas de conectividad ecológica aplicadas a la SNSM y el Caribe seco, lo que permite relacionar los cambios de cobertura con la fragmentación del hábitat y sus implicaciones para la biodiversidad. Esta visión ha sido complementada por Viña et al. (2004), quienes, aunque centrados en la región andina, establecieron un marco metodológico replicable para el análisis multitemporal de coberturas terrestres en regiones complejas y biodiversas.

Estos antecedentes demuestran la pertinencia de realizar un estudio multitemporal enfocado en el Resguardo Kogui-Malayo-Arhuaco, como unidad territorial con alto valor ecológico, cultural e hídrico, y donde confluyen dinámicas ambientales locales con procesos regionales y globales como el cambio climático.

3. Justificación

Colombia tiene una tasa de deforestación anual de 19.2% para el año 2019 (IDEAM) y continúa reduciendo la deforestación anual, pasando de un 10% al 19.2%, (2020) que confirma una tendencia a la baja, aunque existe la presión demográfica por el crecimiento de las ciudades. Aunque en la Sierra Nevada se han adoptado estrategias de conservación, estas no han logrado frenar la vulnerabilidad del ecosistema, el cual continúa expuesto a una serie de presiones humanas internas y externas (IDEAM, 2020). Entre las principales problemáticas se encuentran la tala indiscriminada, los incendios forestales, la expansión de prácticas agrícolas poco sostenibles, la siembra de cultivos ilícitos, el uso excesivo de plaguicidas, el turismo sin control y la explotación minera, todas ellas convertidas en amenazas directas para la región. La situación se agrava cuando estos factores se combinan con fenómenos naturales y se intensifican bajo los efectos del cambio climático, lo que eleva considerablemente el nivel de riesgo (Durán, 2021).

Actualmente, este territorio enfrenta un deterioro ambiental acelerado: los suelos muestran altos índices de degradación, los hábitats se encuentran fragmentados y gran parte de la cobertura vegetal original se ha reducido drásticamente. Como consecuencia, muchas especies catalogadas como amenazadas a nivel mundial presentan disminuciones notables en sus poblaciones dentro del Caribe colombiano. A ello se suman la contaminación, la sedimentación de cuerpos de agua, el retroceso de los glaciares y la pérdida de la capa de nieve, además de cambios significativos en los microclimas locales (Durán, 2021). Vilorio (2005) advierte que esta zona produce anualmente más de diez mil millones de metros cúbicos de agua, cantidad suficiente para abastecer a los departamentos de Magdalena, Cesar y La Guajira, así como a áreas vecinas. No obstante, diversos estudios han evidenciado variaciones en dicha disponibilidad hídrica, atribuyéndolas a múltiples causas (Vilorio, 2005).

Por consiguiente, se reconoce la relevancia de La Sierra Nevada de Santa Marta como territorio ancestral de enorme riqueza ambiental y cultural, hogar de los cuatro pueblos indígenas (Kogui, Arhuaco, Wiwa y Kankuamo) que han mantenido una relación milenaria con sus ecosistemas. Este macizo montañoso alberga una diversidad de ecosistemas únicos, desde áreas de bosque seco tropical hasta páramos y glaciares. Sin embargo, en las últimas décadas, como se mencionó anteriormente la región ha sido testigo de múltiples transformaciones en el uso y la cobertura del suelo debido a diversas actividades humanas y factores ambientales.

Los servicios ecosistémicos prestados por la Sierra Nevada de Santa Marta resultan de gran importancia a nivel nacional y actúa como un centro crucial para la conservación de la biodiversidad y la regulación climática. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2024). Fue declarada por la UNESCO en 1979 como reserva de la biosfera, y en ésta se encuentra el sistema de espacios sagrados “Línea Negra”, donde se interconectan 347 espacios sagrados, redefinidos mediante el decreto 1500 del 6 de agosto de 2018. Un Total de 33 áreas protegidas (Parques Naturales, Reservas Naturales y Forestales, entre otros). También existen 24 resguardos indígenas y 7 territorios colectivos de comunidades étnicas debidamente legalizados ante la Agencia Nacional de Tierras.

El IDEAM define a la Sierra Nevada de Santa Marta como una estrella hidrográfica donde nacen aproximadamente 30 ríos principales hacia las diferentes vertientes, de los cuales la mayor parte de los centros poblados y cabeceras municipales relacionadas con este sistema montañoso se abastecen. La Sierra Nevada de Santa Marta enfrenta serios desafíos que exigen un monitoreo constante. Estos estudios evidencian la transformación de la vegetación y los glaciares, proporcionando una perspectiva crítica sobre el impacto de la agricultura y la ganadería. Integrar estas herramientas en el estudio de los cambios en las coberturas y usos del suelo, permite una evaluación más rigurosa de las dinámicas del paisaje.

El análisis multitemporal de las coberturas y usos del suelo en este territorio, abarcando el período entre 1990 y 2023, es una herramienta crucial para comprender la magnitud y los patrones de cambio que han afectado a los territorio y ecosistemas que conforman la Sierra. Este enfoque permite identificar las dinámicas de transformación a lo largo del tiempo, ayudando a visualizar cómo se han visto impactados tanto el medio ambiente como las comunidades indígenas.

En este contexto, surge la necesidad de realizar un estudio que no solo evidencie los cambios en la cobertura del suelo, sino que también permita proponer soluciones para la restauración y conservación de este valioso territorio.

4. Objetivos

4.1. Objetivo general

Analizar los cambios en la cobertura de la tierra en el Resguardo Kogui-Malayo-Arhuaco, Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia, durante el período 1990-2025, mediante imágenes satelitales y Sistemas de Información Geográfica (SIG).

4.2. Objetivos específicos

- Identificar y clasificar las coberturas y usos del suelo en el Resguardo Kogui-Malayo-Arhuaco durante el periodo 1990-2025 mediante el procesamiento y análisis de imágenes satelitales en Sistemas de Información Geográfica (SIG).
- Comparar las coberturas y usos del suelo en distintos periodos temporales para determinar las áreas con mayores transformaciones o persistencia en el uso del suelo dentro del Resguardo Kogui-Malayo-Arhuaco.
- Evaluar las tendencias y patrones de cambio en el uso del suelo a lo largo del período de estudio, identificando posibles factores socioambientales que influyen en dichos cambios.

5. Pregunta de investigación

¿Cuáles han sido las tendencias y patrones en la transformación de la cobertura y uso del suelo en la Sierra Nevada de Santa Marta entre 1990 y 2025, y cómo se relacionan estas transformaciones con las actividades humanas y el cambio climático en la región?

6. Marco teórico

El análisis de los cambios en las coberturas de la tierra en el Resguardo Kogui-Malayo-Arhuaco, ubicado en la Sierra Nevada de Santa Marta (Colombia), entre los años 1990 y 2025, requiere una aproximación metodológica sólida que permita entender las transformaciones territoriales en un contexto ecológica, cultural y socialmente sensible. Para ello, este trabajo se fundamenta en un conjunto de herramientas teóricas y técnicas que hacen posible el estudio multitemporal del paisaje desde una perspectiva espacial, tales como los Sistemas de Información Geográfica (SIG), la teledetección, el análisis multitemporal, la metodología CORINE Land Cover y el estudio de coberturas y usos del suelo.

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) proporcionan la infraestructura tecnológica y metodológica necesaria para recopilar, gestionar, analizar y visualizar datos geoespaciales. Su capacidad para integrar múltiples capas de información permite identificar patrones y procesos espaciales que inciden en la transformación del territorio. En el contexto del Resguardo Kogui-Malayo-Arhuaco, el uso de SIG permite no solo representar los cambios físicos en la superficie terrestre, sino también vincularlos con factores ambientales, sociales y culturales que influyen en la dinámica del uso del suelo (De Lange, 2023).

A su vez, la teledetección constituye una herramienta fundamental para observar la superficie terrestre de manera sistemática y continua a lo largo del tiempo. Al utilizar imágenes satelitales obtenidas desde plataformas orbitales, se logra un monitoreo eficaz de áreas remotas o de difícil acceso como la Sierra Nevada de Santa Marta.

Esta tecnología permite captar transformaciones en la cobertura vegetal, cambios en el uso del suelo, o la expansión de actividades antrópicas, aportando evidencia cuantificable para el análisis ambiental (Chuvieco, 2020).

Una de las principales técnicas utilizadas en este estudio es el análisis multitemporal, el cual posibilita la comparación de datos geospaciales a lo largo de varias décadas para identificar tendencias, ritmos de cambio y posibles procesos de degradación o recuperación ecológica. Aplicado al caso del Resguardo, este enfoque permite evaluar cómo han variado las coberturas naturales y antrópicas entre 1990 y 2025, y qué implicaciones pueden tener estos cambios para los ecosistemas y para las comunidades indígenas que habitan el territorio (Chuvienco, 2020)

El análisis se sustenta, además, en la clasificación de las coberturas y usos del suelo, entendidas como la expresión de las actividades humanas y los procesos naturales que modelan la superficie terrestre. Esta clasificación no solo incluye áreas cultivadas, cuerpos de agua o zonas urbanizadas, sino también formaciones naturales como bosques, matorrales y áreas desnudas. Su estudio permite comprender las relaciones entre el ambiente físico y las prácticas territoriales, lo cual es clave en territorios indígenas donde existe una interacción profunda entre cultura y naturaleza (Anaya et al., 2023).

Para sistematizar el análisis de las transformaciones en la cobertura de la tierra, se emplea la metodología CORINE Land Cover, que ofrece una tipología jerarquizada y estandarizada que facilita la comparación de datos espaciales a lo largo del tiempo. Aunque originalmente diseñada para Europa, esta metodología ha sido adaptada a diferentes contextos, y en este caso sirve para identificar con precisión los cambios en las categorías de uso y cobertura en el Resguardo, permitiendo generar mapas comparables en diferentes cortes temporales y establecer indicadores de cambio.

En conjunto, estos enfoques constituyen el soporte teórico y técnico para abordar el análisis multitemporal del territorio Kogui-Malayo-Arhuaco, permitiendo interpretar los procesos de transformación del paisaje no solo desde una perspectiva física, sino también en diálogo con la diversidad biocultural que caracteriza a la Sierra Nevada de Santa Marta. Comprender estos

cambios es crucial para proponer estrategias de conservación, recuperación ecológica y fortalecimiento del ordenamiento territorial con enfoque intercultural.

6.1. Referente normativo y legal

El análisis multitemporal de las coberturas y usos del suelo en la Sierra Nevada de Santa Marta, utilizando herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), requiere un marco normativo basado en el sistema jurídico colombiano. Este se organiza conforme a la pirámide de Hans Kelsen, desde la Constitución como norma suprema, hasta los actos administrativos y resoluciones específicas. A continuación, se presenta este referente jerarquizado:

6.1.1. Nivel Fundamental: Constitución Política de Colombia de 1991

Artículo 79: *Reconoce el derecho a un ambiente sano y establece el deber del Estado de garantizar la conservación de los recursos naturales.* Este mandato constitucional cobra especial relevancia en el contexto de la Sierra Nevada, considerada una de las regiones ecológicamente más sensibles y biodiversas del país. En este sentido, el presente proyecto aporta elementos técnicos para la comprensión de los procesos de transformación ambiental a lo largo de tres décadas, constituyéndose en una herramienta que permite visibilizar los efectos del cambio en las coberturas de la tierra sobre el equilibrio ecosistémico. Asimismo, al proporcionar una base cartográfica y temporal del territorio, esta investigación puede ser utilizada como insumo en procesos de educación ambiental, tanto en espacios comunitarios como institucionales, fortaleciendo la conciencia sobre la necesidad de conservar este entorno natural. (Congreso de Colombia. 1991).

Artículo 330: *Otorga autonomía a las comunidades indígenas para manejar los asuntos relacionados con sus territorios, fundamental en la Sierra Nevada de Santa Marta, que es hogar*

de los pueblos Kogui, Arhuaco, Wiwa y Kankuamo. Este marco constitucional reconoce y protege la identidad cultural y territorial de los pueblos que han habitado históricamente la Sierra Nevada y cuyas formas de relación con la tierra se rigen por principios de reciprocidad, equilibrio y respeto hacia la naturaleza. En este contexto, el análisis de los cambios en la cobertura del suelo no puede entenderse únicamente como un ejercicio técnico o ecológico, sino también como una vía para identificar los factores que han fortalecido o debilitado la capacidad de autogobierno de estas comunidades frente al uso del territorio. Así, esta investigación puede contribuir a la toma de decisiones por parte de las autoridades indígenas, fortaleciendo su autonomía territorial, e incluso puede convertirse en una herramienta que respalde sus reivindicaciones frente a dinámicas externas que amenacen sus derechos constitucionalmente reconocidos (Congreso de Colombia. 1991).

6.1.2. Nivel Legal: Leyes Nacionales y Tratados Internacionales

Ley 99 de 1993: *Crea el Ministerio del Medio Ambiente y el Sistema Nacional Ambiental (SINA), y define los lineamientos para la protección de los recursos naturales y el desarrollo sostenible.* La Ley 99 de 1993, conocida como la Ley General del Medio Ambiente en Colombia, marcó un hito al establecer la estructura institucional para la gestión ambiental del país mediante la creación del Ministerio del Medio Ambiente y la organización del Sistema Nacional Ambiental (SINA). Esta norma introdujo principios como el desarrollo sostenible, la conservación de la biodiversidad y la participación ciudadana en los asuntos ambientales. En el contexto del Resguardo Kogui-Malayo-Arhuaco, esta ley ofrece un marco legal fundamental para comprender la responsabilidad del Estado en la protección de ecosistemas estratégicos como la Sierra Nevada de Santa Marta, así como para analizar cómo las transformaciones en las coberturas de la tierra pueden estar relacionadas con políticas, omisiones o intervenciones ambientales institucionales,

entre otros. De manera que el seguimiento y monitoreo del territorio indígena que realiza esta investigación se inscribe dentro de los objetivos que promueve la ley, al aportar información relevante para la conservación ambiental y el ordenamiento ecológico del territorio. (Congreso de Colombia. 1991).

Ley 388 de 1997: *Regula el ordenamiento territorial en Colombia, orientando el uso del suelo hacia la sostenibilidad y la conservación.* Por su parte, la Ley 388 de 1997 desarrolla el marco normativo para el ordenamiento territorial en Colombia, estableciendo criterios técnicos, ambientales y sociales para el uso racional del suelo. Aunque su aplicación se orienta principalmente a la planeación urbana y municipal, su énfasis en la función ecológica del suelo y en la articulación entre los diferentes niveles de planificación resulta pertinente en el análisis de los cambios en la cobertura del territorio indígena. En particular, esta ley permite reflexionar sobre las tensiones que pueden existir entre los instrumentos de planificación territorial estatal y la autonomía de los pueblos indígenas para manejar sus propios espacios. Además, cobra relevancia en las zonas de frontera entre el resguardo y los municipios vecinos, donde las transformaciones del paisaje pueden estar influenciadas por decisiones de planificación ajenas a las comunidades indígenas y a menudo con presión de agente asociados al conflicto armado, generando impactos en su entorno ecológico y cultural. (Congreso de Colombia. 1991).

Ley 1448 de 2011 (Ley de Víctimas y Restitución de Tierras): *Incluye disposiciones para la protección de territorios indígenas y afrodescendientes en contextos de conflicto, relevante en zonas como la Sierra Nevada.* La Ley 1448 de 2011, también conocida como la Ley de Víctimas y Restitución de Tierras, reconoce los efectos del conflicto armado sobre millones de personas en Colombia y propone mecanismos para su reparación integral. Uno de sus componentes

fundamentales es la restitución de tierras, entendida como el retorno de los derechos territoriales a quienes fueron despojados o desplazados forzosamente. Esta ley incorpora un enfoque diferencial para pueblos indígenas, reconociendo la relación colectiva y espiritual que tienen con sus territorios. En este sentido, esta investigación puede aportar insumos valiosos para identificar patrones espaciales de transformación que coincidan con periodos de conflicto o presión territorial, especialmente si se evidencia pérdida de cobertura natural, apropiación indebida del suelo o expansión de actividades no autorizadas dentro del resguardo. Aunque no se trata de un estudio jurídico, el análisis histórico y cartográfico que se presenta aquí puede contribuir a respaldar procesos de exigibilidad de derechos y defensa territorial de las comunidades afectadas en una zona cuyo orden público ha sido tradicionalmente muy convulso. (Congreso de Colombia. 1991).

Convenio 169 de la OIT: *Ratificado por Colombia, este tratado internacional protege los derechos de los pueblos indígenas, incluyendo la consulta previa sobre cualquier proyecto que los afecte.* Finalmente, el Convenio 169 de la OIT, ratificado por Colombia mediante la Ley 21 de 1991, constituye uno de los instrumentos internacionales más importantes en materia de derechos de los pueblos indígenas. Este convenio reconoce su derecho a conservar y fortalecer sus culturas, instituciones y formas tradicionales de vida, así como a ejercer control sobre sus tierras y territorios. (Organización Internacional del Trabajo [OIT], 1989)

Establece también el principio de consulta previa libre e informada como un requisito obligatorio antes de adoptar cualquier medida que pueda afectar directamente a estos pueblos. La relevancia del Convenio 169 para esta investigación es profunda, en tanto toda transformación del territorio indígena, sea por intervención directa o por presión externa, debe ser consultada con las comunidades. La documentación de los cambios en la cobertura de la tierra puede revelar procesos que han ocurrido sin el consentimiento de las autoridades tradicionales, configurando posibles

violaciones a este tratado. De igual forma, puede fortalecer las capacidades de monitoreo comunitario y de gobernanza territorial basada en el derecho propio, al proveer un insumo de análisis técnico y aportando así al reconocimiento efectivo del principio de autodeterminación.

6.1.3. Nivel Reglamentario: Decretos y Reglamentos

Decreto 1500 de 2018: *Reconfigura los límites de la “Línea Negra” y establece procedimientos específicos para proteger los territorios sagrados de la Sierra Nevada.* El Decreto 1500 de 2018, expedido por el Ministerio del Interior, reglamenta los procedimientos para la delimitación, demarcación y ampliación de los territorios indígenas. Este decreto establece los pasos técnicos y jurídicos que deben seguirse para formalizar los límites y el reconocimiento legal de los resguardos indígenas, incluyendo la participación de las comunidades y el uso de herramientas cartográficas y geoespaciales. En el caso del Resguardo Kogui-Malayo-Arhuaco, este decreto adquiere especial relevancia, ya que cualquier análisis de cambios en el uso del suelo debe situarse dentro de un marco espacial y legalmente reconocido. La delimitación oficial del resguardo es fundamental para identificar si las transformaciones en la cobertura de la tierra se han producido dentro o fuera de los límites reconocidos. Además, el decreto refuerza la importancia de los SIG y la cartografía en la gestión de los derechos territoriales indígenas, lo cual se alinea directamente con la metodología empleada en esta investigación. (Presidencia de la República de Colombia, 2018)

Decreto 3570 de 2011: *Organiza las funciones del Ministerio del Ambiente, abarcando la gestión sostenible de los ecosistemas estratégicos.* El Decreto 3570 de 2011, por medio del cual se reestructura el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, define las funciones y competencias de esta entidad dentro del Sistema Nacional Ambiental. Entre sus disposiciones,

destaca la función de coordinar la formulación de políticas públicas para la conservación de los ecosistemas estratégicos y la implementación de estrategias de monitoreo y seguimiento ambiental. Este decreto es relevante para este trabajo porque establece una base institucional para las políticas de protección en zonas como la Sierra Nevada de Santa Marta, considerada un ecosistema de importancia nacional e internacional. Asimismo, refuerza el papel del Ministerio en la consolidación de sistemas de información ambiental, lo que respalda el uso de datos satelitales, cartografía temática y análisis multitemporal como herramientas válidas y necesarias para evaluar los cambios en la cobertura vegetal y en el uso del suelo en territorios indígenas protegidos. (Presidencia de la República de Colombia, 2011)

6.1.4. Nivel Básico: Actos Administrativos, Acuerdos y Resoluciones

Resolución 192 de 2014 (IDEAM): *Regula el uso de imágenes satelitales y otros datos geoespaciales en estudios ambientales, asegurando estándares éticos y técnicos.* Por su parte, la Resolución 192 de 2014, expedida por el IDEAM, establece los lineamientos técnicos para la generación, actualización y manejo de la información oficial de coberturas de la tierra en Colombia. Esta resolución define la metodología CORINE Land Cover adaptada al contexto nacional y estandariza los procesos de clasificación, nomenclatura y codificación de las coberturas, lo cual garantiza la comparabilidad de la información en el tiempo y entre regiones. Esta norma es probablemente la más pertinente en relación a esta investigación, ya que uno de sus ejes centrales es precisamente el análisis multitemporal de coberturas en el resguardo. Utilizar la clasificación oficial y alinearse con los criterios establecidos por el IDEAM no solo fortalece la rigurosidad técnica del estudio, sino que también permite que los resultados puedan dialogar con la información

oficial utilizada por entidades gubernamentales, ONG y comunidades. (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM], 2014)

Resolución 376 de 2013: *Permisos de uso de datos geoespaciales.* La Resolución 376 de 2013, expedida por el IDEAM, establece el procedimiento para la solicitud, acceso, entrega y uso de la información ambiental geográfica producida o administrada por esta entidad. Esta norma exige a los usuarios firmar acuerdos de uso que aseguren la protección de la integridad de los datos, el reconocimiento de su carácter oficial y la prohibición de su reproducción o comercialización sin autorización. En el contexto de este proyecto, la Resolución 376 será relevante en tanto se requiera acceder a información geoespacial producida por el IDEAM. Pues en este caso, contar con el permiso de uso adecuado, además de ser un requisito legal, aporta legitimidad y rigurosidad al estudio, y permite que sus resultados puedan ser incorporados en los sistemas oficiales de información ambiental del país. Esta resolución, constituye entonces una pieza esencial para asegurar la trazabilidad y el valor público del trabajo cartográfico desarrollado en el marco de esta investigación. (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM], 2013)

Acuerdos locales: *Emitidos por corporaciones autónomas regionales, como CORPAMAG, para proteger las áreas estratégicas de la Sierra Nevada.* Finalmente, acuerdos y resoluciones emitidos por las corporaciones autónomas regionales, como CORPAMAG en el caso de la Sierra Nevada de Santa Marta, constituyen otro componente esencial de este nivel normativo. CORPAMAG, como autoridad ambiental en el Magdalena, ha adoptado diversos instrumentos para la conservación y manejo de áreas estratégicas dentro de su jurisdicción, incluyendo planes de manejo de microcuencas, declaratorias de áreas protegidas y acciones frente a procesos de degradación ambiental. Incorporar en el análisis la existencia de estos acuerdos locales permite

contextualizar ciertos cambios observados en la cobertura del suelo, identificando si responden a procesos de restauración promovidos por la autoridad ambiental o, por el contrario, a dinámicas que escapan a su control.

7. Metodología

El estudio de los cambios en las coberturas de la tierra en el Resguardo Kogui-Malayo-Arhuaco, en la Sierra Nevada de Santa Marta, se hizo a través de un enfoque cuantitativo, por medio de la utilización de información numérica, técnicas estadísticas y aplicación de indicadores que permitieron cuantificar el fenómeno a estudiar (Hernández et al., 2014). Este enfoque facilitó la medición objetiva de los cambios espaciales y temporales en el territorio, al permitir comparar variables como la extensión de determinadas coberturas, las tasas de transformación o la persistencia de ciertos usos del suelo, a partir del análisis de datos derivados de imágenes satelitales y su procesamiento mediante herramientas SIG.

Dado que la investigación se orientó en analizar los cambios espaciales ocurridos en la cobertura de la tierra a lo largo del tiempo, el estudio adoptó un alcance descriptivo, el cual permitió representar de manera detallada y sistemática las transformaciones en el territorio del Resguardo Kogui-Malayo-Arhuaco entre 1990 y 2025. Este tipo de alcance es adecuado cuando se busca observar, clasificar y cuantificar fenómenos sin profundizar en sus causas (Hernández et al., 2014); lo que resultó pertinente para evidenciar la evolución de las coberturas del suelo a partir de datos geoespaciales y mapas comparativos generados mediante imágenes satelitales Landsat, implementando técnicas de teledetección a través de herramientas SIG que permitieron estudiar los cambios espaciales y temporales en la cobertura y uso del suelo, para identificar dinámicas como deforestación, expansión agrícola, regeneración de bosques, entre otros.

Para el presente estudio se planteó una metodología que está constituida por las siguientes fases:

7.1. FASE 1: Búsqueda, descarga de Imágenes Satelitales y procesamiento

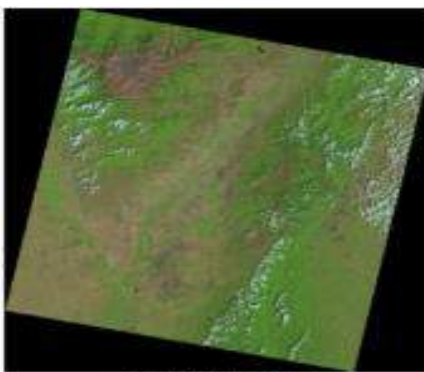
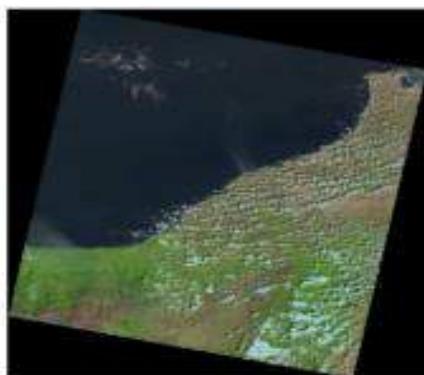
Para la recolección de información se emplearon imágenes satelitales de mediana resolución obtenidas de Landsat (5 y 8), descargadas del portal USGS Earth Explorer, dentro del cual se puede encontrar información relacionada a los diferentes proyectos satelitales que se llevan a cabo, puesto que presentan información global y de libre acceso, cabe mencionar que la escala que se empleo fue de 1:100.000, para la descarga de las imágenes se tuvo en cuenta el periodo climático (seco), para apreciar de manera más eficiente los cambios en los usos del terreno.

Los intervalos de tiempo están dados de acuerdo con la disponibilidad y calidad de las imágenes a disposición en la base de datos del portal Web de la U.S Geological Survey (USGS.), portal que cuenta con una amplia base de datos de los diferentes satélites Landsat, tomando en cuenta la temporada de los años con bajas nubosidades en la región, cuyo periodo fue generalmente entre los meses de junio a agosto, se obtuvieron cinco imágenes satelitales de cada periodo, en el año 1990, 1999, 2010, 2017 y 2025 del satélite Landsat 5 TM y de Landsat 8 ETM+, con el fin de obtener una mejor resolución espectral. Estas imágenes poseen una resolución de 30 metros en cada banda del espectro visible e infrarrojo y se tuvo en cuenta el porcentaje de nubosidad, este no debe pasar del 25%, de esta manera se evita la pérdida de detalle en la zona objeto de estudio; según (Pimento, 2019).

La previsualización de las imágenes y sus principales características se exponen en la Tabla

Tabla 1: *Imágenes Landsat utilizadas. Previsualización y datos de cada imagen*

PRE VISUALIZACION	DATOS DE LA IMAGEN
 <p data-bbox="415 642 613 659">Level-1 Reflective Browse</p>	<p data-bbox="964 300 1409 373">Origen de la Imagen: Earth Explorer del USGS</p> <p data-bbox="964 390 1432 420">Código USGS: LT50080521990015CPE04</p> <p data-bbox="964 436 1295 466">Fecha de captura: 15/01/1990</p> <p data-bbox="964 483 1166 512">Satélite: Landsat 5</p> <p data-bbox="964 529 1289 558">Orientación: hemisferio norte</p> <p data-bbox="964 575 1166 604">DATUM: WGS84</p> <p data-bbox="964 621 1133 651">Zona UTM: 18</p>
 <p data-bbox="415 1075 613 1092">Level-1 Reflective Browse</p>	<p data-bbox="964 709 1409 783">Origen de la Imagen: Earth Explorer del USGS</p> <p data-bbox="964 800 1432 829">Código USGS: LT50080531999040CPE01</p> <p data-bbox="964 846 1295 875">Fecha de captura: 09/02/1999</p> <p data-bbox="964 892 1166 921">Satélite: Landsat 5</p> <p data-bbox="964 938 1289 968">Orientación: hemisferio norte</p> <p data-bbox="964 984 1166 1014">DATUM: WGS84</p> <p data-bbox="964 1031 1133 1060">Zona UTM: 18</p>
 <p data-bbox="415 1501 613 1518">Level-1 Reflective Browse</p>	<p data-bbox="964 1136 1409 1209">Origen de la Imagen: Earth Explorer del USGS</p> <p data-bbox="964 1226 1432 1255">Código USGS: LT50090532010029CHM01</p> <p data-bbox="964 1272 1295 1302">Fecha de captura: 29/01/2010</p> <p data-bbox="964 1318 1166 1348">Satélite: Landsat 5</p> <p data-bbox="964 1365 1289 1394">Orientación: hemisferio norte</p> <p data-bbox="964 1411 1166 1440">DATUM: WGS84</p> <p data-bbox="964 1457 1133 1486">Zona UTM: 18</p>

PRE VISUALIZACION**DATOS DE LA IMAGEN**

Origen de la Imagen: Earth Explorer del USGS
Código USGS: LC80080522017041LGN00
Fecha de captura: 17/02/2017
Satélite: Landsat 5
Orientación: hemisferio norte
DATUM: WGS84
Zona UTM: 18

Origen de la Imagen: Earth Explorer del USGS
Código USGS: LT50080531998357CPE03
Fecha de captura: 16/02/2025
Satélite: Landsat 5
Orientación: hemisferio norte
DATUM: WGS84
Zona UTM: 18

Fuente: Elaboración propia

En esta fase se realizó un preprocesamiento de las imágenes, en vista que de su adecuada manipulación depende directamente la calidad de la interpretación, igualmente, esta etapa nos ayudó a disminuir los errores de tipo geométrico y sistemático. Teniendo en cuenta lo anterior se realizaron las siguientes correcciones:

El listado completo de las imágenes utilizadas se puede apreciar en la Tabla 2

Tabla 2: Listado de imágenes satelitales seleccionadas para la zona

Path/Row	Fecha	Sensor	% nubosidad
08/52	15 de enero de 1990	Landsat 5 TM	25
08/53	15 de enero de 1990	Landsat 5 TM	25
09/52	22 de enero de 1990	Landsat 5 TM	16

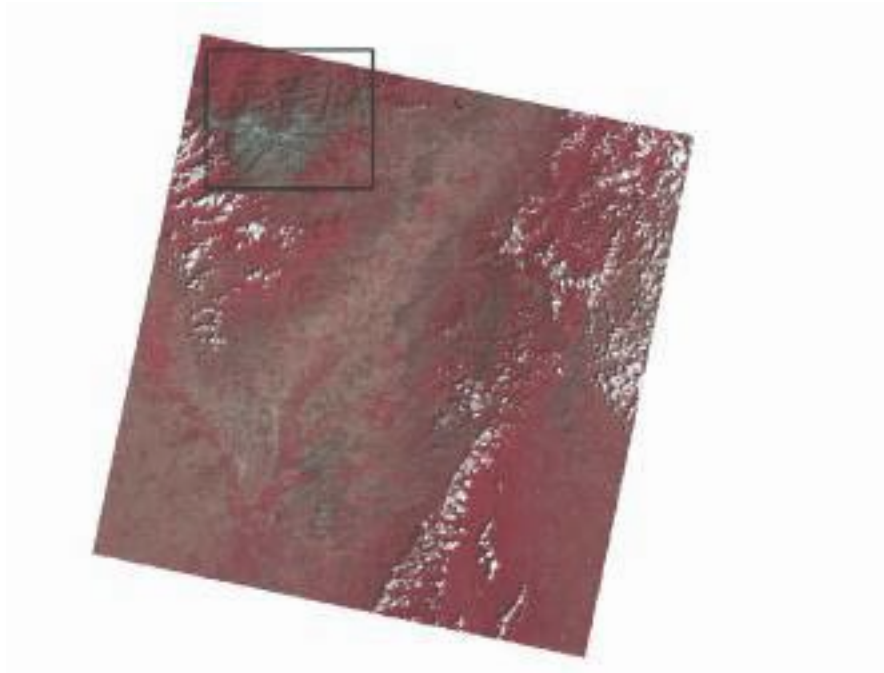
Path/Row	Fecha	Sensor	% nubosidad
08/52	9 de febrero de 1999	Landsat 5 TM	9
08/53	9 de febrero de 1999	Landsat 5 TM	15
09/52	16 de febrero de 1999	Landsat 5 TM	13
08/52	22 de enero de 2010	Landsat 5 TM	0
08/53	22 de enero de 2010	Landsat 5 TM	0
09/52	29 de enero de 2010	Landsat 5 TM	18
08/52	10 de febrero de 2017	Landsat 8 OLI_TIRS	15
08/53	10 de febrero de 2017	Landsat 8 OLI_TIRS	23
09/52	29 de enero de 2017	Landsat 8 OLI_TIRS	13
08/52	16 de febrero de 2025	Landsat 8 OLI_TIRS	12
08/53	16 de febrero de 2025	Landsat 8 OLI_TIRS	7
09/52	15 de febrero de 2025	Landsat 8 OLI_TIRS	9

Fuente: Elaboración propia

En las imágenes satelitales empleadas para el análisis de coberturas se evaluó el porcentaje de nubosidad con el fin de garantizar la confiabilidad de los resultados. En 1990, las escenas presentaron nubosidades del 25 % (path/row 08/52 y 08/53) y 16 % (09/52). Para 1999, los valores

oscilaron entre 9 % y 15 %, mientras que en 2010 se registraron condiciones más favorables, con dos escenas libres de nubosidad y una con un 18 %. En 2017, los porcentajes fluctuaron entre 13 % y 23 %, y en 2025 entre 6 % y 12 %. La condición principal para la selección de imágenes se basó en que el área del resguardo estuviera lo más libre posible de nubes, situación que se cumple en estas imágenes, tal como se muestra a continuación; ya que si bien, se presenta cierta nubosidad en la escena en general, el área de interés estaba relativamente desprovista de nubes. Ese ejemplo se muestra en la Figura 1, en la cual se observa la escena completa Landsat con path/row 08/53 del 16 de febrero del año 2025, y en el recuadro negro se detalla la ubicación del resguardo.

Figura 1: Imagen Landsat 2025 composición RGB a falso color 5-4-3, con path/row 08/53 y porcentaje de nubosidad del 7%.



Fuente: Elaboración propia

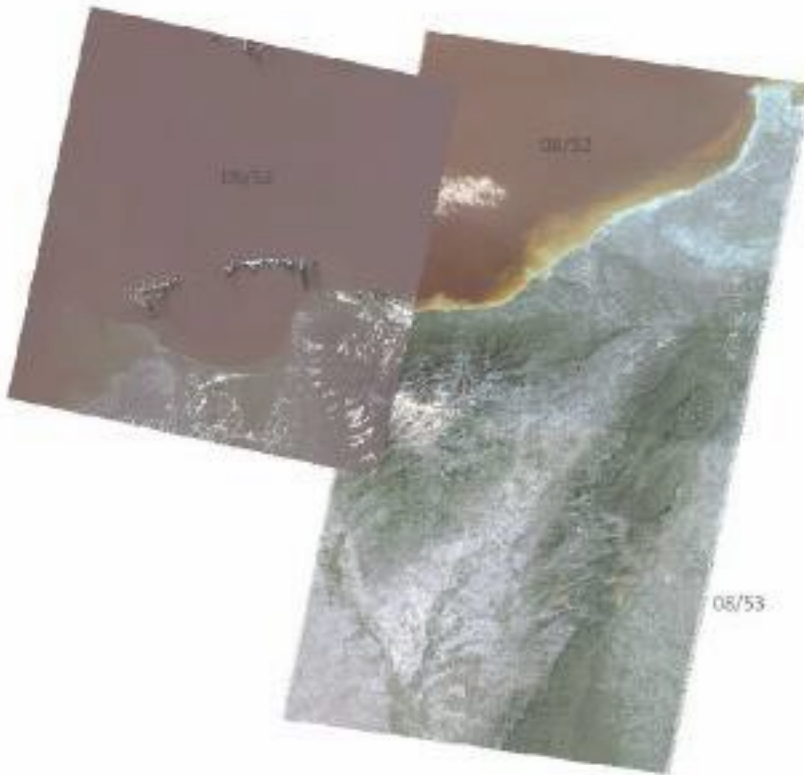
La nubosidad fue tratada mediante un ajuste en la post clasificación, de modo que las áreas cubiertas por nubes y sombras fueron ajustadas para clasificarlas como una de las coberturas seleccionadas para el estudio (bosque denso, bosque fragmentado con vegetación secundaria, tierras desnudas y/o degradadas, afloramientos rocosos y zonas glaciares). Esto se hizo con el apoyo brindado por herramientas como Google Earth para la identificación de coberturas y el

análisis de las imágenes de los demás años, con el fin de poder identificar qué coberturas están presentes en las zonas cubiertas por nubes.

Para el procesamiento de las imágenes se extrajo una ventana de interés con la ubicación del resguardo para tener una mejor visibilidad de la zona. Debido a que el resguardo se encuentra ubicado en el área límite para la captura de imágenes Landsat en los path y row que cubren la zona, fue necesario realizar un mosaico con las imágenes recortadas para obtener la visualización de toda el área de estudio, tal como se muestra en las Figuras 2, 3, 4, 5 y 6 en donde se observa con el ejemplo de las imágenes obtenidas para el año 2010.

1. Cargue de la información con las escenas completas de las imágenes

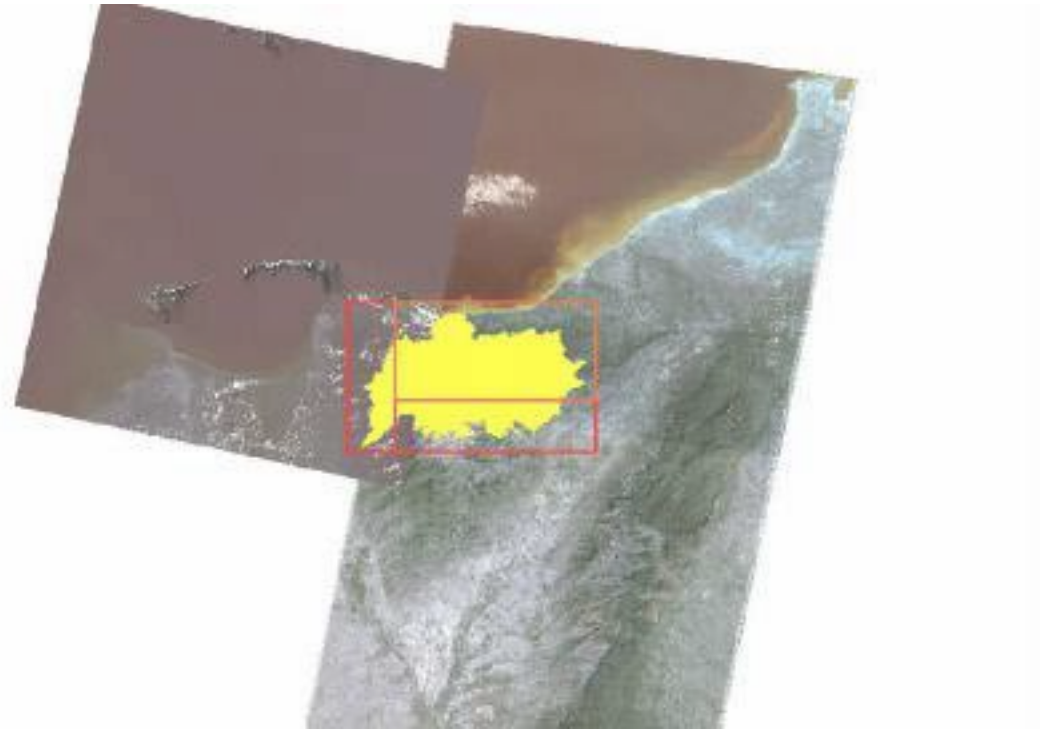
Figura 2: Paso a paso para el recorte de imágenes landsat. PASO 1



Fuente: Elaboración propia

2. Recorte de cada una de las imágenes con base en la ubicación del resguardo.

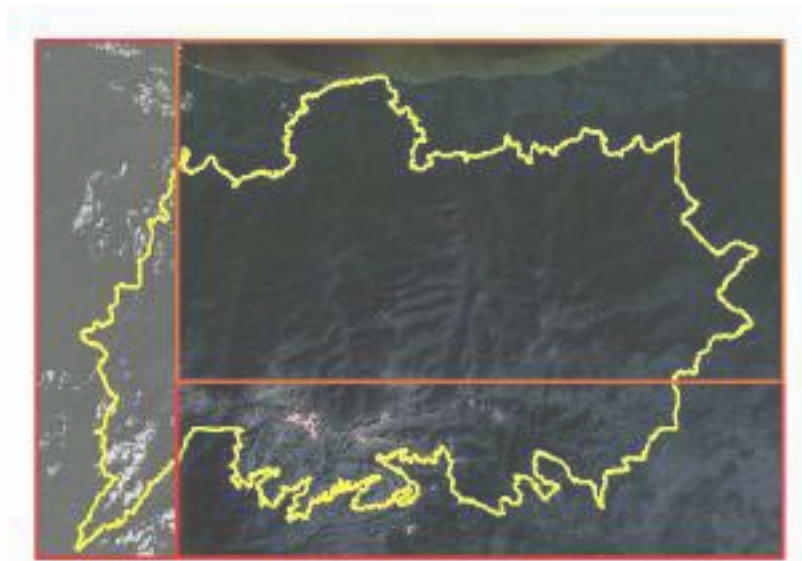
Figura 3: Paso a paso para el recorte de imágenes landsat. PASO 2



Fuente: Elaboración propia

3. Obtención de las ventanas de estudio para cada escena

Figura 4: Paso a paso para el recorte de imágenes landsat. PASO 3



Fuente: Elaboración propia

4. Mosaico de las ventanas de estudio para la obtención de una imagen en general.

Figura 5: *Paso a paso para el recorte de imágenes landsat. PASO 4*



Fuente: Elaboración propia

5. Recorte con la máscara del área del resguardo para obtener la visualización únicamente del área de estudio.

Figura 6: *Paso a paso para el recorte de imágenes landsat. PASO 5*

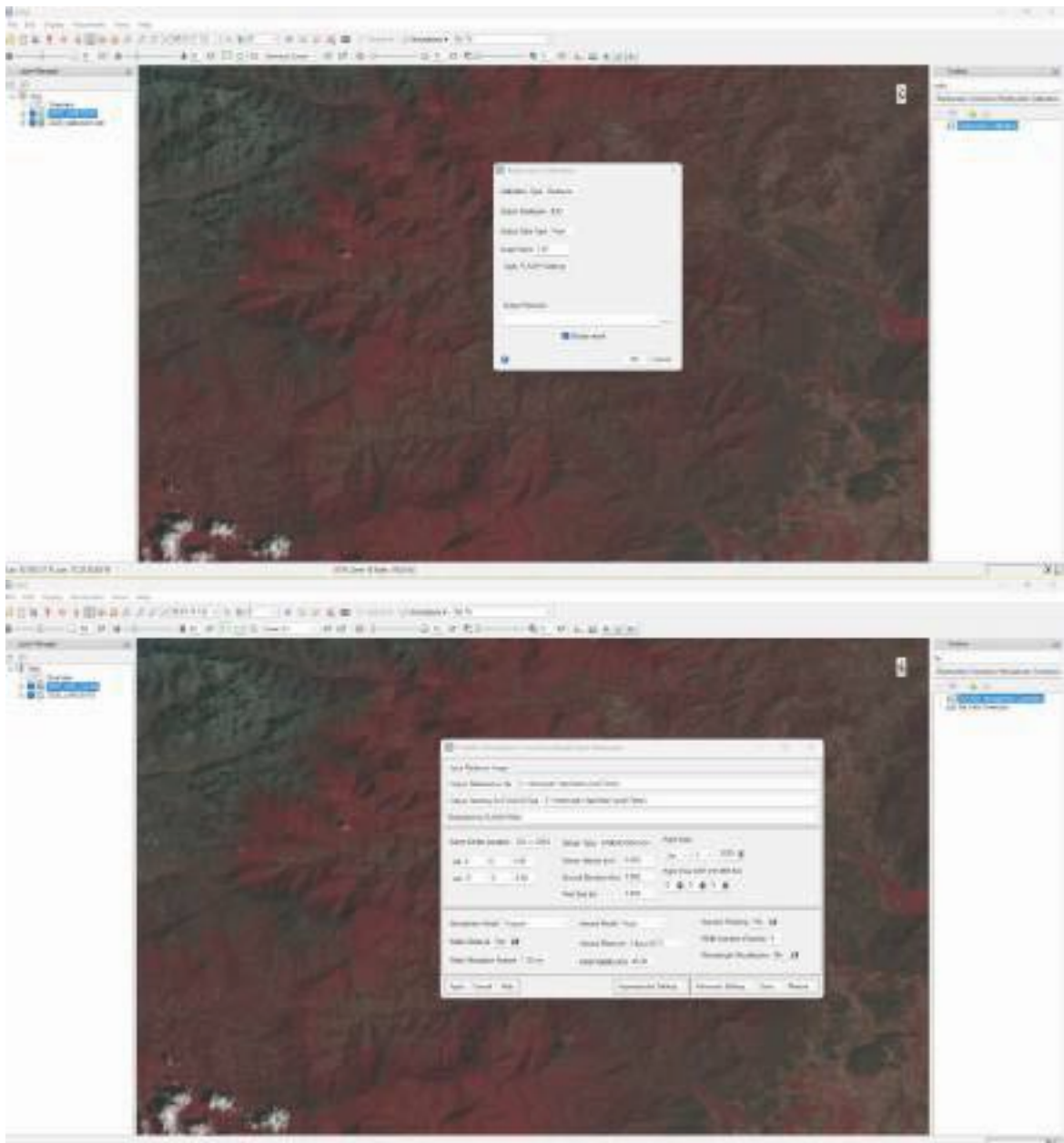


Fuente: Elaboración propia

Una vez recortada la imagen, se procedió a realizar procesos de calibración y corrección atmosférica como se muestra en la Figura 7. El proceso de calibración radiométrica se hace con el fin de convertir los niveles digitales de la imagen a valores de reflectancia para eliminar la

dependencia de las cubiertas del suelo a las condiciones de iluminación, debido a la posición en la cual se encuentra el sol en el momento y tiempo de la toma de la imagen (Correal y García, 2012). Por otro lado, la corrección atmosférica hace referencia a la eliminación del fenómeno de dispersión atmosférica en la banda del azul. Los procesamientos a las imágenes satelitales se realizaron en los programas informáticos ENVI 5.3 y ArcGIS Pro 3.3.

Figura 7: *Proceso de calibración radiométrica y corrección atmosférica en ENVI 5.1*



Fuente: Elaboración propia

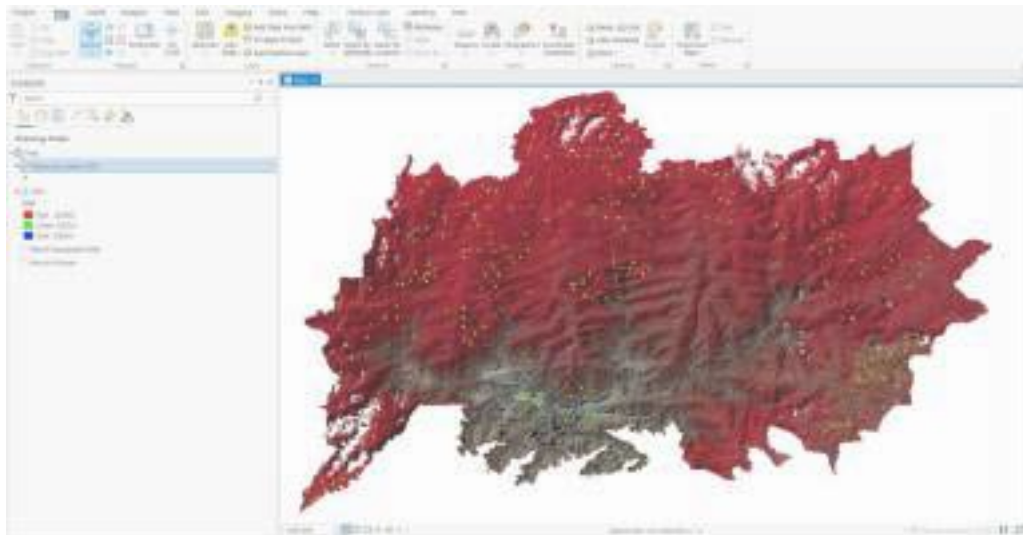
7.1.1. Definición del sistema de clasificación o leyenda para la interpretación.

Para la identificación y clasificación de las coberturas, se realizó la visualización y procesamiento de las imágenes satelitales Landsat detalladas en la Tabla 1. Esto consiste en una clasificación supervisada a partir de la toma de muestras de las coberturas que dependen de los usos del suelo presentes en la zona; se delimitaron cada una de ellas, a través del análisis de la imagen y la combinación de bandas espectrales para una mejor visualización de las características de cada cobertura. La identificación de todas éstas se realizó con base en la metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia a escala 1:100.000 (IDEAM, 2010).

La clasificación supervisada se llevó a cabo tomando puntos de muestreo de píxeles puros que representaran de forma precisa cada cobertura en el área de estudio. Estos puntos fueron utilizados para generar un archivo de firmas espectrales, el cual sirvió como insumo para entrenar el algoritmo de clasificación. Una vez creado este archivo, se aplicó el algoritmo de máxima verosimilitud (Maximum Likelihood), el cual asigna cada píxel de la imagen a una clase determinada en función de la probabilidad estadística de pertenencia a cada firma espectral. Posteriormente, se aplicó el filtro majority para suavizar el resultado de la clasificación, reduciendo el ruido espacial y corrigiendo pequeñas agrupaciones de píxeles mal clasificados. Este proceso permitió obtener un mapa temático más uniforme y representativo de las coberturas presentes en el área de estudio. En la Figura 8 se observa el paso a paso de este procedimiento.

Figura 8: *Clasificación supervisada en ArcGIS Pro.*

1. Selección de puntos de muestreo (píxeles puros) que representan cada una de las coberturas.

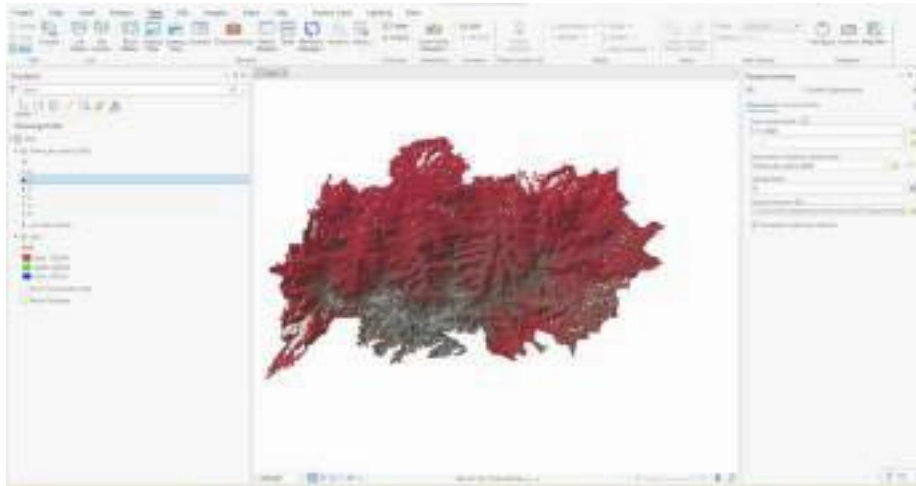


Fuente: Elaboración propia

Cada punto va identificado con el código de cobertura al que pertenece: 1(bosque denso), 2 (bosque fragmentado con vegetación secundaria), 3 (afloramientos rocosos), 4 (tierras desnudas y/o degradadas), 5 (zonas glaciares).

2. Generación del archivo de firmas espectrales mediante el procesamiento *Create signatures* con base en los puntos de control tomados como referencia para el muestreo.

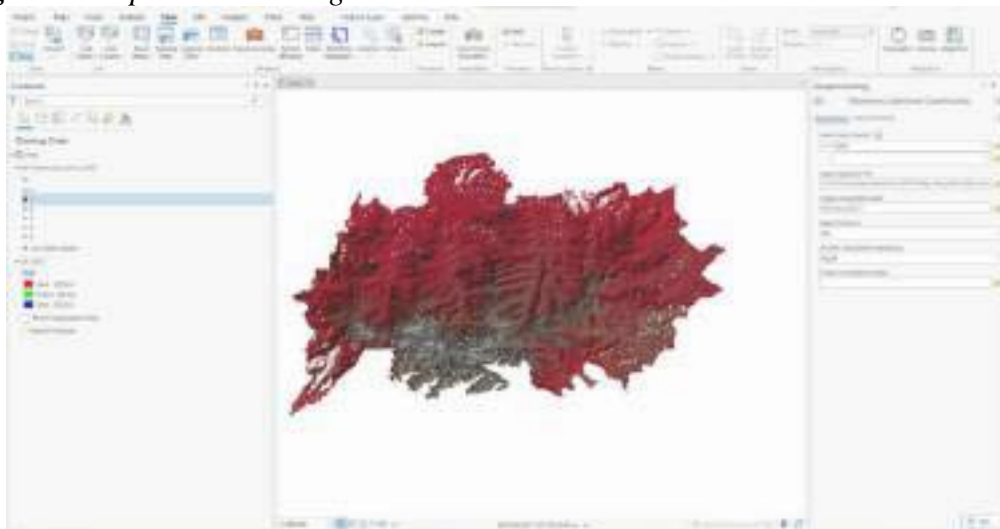
Figura 9: Generación del archivo de firmas espectrales



Fuente: Elaboración propia

3. Aplicación del algoritmo de máxima verosimilitud (*Maximum Likelihood Classification*)

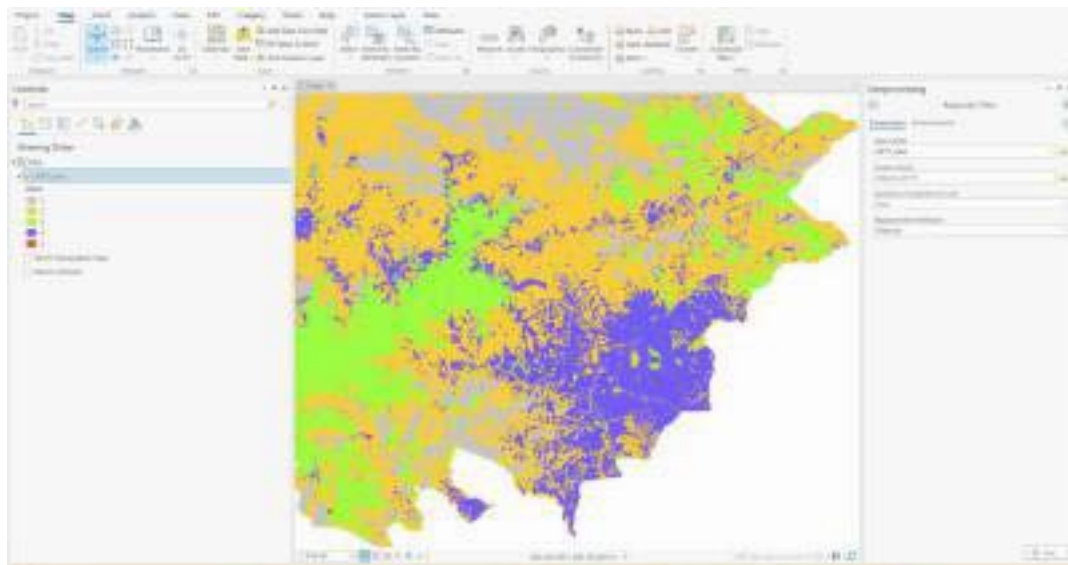
Figura 10: Aplicación del algoritmo de máxima



Fuente: Elaboración propia

4. Aplicación del filtro Majority

Figura 11: *Aplicación del filtro Majority*



Fuente: Elaboración propia.

Las coberturas identificadas en la zona con base en la metodología CORINE LAND COVER fueron las siguientes.

Tabla 3: *Coberturas de acuerdo con la metodología Corine Land Cover*

Categoría general	Cobertura
3. Bosques y áreas seminaturales	3.1.1. Bosque denso
	3.1.1.3.2. Bosque fragmentado con vegetación secundaria
	3.3.2. Afloramientos rocosos
	3.3.3. Tierras desnudas y degradadas
	3.3.5. Zonas glaciares y nivales

La escala a la cual se generó el mapa de coberturas para cada año es 1:100.000, permitiendo identificar la distribución espacial de estos cinco tipos de coberturas presente en la zona. La información resultante de la clasificación fue organizada y representada mediante cartografía temática para cada año de estudio, lo cual facilitó la visualización e interpretación espacial de las coberturas identificadas. Esta representación cartográfica sirvió como insumo fundamental para el

análisis multitemporal de los cambios en el uso del suelo. La validación de los resultados se realizó comparando la información de las coberturas seleccionando puntos de muestreo de distribución aleatoria para corroborar en la herramienta Google Earth, la cual permite una visualización muy detallada de las coberturas, que evidentemente la cobertura correspondiera con lo que se identificó en la clasificación supervisada; lo cual se observa en la Figura 12.

Figura 12: *Validación de coberturas en Google Earth como verificación de la identificación de coberturas en las imágenes Landsat en composición color verdadero.*



Afloramientos rocosos (Imagen Landsat)



Afloramientos rocosos (Google Earth)



Tierras desnudas y/o degradadas (Imagen Landsat)



(Google Earth)



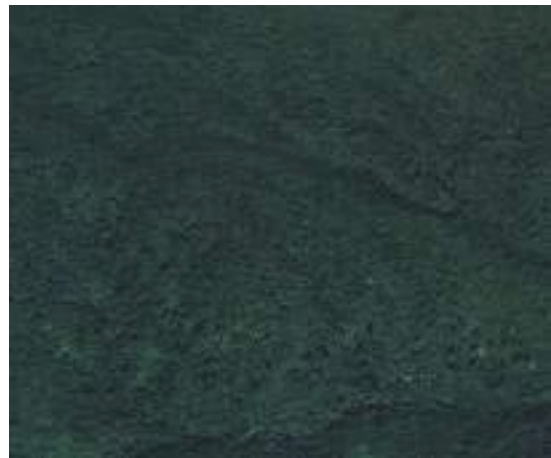
Bosque fragmentado con vegetación secundaria (Imagen Landsat)



(Google Earth)



Bosque denso (Imagen Landsat)



Bosque denso (Google Earth)



Zonas glaciares (Imagen Landsat)



Zonas glaciares (Google Earth)

Fuente: Elaboración propia

7.2.FASE 2: Análisis de Cambios en las coberturas

La determinación de los cambios en las coberturas se obtiene a partir de la combinación de cada una de las coberturas identificadas para los años 1990, 1999, 2010, 2017 y 2025, por medio de una matriz de cambios, esto con el fin de identificar zonas en donde se han presentado cambios en las coberturas. La matriz de cambio se elaboró tomando como referencia el estudio de Serrano et al. (2014), y adaptándolo a las coberturas identificadas para la zona de este trabajo, como se evidencia en la Tabla 4

Tabla 4: *Matriz de cambios de coberturas*

Coberturas:						
1	Bosque denso					
2	Bosque fragmentado con vegetación secundaria					
3	Afloramientos rocosos					
4	Tierras desnudas y degradadas					
5	Zonas glaciares y nivales					
Categorías de cambio:						
A	Bosque denso sin cambios					
B	Fragmentación del bosque denso					
C	Pérdida de bosque					
D	Recuperación glaciar					
E	Recuperación del bosque					
F	Bosque fragmentado sin cambios					
G	Zonas sin vegetación sin cambios					
H	Pérdida de glaciar					
I	Glaciar sin cambios					
		COBERTURA FINAL				
		1	2	3	4	5
COBERTURA INICIAL	1	A	B	C	C	D
	2	E	F	C	C	D
	3	E	E	G	G	D
	4	E	E	G	G	D
	5	H	H	H	H	I

La matriz de cambio presentada constituye una herramienta clave para la interpretación de las transiciones entre coberturas terrestres en dos momentos temporales distintos. En este caso, se parte de cinco tipos de coberturas representativas de ecosistemas naturales —bosque denso, bosque fragmentado con vegetación secundaria, afloramientos rocosos, tierras desnudas y degradadas, y zonas glaciares y nivales— para identificar los procesos de transformación asociados. Cada celda de la matriz refleja una categoría de cambio, codificada con una letra, que resume el tipo de dinámica observada entre la cobertura inicial y la cobertura final. Estas categorías comprenden tanto situaciones de estabilidad (como "A" para bosque denso sin cambios, "F" para bosque fragmentado sin cambios, "G" para zonas sin vegetación sin cambios o "J" para glaciar sin cambios), como procesos de degradación (por ejemplo, "B" para fragmentación del bosque, "C" para pérdida de bosque y "H" para pérdida de glaciar) y de recuperación o restauración ambiental (como "D" para recuperación glaciar y "E" para recuperación del bosque).

Las categorías de cambio identificadas se definen de la siguiente manera:

A. Bosque denso sin cambios: zonas donde la cobertura de bosque denso se mantiene estable entre los dos periodos analizados, sin evidencia de fragmentación o transformación.

B. Fragmentación del bosque denso: áreas que inicialmente presentaban bosque denso y que en el periodo final se han transformado en bosque fragmentado con vegetación secundaria, indicando una pérdida de continuidad en la cobertura forestal.

C. Pérdida de bosque: áreas donde las coberturas de bosque denso o fragmentado han sido reemplazadas por otras categorías sin vegetación arbórea significativa, como tierras degradadas, afloramientos rocosos u otras formas de cobertura menos estructurada.

D. Recuperación glaciar: zonas que, en el periodo inicial, no presentaban cobertura glaciar, pero que en el periodo final muestran evidencia de reconfiguración o avance de masas de hielo o nieve.

E. Recuperación del bosque: áreas que han transitado desde coberturas degradadas o sin vegetación (como tierras desnudas o vegetación secundaria) hacia formas de cobertura forestal, ya sea fragmentada o densa, como resultado de procesos de regeneración natural o inducida.

F. Bosque fragmentado sin cambios: sectores en los que se mantiene la condición de bosque fragmentado con vegetación secundaria entre ambos periodos, sin cambios estructurales significativos.

G. Zonas sin vegetación sin cambios: áreas donde las coberturas de tipo no vegetado, como afloramientos rocosos o tierras degradadas, permanecen sin alteraciones durante el periodo analizado.

H. Pérdida de glaciar: zonas que han sufrido un retroceso o desaparición de la cobertura glaciar entre los dos periodos, lo cual puede estar relacionado con procesos de cambio climático o transformación del uso del suelo.

I. Glaciar sin cambios: áreas de cobertura glaciar que se mantienen estables, sin evidencia de pérdida o avance, durante el periodo de análisis.

Mediante este procedimiento se pudo evaluar las tendencias y patrones de cambio en el uso del suelo a lo largo del período de estudio, identificando posibles factores socioambientales que influyen en dichos cambios para el análisis de resultados.

7.3.FASE 3: Evaluación de las tendencias y patrones de cambio

Para identificar las tendencias y patrones de cambio en el uso del suelo en el Resguardo Kogui-Malayo-Arhuaco entre 1990 y 2025, se utilizaron los resultados obtenidos del análisis multitemporal de imágenes satelitales Landsat. Se trabajó con coberturas clasificadas en cinco periodos: 1990, 1999, 2010, 2017 y 2025. A partir de las áreas en hectáreas correspondientes a cada clase de cobertura, se calcularon variaciones absolutas y relativas para determinar si cada cobertura presentaba una tendencia de crecimiento, reducción o estabilidad.






Se construyeron gráficos de evolución temporal para cada clase de cobertura y se analizó el comportamiento de estas superficies a lo largo del tiempo. Posteriormente, se interpretaron las posibles causas de las transformaciones observadas, considerando factores como la deforestación, el retroceso glaciar, la expansión de áreas degradadas o la regeneración de vegetación secundaria.

8. Resultados

8.1. Identificación y clasificación de coberturas

Las coberturas identificadas para la zona con base en su clasificación y codificación de acuerdo con la metodología CORINE LAND COVER se muestran a continuación, son áreas de interés que se seleccionaron con base en la visualización de la herramienta Google Earth, para posteriormente identificar estas zonas en las imágenes satelitales y clasificarlas de acuerdo con su cobertura.

Tabla 5: *Imágenes de referencia de tipos de cobertura*

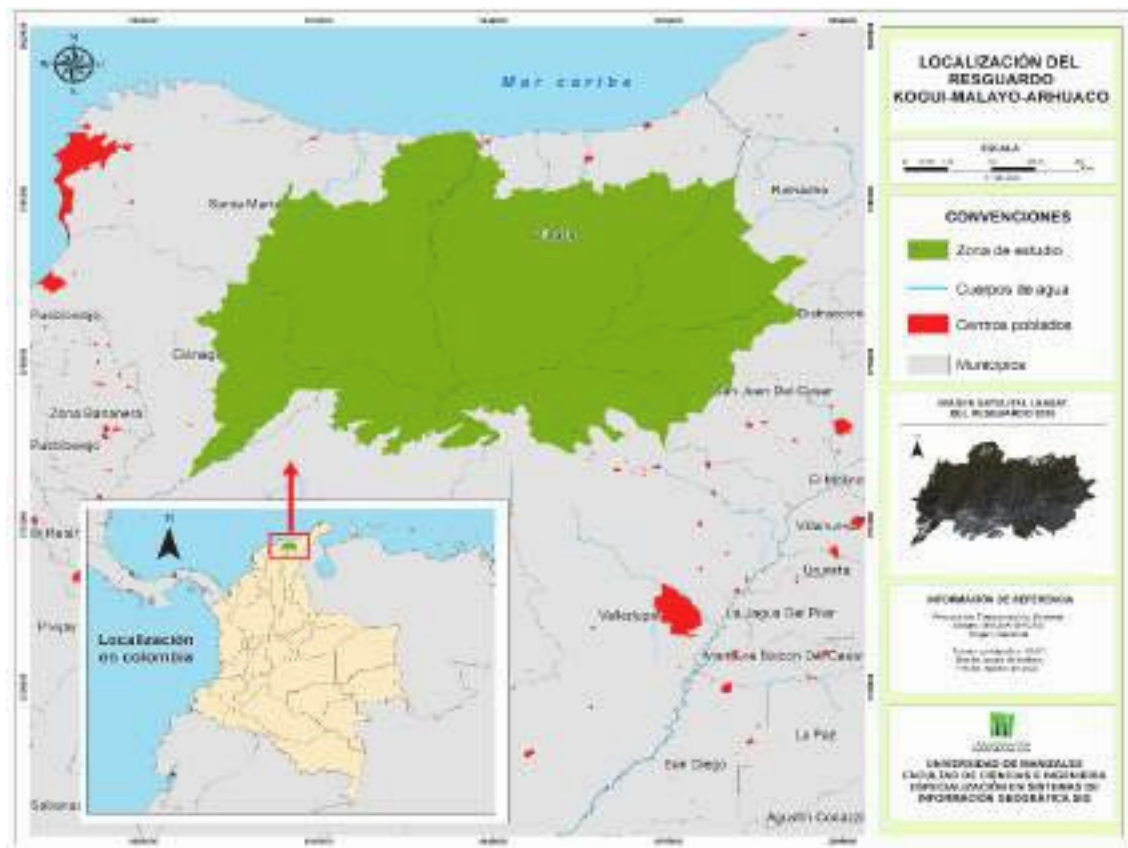
COBERTURA	IMAGEN
3.1.1. Bosque denso	
3.1.3.2. Bosque fragmentado con vegetación secundaria	
3.3.2. Afloramientos rocosos	
3.3.3. Tierras desnudas y degradadas	
3.3.5. Zonas glaciares y nivales	

Fuente: Elaboración propia

Para el criterio de selección de las imágenes se tuvo en cuenta que las fechas correspondieran a meses de época seca con el fin de garantizar que la cobertura de nubes fuera baja, que fueron entre el 6 y 25%. Sin embargo, es importante señalar que en el área de estudio la nubosidad tiende a ser considerable a lo largo de todo el año; esto también incidió en la selección de los años para el estudio, ya que se usaron estas fechas por corresponder a las imágenes que se identificaron con menor cobertura de nubes.

Luego de haber descargado y organizado la información de las imágenes, se procedió a realizar la composición de bandas con el fin de unir las bandas espectrales de las imágenes en un solo listado por cada Path/Row por año como se mencionó anteriormente en la Tabla 2. Con esto se realizó un mosaico, esto es, la unión de las tres imágenes para cada fecha, para así poder realizar el recorte de la zona de estudio, es decir, la delimitación del área correspondiente al resguardo como se evidencia en la Figura 13

Figura 13: Zona de estudio

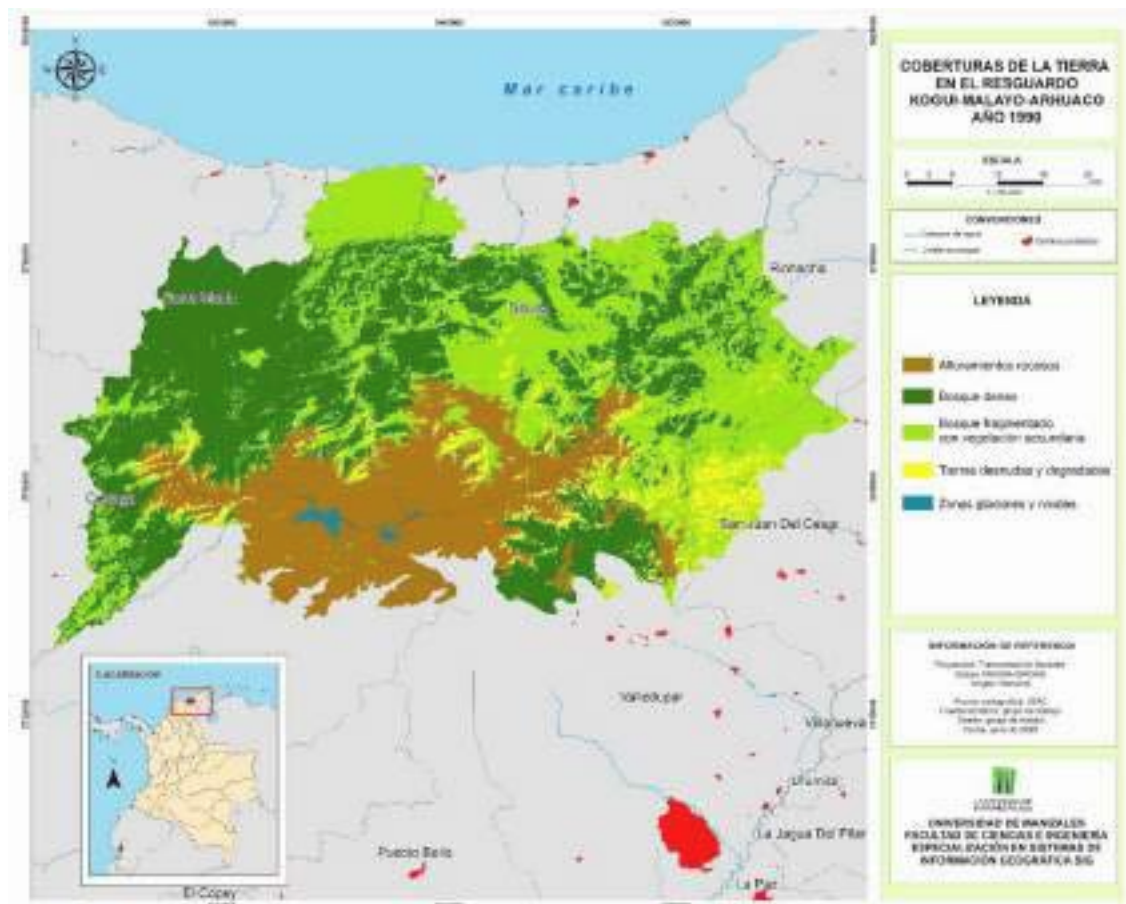


Fuente: Elaboración propia

8.1.1. Mapa de cobertura para el año 1990.

Las coberturas de la tierra en el resguardo indígena Kogui-Malayo-Arhuaco para el año 1990, evidencia una predominancia del bosque denso ocupando un 37%, seguido por áreas de bosque fragmentado con vegetación secundaria con un 36% y finalmente, las zonas glaciares y nivales ocupan una porción muy reducida correspondiente al 0,34%.

Figura 14: Mapa de coberturas del año 1990



Fuente: Elaboración propia

Figura 15: Área de la cobertura para el año 1990

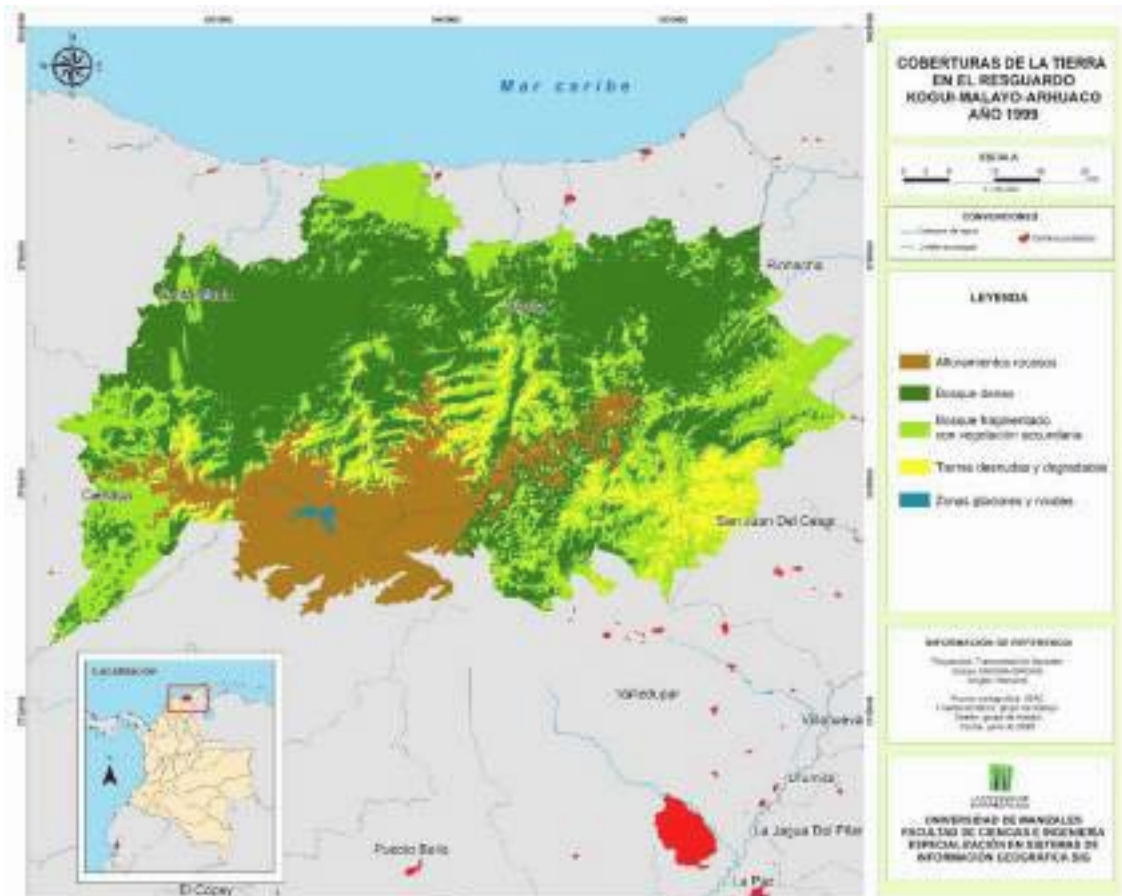
Fuente: Elaboración propia

Para el año de inicio del análisis se evidencia predominancia de las coberturas de bosque las cuales cubren más 73% del área de estudio. En donde la cobertura de bosque denso representa el 49 % localizándose principalmente en la zona noroccidental. Las zonas glaciares para el año 1990 correspondía 1428 ha principalmente sobre los picos Colon y Bolívar. En cuanto a afloramientos rocosos fueron delimitados en una superficie de 86147 ha. Las superficies de tierras desnudas y degradadas cubrían más de 20779 ha.

8.1.2. Mapa de cobertura para el año 1999.

Para el año 1999 se refleja una disminución considerable del área glaciario identificándose un área de 752 ha correspondiente al 0,18% y simultáneamente un aumento del área de afloramientos rocosos del 16%. La cobertura de bosque denso evidencia una disminución abarcando el 47 % principalmente en la zona noroccidental, lo que conlleva a un incremento del área de bosques fragmentados producto del aumento de la frontera agrícola. Las superficies de tierras desnudas y degradadas aumento a 32618 ha lo que significa el 7%.

Figura 16: Mapa de cobertura para 1999



Fuente: Elaboración propia

Figura 17: Relación de coberturas para 1999

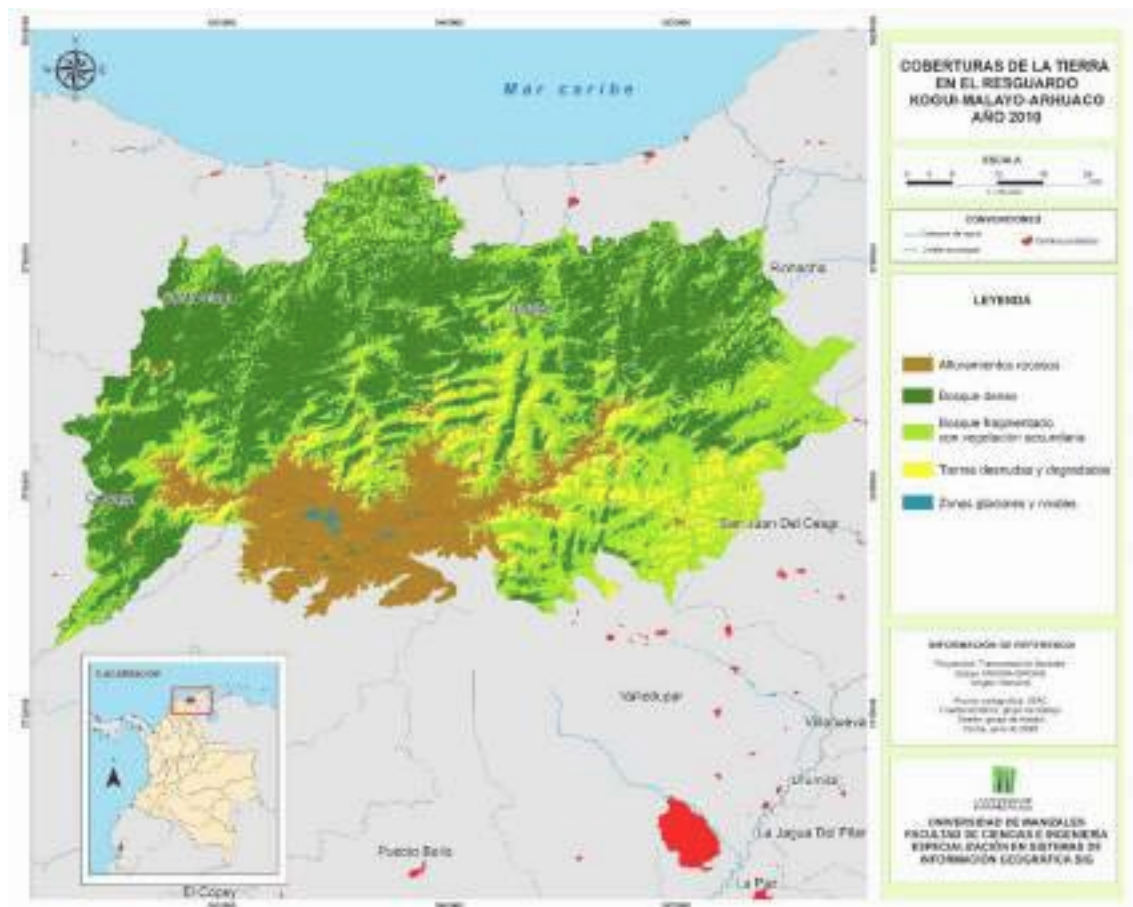


Fuente: Elaboración propia

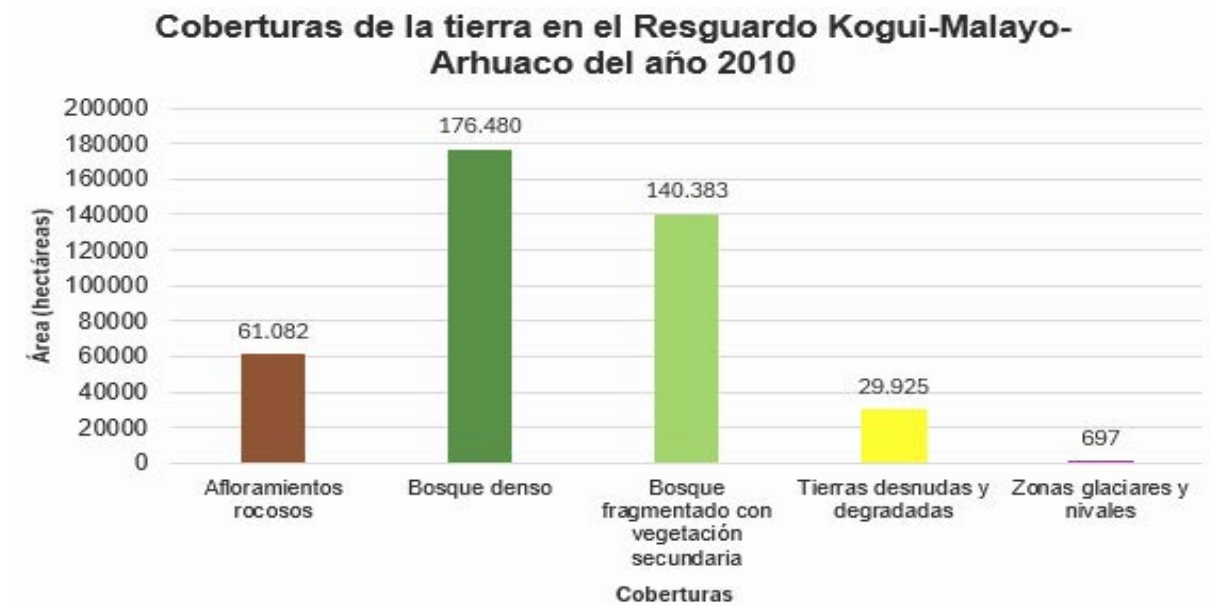
8.1.3. Coberturas para el año 2010.

En el análisis realizado para el año 2010 se continúa evidenciando la tendencia en la disminución del área glaciaria identificándose un área de 697 representando un 0,17% asociada a los efectos del cambio climático, lo que conlleva a que evidencie un aumento del área de afloramientos rocosos en las zonas donde anteriormente se encontraban fragmentos de glaciar. La cobertura de bosque denso evidencia una disminución abarcando el 43 % ligado al aumento del área de bosques fragmentados en 140318 ha y las superficies de tierras desnudas y degradadas aumentó a 7.3% del total de las coberturas naturales.

Figura 18: Mapa de cobertura para el año 2010



Fuente: Elaboración propia

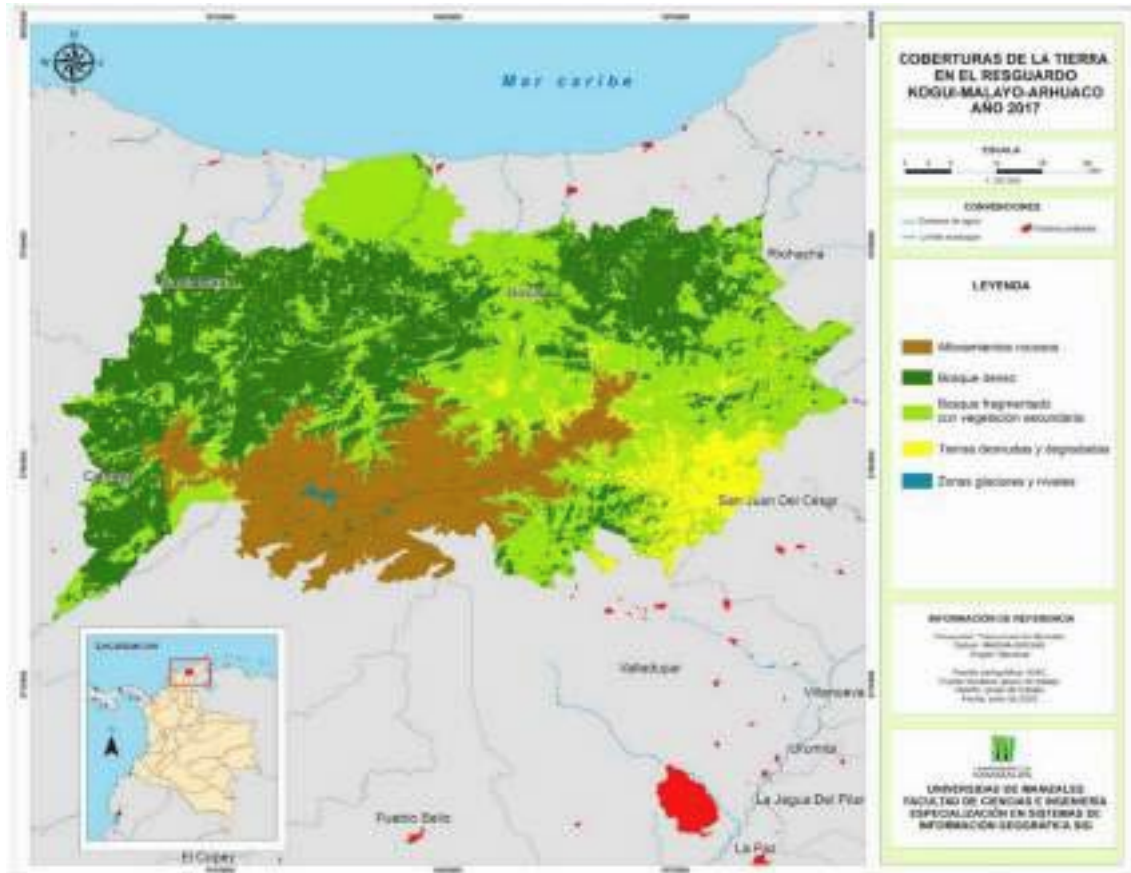
Figura 19: *Relación de coberturas para 2010*

Fuente: Elaboración propia

8.1.4. Mapa de Coberturas para el año 2017.

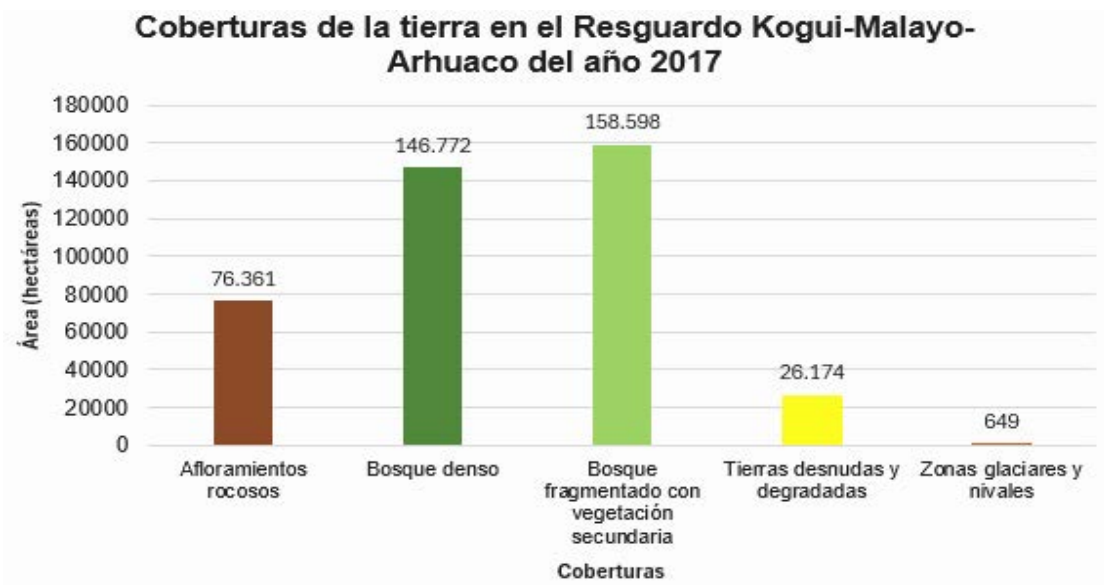
Los cambios evidenciados en las coberturas en el 2017 fueron incididos considerablemente por el fenómeno del niño presentado en el 2016. Principalmente se continuó evidenciando la disminución del área glacial identificándose un área de 649 ha ocupado un 0.15%, paralelamente un aumento del área de afloramientos rocosos corresponde al 14% en las zonas donde anteriormente se encontraban fragmentos de glaciario. La cobertura de bosque denso lo conforma un 35% siendo remplazada por bosques fragmentados con vegetación secundaria de un 38% y las superficies de tierras desnudas y degradadas aumento en un 7% considerablemente en la zona suroriental del resguardo dentro del cesar y la guajira asociada actividades de ganadería.

Figura 20: Mapa de coberturas para el año 2017



Fuente: Elaboración propia

Figura 21: Relación de coberturas para 2017

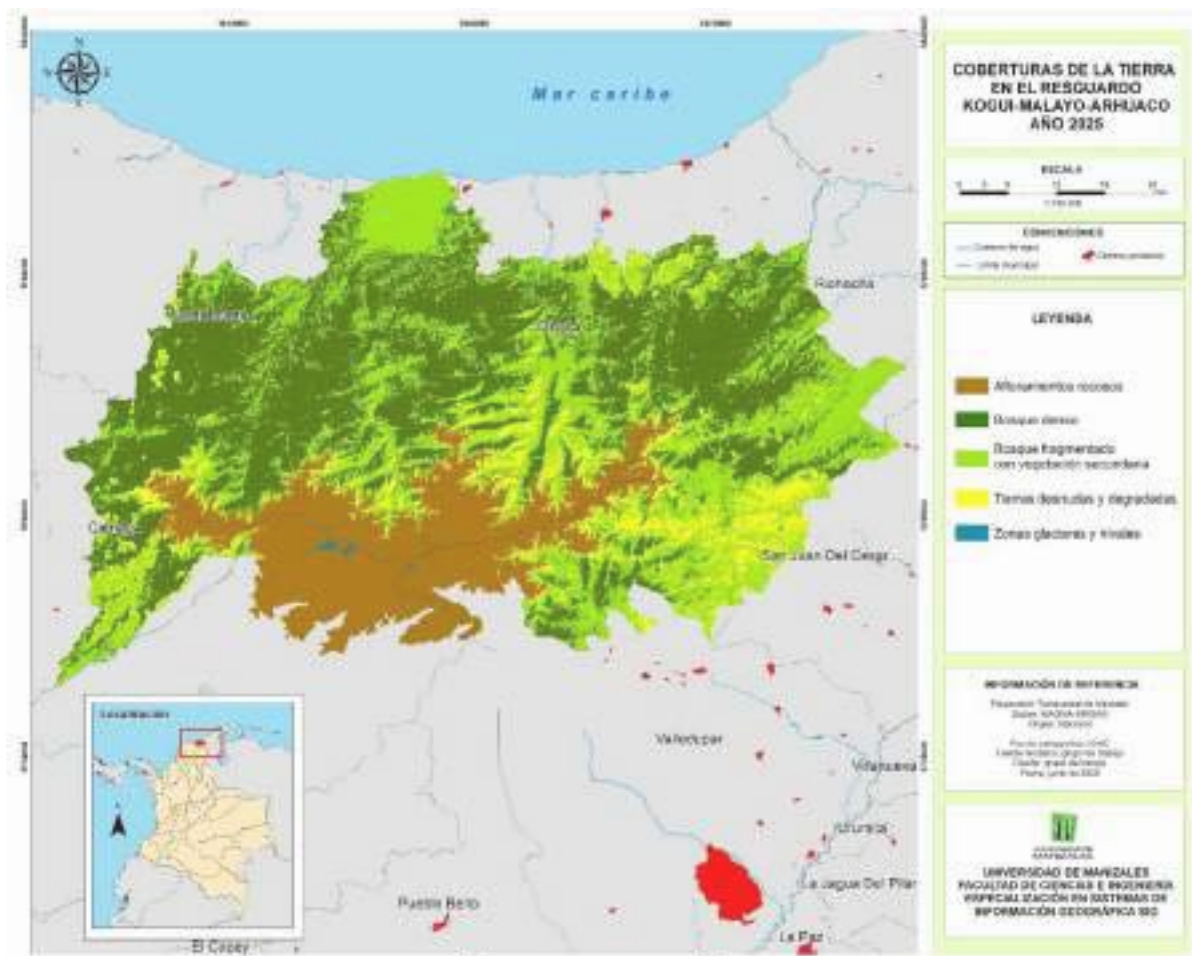


Fuente: Elaboración propia

8.1.5. Mapa Cobertura para el año 2025.

La clasificación de coberturas realizada para la imagen del 2025 evidencia la cifra más baja del área glaciaria identificándose un área 373 ha ocupado un 0.09%, lo cual concuerda con el último reporte generado por el IDEAM en donde advierte que en Colombia solo quedan aproximadamente 30,83 km² de superficie glaciaria, una cifra que evidencia los impactos del calentamiento global. El aumento del área de afloramientos rocosos continuó evidenciándose en las zonas donde anteriormente se encontraban fragmentos de glaciario con un 17%. La cobertura de bosque denso se mantuvo relativamente estable en un 40%, de igual forma la cobertura de bosques fragmentados con vegetación secundaria corresponde a un 33%. El área identificada de las superficies de tierras desnudas y degradadas fue de 32213 ha representado 7.8%.

Figura 22: Mapa de Cobertura para el año 2025



Fuente: Elaboración propia

Figura 23: *Relación de coberturas para 2025*

Fuente: Elaboración propia

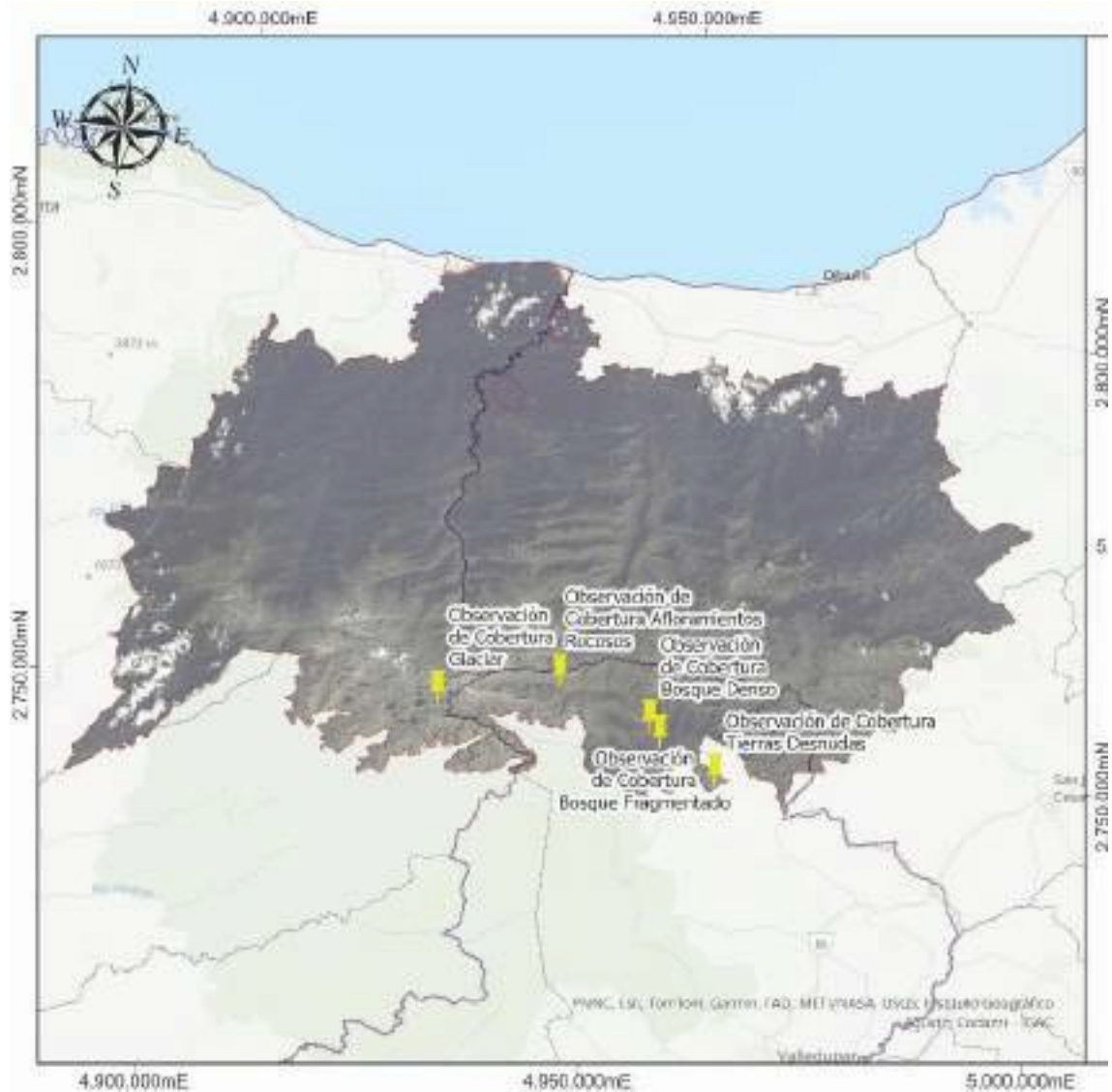
Con el objetivo de evidenciar en campo y contrastar las coberturas identificadas para el último año de estudio (2025), realizamos un recorrido dentro del resguardo indígena. Específicamente sobre la cuenca alta del río Guatapurí donde habitan miembros del pueblo kogui. Donde se pudo evidenciar los cambios en disminución de la cobertura de bosque denso, el aumento de la cobertura de bosques fragmentado producto del desarrollo de actividades de subsistencia propias de las comunidades asentadas en la cuenca del río, para la cobertura de glaciar se pudo evidenciar desde la lejanía el casquete glaciar situado en la cumbre del pico Colon, Bolívar y pico la reina. En cuanto a las tierras degradadas se identificó en la zona habitada por la comunidad wiwa, sobre la cuenca media del río Badillo en proximidad a la comunidad de Atanquez. El área del resguardo sobre la cual se evidenciaron las coberturas está ubicada al norte del municipio de Valledupar en proximidad con el resguardo indígena kankuamo.

Tabla 6: *Imágenes de referencia de tipos de cobertura*

Cobertura	Verificación en Campo de Coberturas Imagen	Localización
<p>3.1.1. Bosque denso: La cobertura de bosque identificada sobre la cuenca alta del río Guatapurí pertenece a Bosque alto Andino Humedo entre los 2000 y 3300 m.s.n.m</p>		<p>Latitud: 2750973,27 Longitud: 4953430,96</p> <p>Fotografía tomada durante recorrido realizado en la cuenca alta del río Guatapurí</p>
<p>3.1.3.2. Bosque fragmentado con vegetación secundaria: Cobertura integrada por cultivos de café, caña y cultivos de Pancoger aledaños a la rivera del río Guatapurí</p>		<p>Latitud: 2749374,32 Longitud: 4954764,72</p> <p>Fotografía tomada durante recorrido realizado en la cuenca alta del río Guatapurí</p>
<p>3.3.2. Afloramientos rocosos. Son suelos desprovistos con escasa o nula vegetación, característica propia de las formaciones montañosas de la sierra nevada de Santa Marta a altitudes superiores a 3500 msnm. Característica propia de la zona aledaña a los glaciares y lagunas.</p>		<p>Latitud: 2754978,92 Longitud: 4942646,90</p> <p>Fotografía tomada durante recorrido realizado en la cuenca alta del río Guatapurí</p>
<p>3.3.3. Tierras desnudas y degradadas. Característica propia de suelo situados en las</p>		<p>Latitud: 2745788,21 Longitud: 4961497,25</p>

Verificación en Campo de Coberturas		
Cobertura	Imagen	Localización
partes más bajas del resguardo donde se desarrolla actividades asociadas a la ganadería.		Fotografía tomada en cercanías a la comunidad de Rongoy perteneciente al pueblo wiwa
3.3.5. Zonas glaciares y nivales. Fragmento de glaciar observado sobre el picón colon y bolívar, las montañas litorales de mayor altura		<p>Latitud: 2751394,90</p> <p>Longitud: 4929104,22</p> <p>Fotografía tomada en la cuenca alta del rio Guatapurí cerca a la laguna Nabova, sitio sagrado de los pueblos indígenas de la sierra Nevada de santa marta</p>

Fuente: Elaboración propia

Figura 24: *Mapa de Validación de Coberturas en Campo*

Fuente: Elaboración propia

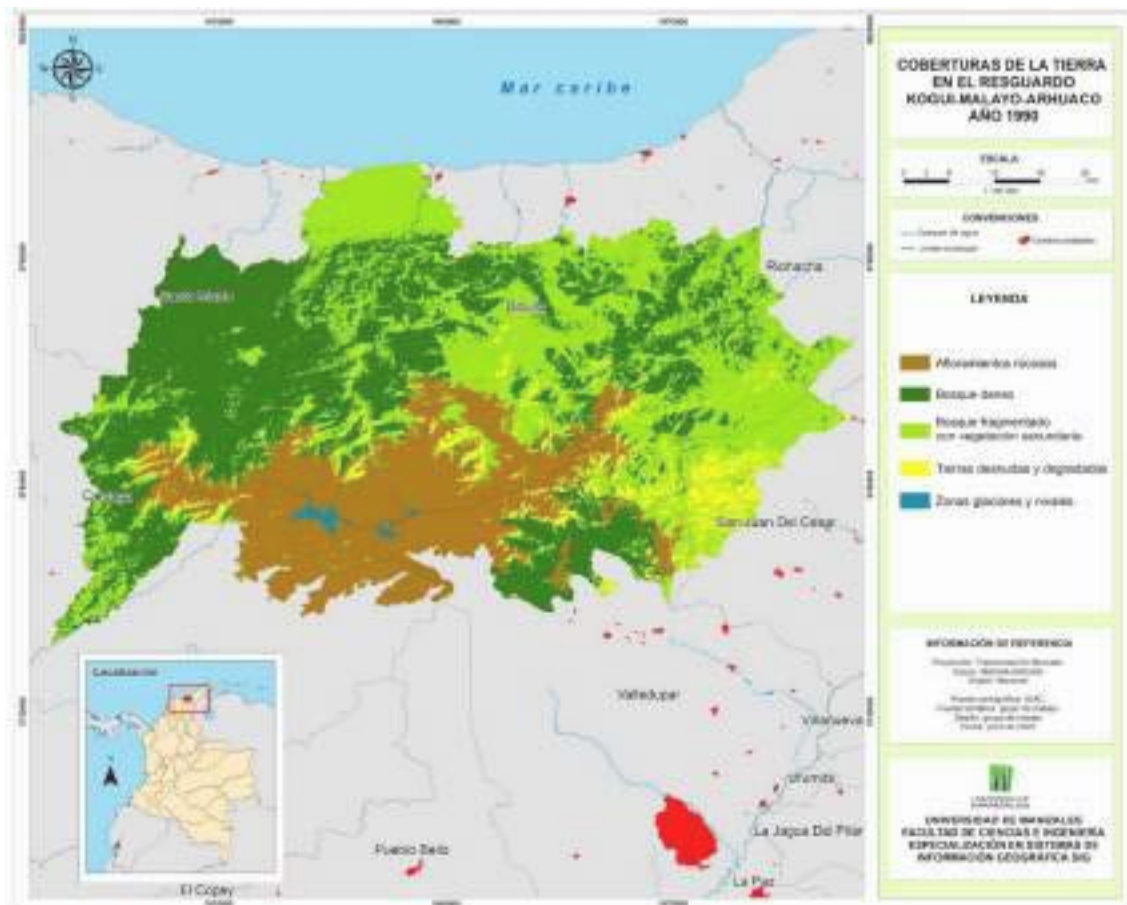
8.2. Comparación de las Coberturas en diferentes periodos

En este segundo objetivo se compararon las coberturas de los años seleccionados con el fin de identificar los cambios acontecidos. Esto se realiza en el software SIG ArcGIS PRO. Como muestra de avance se tiene la generación de un índice de vegetación normalizado en el software mencionado, para la imagen del año inicial 1990 y el año final 2025. El procesamiento para el cálculo del índice de vegetación toma en cuenta la información de la banda del rojo y del infrarrojo térmico de las imágenes, ya que en la banda del infrarrojo es donde la vegetación presenta mayor reflectancia, mientras que en la banda del rojo es en donde refleja menos. Esta diferencia en la

reflectancia arroja un índice que permite identificar las zonas con mayor y menor densidad de cobertura vegetal. Esto también es una herramienta importante para el análisis de los cambios en las coberturas. A continuación, se muestra el resultado del índice de vegetación, categorizado en varias clases de acuerdo con la densidad de la vegetación para el año inicial y final.

Puede observarse que las zonas con mayor densidad de vegetación disminuyen considerablemente con respecto al año final, lo que indica que las coberturas de bosques han perdido densidad y área con el paso del tiempo. Es necesario realizar un cálculo del área para cada uno de años seleccionados, con el fin de dar una mejor descripción de los cambios identificados.

Figura 25: Índice de vegetación, categorizado en varias clases de acuerdo con la densidad de la vegetación para el año inicial y final.



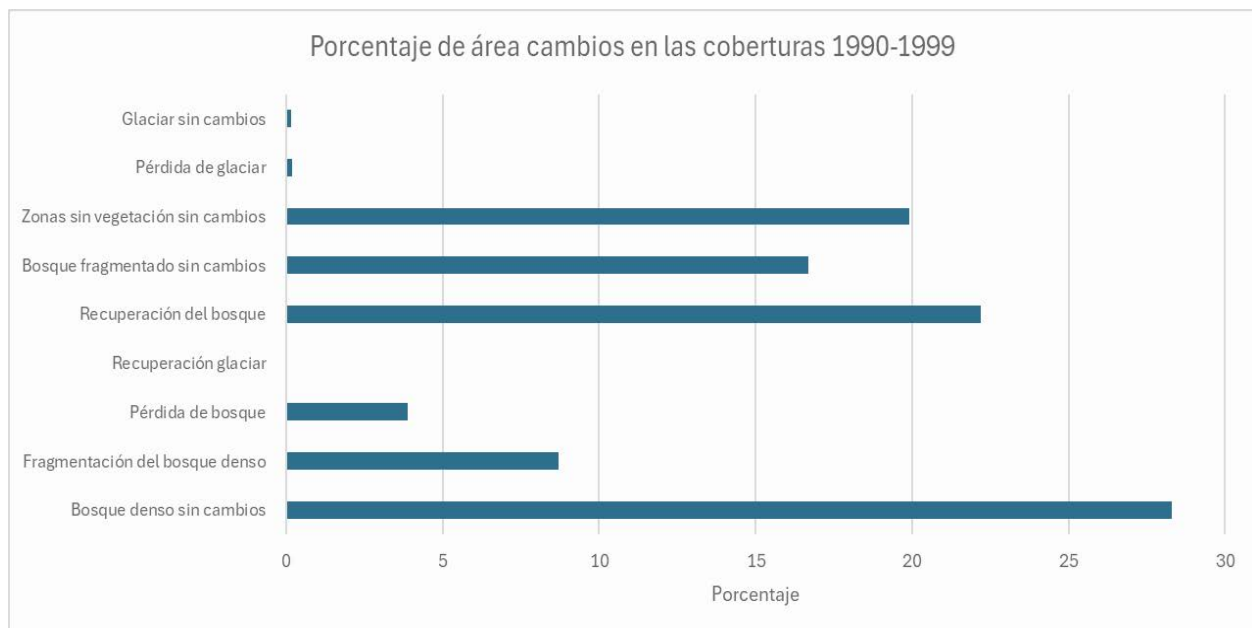
Fuente: Elaboración propia

8.3. Análisis de cambios en las coberturas de la tierra en el Resguardo Kogui–Malayo–Arhuaco

8.3.1. *Período 1990-1999*

Entre 1990 y 1999, el resguardo Kogui–Malayo–Arhuaco experimentó variaciones significativas en la cobertura de su territorio. La categoría con mayor representación corresponde al bosque denso sin cambios, con una cobertura de 115.460 hectáreas, equivalente al 28,28 % del área total analizada. Esta cifra indica que, a pesar de los procesos de transformación, una proporción considerable del bosque original se mantuvo estable durante el periodo.

Figura 26: *Porcentaje de área cambios en las coberturas 1990 a 1999*



Fuente: Elaboración propia

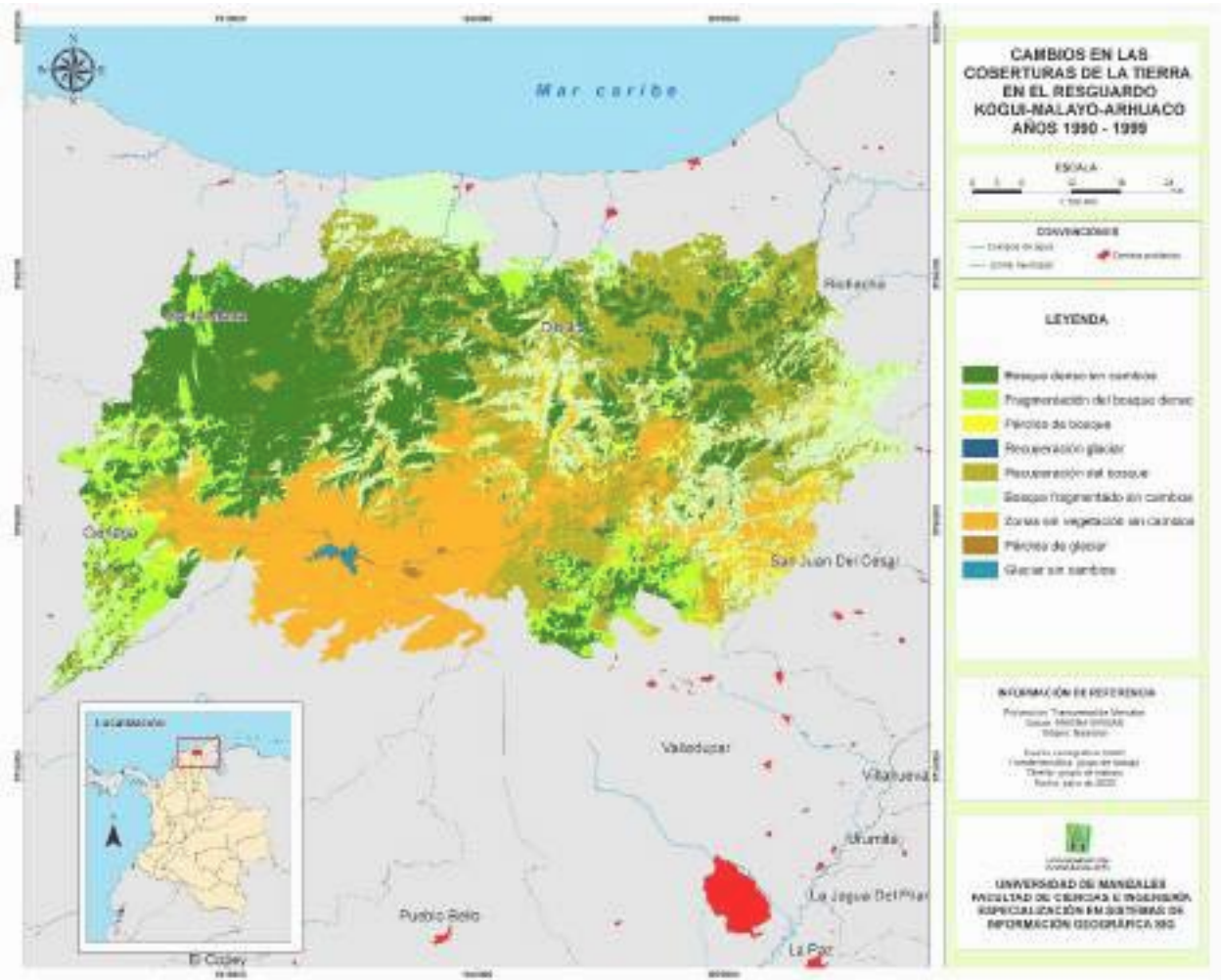
Un segundo grupo relevante lo constituyen las áreas de recuperación del bosque, que abarcan 90.533 hectáreas, es decir, el 22,18 % del total. Esto sugiere que en algunos sectores se registraron dinámicas de regeneración natural o reforestación, posiblemente asociadas a prácticas de manejo tradicional, abandono de zonas previamente intervenidas o a procesos ecológicos espontáneos.

Por otro lado, las zonas sin vegetación que no presentaron cambios ocupan el 19,91 % del territorio. Este valor representa áreas que históricamente han carecido de cobertura vegetal densa, como zonas de alta montaña, suelos degradados o áreas naturalmente desprovistas de vegetación arbórea. A estas se suman los bosques fragmentados sin cambios, que representan el 16,67 %, indicando la persistencia de coberturas forestales con estructura interrumpida, posiblemente por intervención humana o características topográficas.

En cuanto a los procesos de degradación, la fragmentación del bosque denso afecta al 8,71 % del área, mientras que la pérdida total de cobertura boscosa representa un 3,87 %. Estas cifras, aunque menores en proporción frente a las de conservación y recuperación, advierten sobre la presión a la que han estado sometidos ciertos sectores del territorio.

Las coberturas glaciares representan una proporción muy baja. La pérdida de glaciar y los glaciares sin cambios ocupan apenas el 0,17 % del área cada uno, mientras que la recuperación glaciar es prácticamente marginal, con solo el 0,01 %. Esta información concuerda con las tendencias generales de retroceso glaciar observadas en otras zonas de alta montaña de Colombia y puede estar asociada a los efectos del cambio climático.

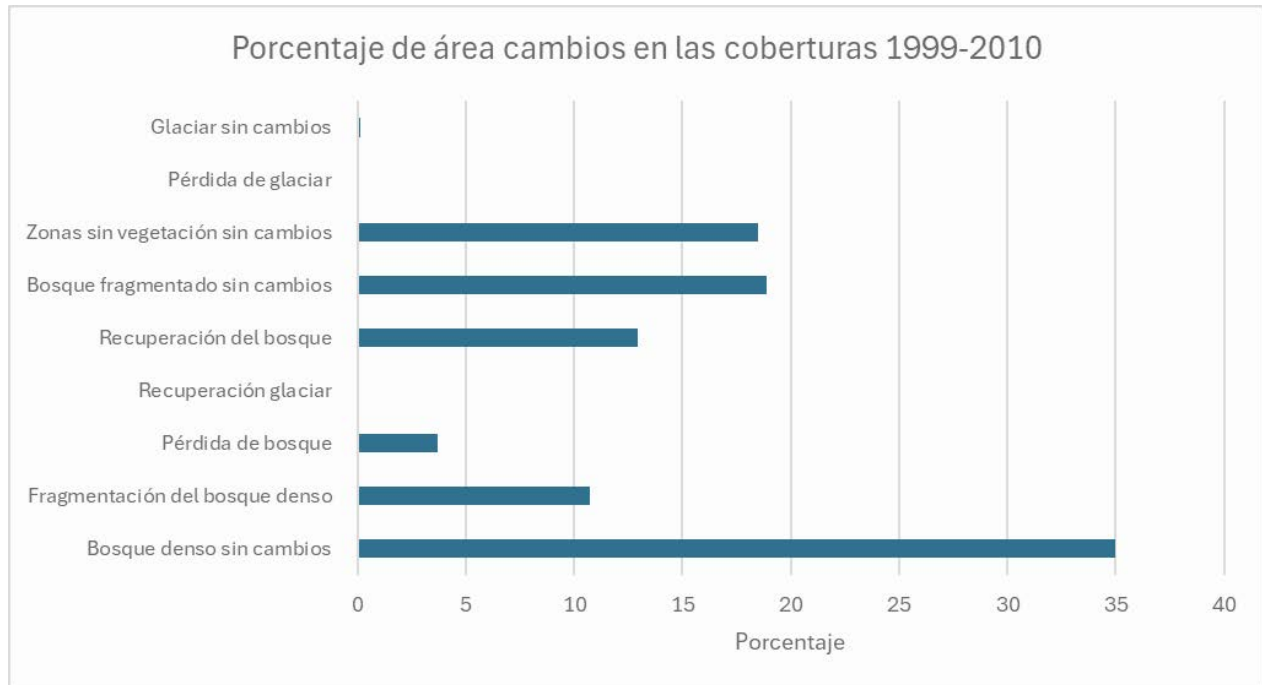
En conjunto, los datos indican un escenario mixto, en el que coexisten dinámicas de conservación, recuperación y pérdida de coberturas. La presencia significativa de áreas recuperadas y estables sugiere cierto equilibrio en la estructura ecológica del territorio, aunque las señales de fragmentación y pérdida invitan a considerar medidas de monitoreo y manejo que garanticen la sostenibilidad del paisaje a largo plazo.

Figura 27: Porcentaje de área cambios en las coberturas 1990 a 1999

Fuente: Elaboración propia

8.3.2. *Período 1999-2010*

Entre 1999 y 2010, el resguardo Kogui–Malayo–Arhuaco conservó una proporción significativa de su cobertura forestal original. El bosque denso sin cambios se consolidó como la categoría dominante, con 142.833 hectáreas, lo que representa el 34,99 % del área total. Este dato contrasta positivamente con el periodo anterior, en el que esta cobertura era inferior, y sugiere una menor presión o una gestión más efectiva del territorio en estos años.

Figura 28: Porcentaje de área cambios en las coberturas 1999 a 2010

Fuente: Elaboración propia

La fragmentación del bosque denso afectó al 10,71 % del área (43.748 ha), lo que indica una pérdida parcial de conectividad ecológica, posiblemente asociada a actividades humanas dispersas o a la expansión paulatina de usos del suelo no forestales. En comparación con la pérdida directa de bosque, esta fragmentación resulta más extensa: solo el 3,72 % del territorio (15.193 ha) sufrió deforestación total. Esta diferencia sugiere que en gran parte del resguardo los procesos de alteración del bosque fueron graduales, no necesariamente conduciendo a la pérdida completa de la cobertura vegetal.

La recuperación del bosque, aunque menos representativa que en el periodo 1990–1997, se mantuvo con una participación del 3,72% (15.193 ha). Esto podría reflejar tanto la capacidad regenerativa del ecosistema como la reducción de ciertas actividades extractivas o agrícolas en zonas anteriormente intervenidas. La recuperación, aunque moderada, se convierte en un indicador positivo dentro del balance general.

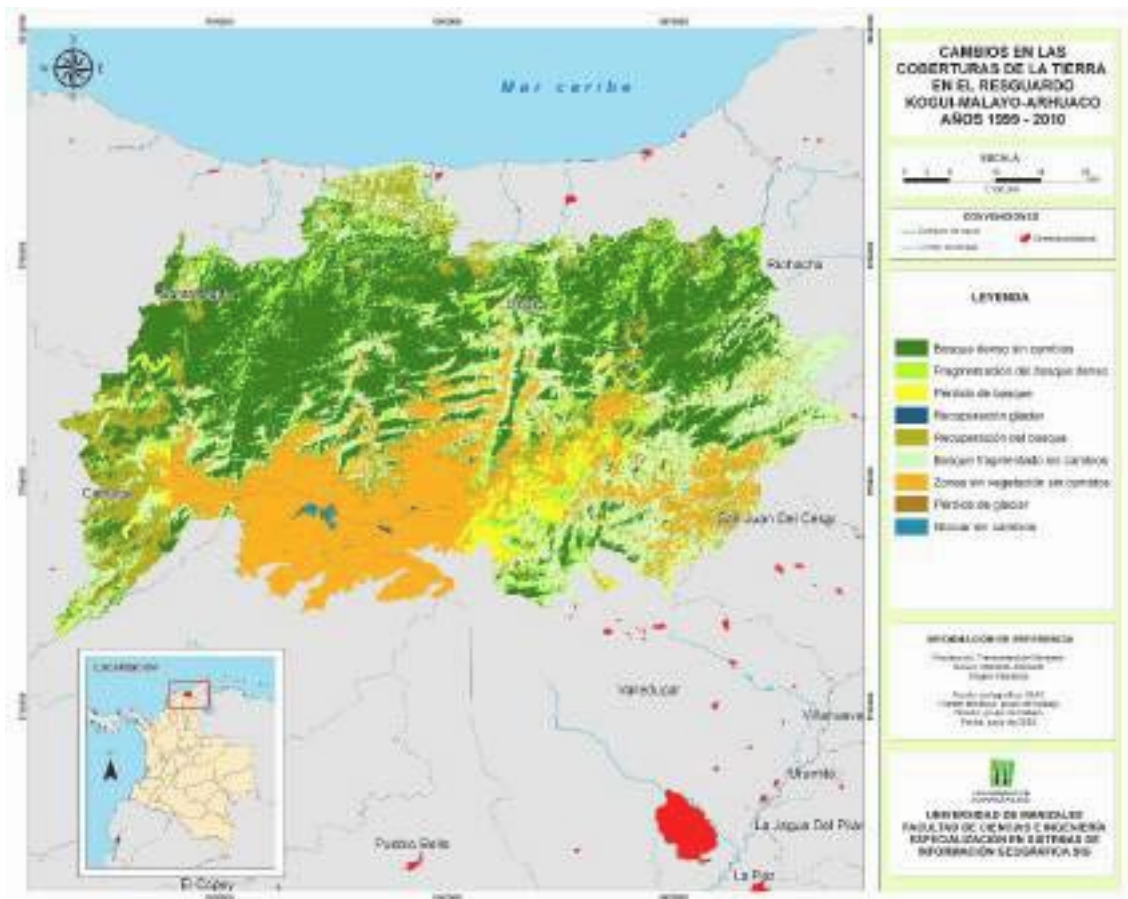
Por su parte, las zonas sin vegetación sin cambios y los bosques fragmentados sin cambios ocupan conjuntamente más del 37 % del territorio, mostrando la permanencia de extensas áreas con estructuras vegetales poco densas o con cobertura interrumpida. Estas zonas podrían

corresponder a sectores de alta montaña, suelos erosionados o áreas que han mantenido un uso intensivo del suelo sin grandes modificaciones recientes.

En cuanto a los ecosistemas glaciares, los datos siguen reflejando su condición crítica. La pérdida de glaciar y los glaciares sin cambios representan apenas un 0,17 % cada uno. La recuperación glaciar es prácticamente inexistente, lo que concuerda con las tendencias de reducción glaciar observadas en la Sierra Nevada de Santa Marta y otras cordilleras del país, atribuibles en gran medida al calentamiento global.

En síntesis, el periodo 1999–2010 muestra un escenario en el que predominan la estabilidad y conservación de coberturas naturales, acompañado por una reducción en las tasas de pérdida forestal. Sin embargo, la persistencia de fragmentación y la escasa recuperación de zonas clave, como los glaciares, plantean desafíos importantes para el manejo integral del territorio.

Figura 29: Mapa de cambios en las coberturas 1990 a 1999



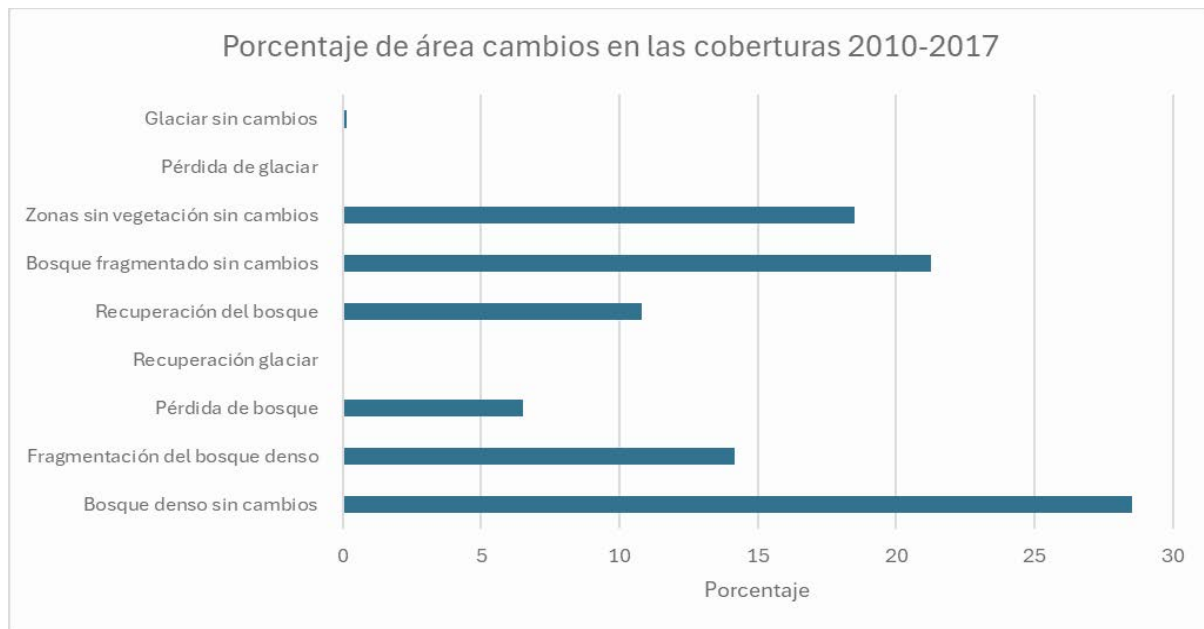
Fuente: Elaboración propia

8.3.3. *Período 2010-2017*

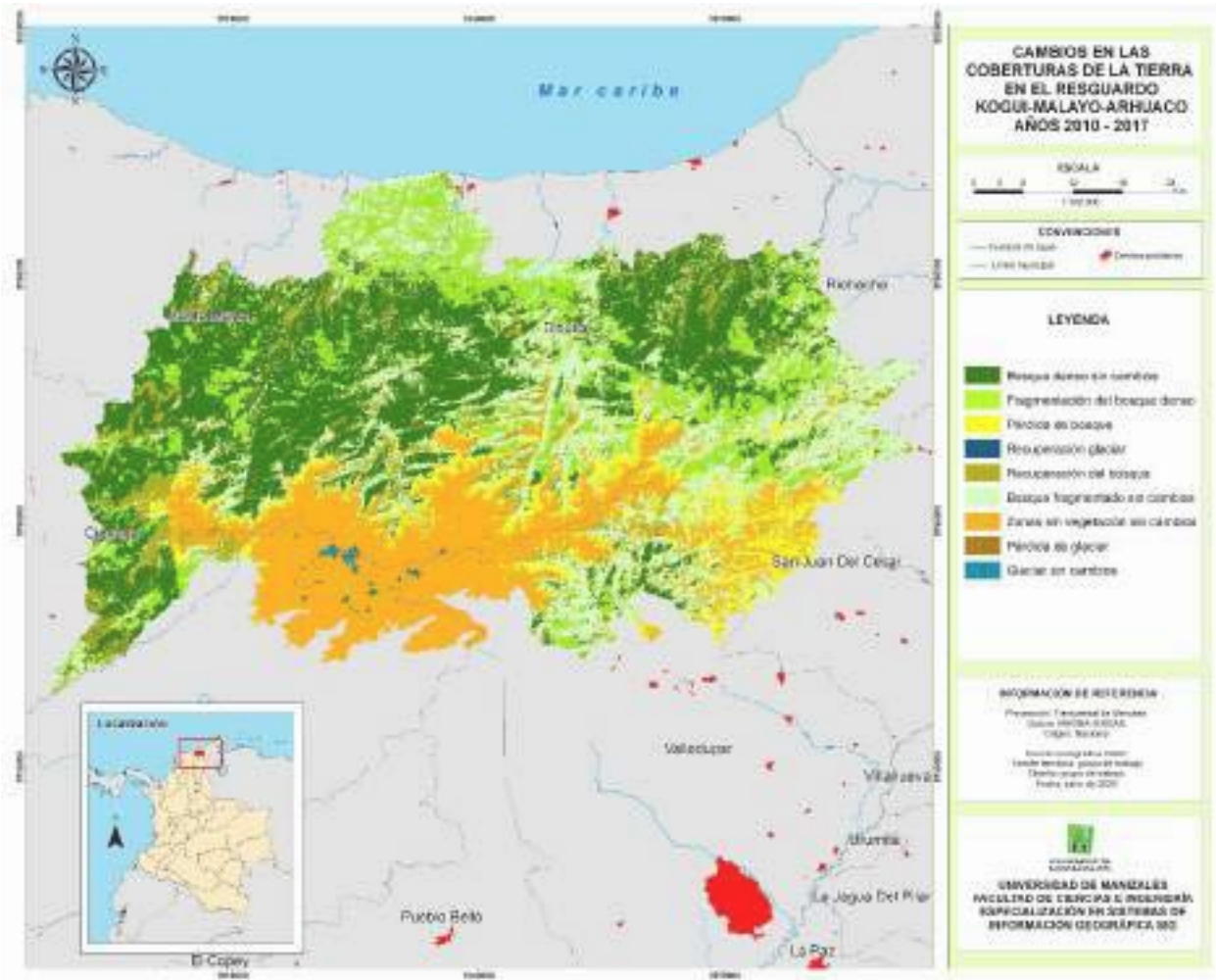
Durante el periodo 2010–2017, el resguardo Kogui–Malayo–Arhuaco conservó una porción importante de su cobertura original. El bosque denso sin cambios se mantuvo como la categoría predominante, con 116.389 hectáreas, equivalentes al 28,51 % del área total, lo que refleja la estabilidad de amplias zonas de vegetación continua.

La fragmentación del bosque denso afectó 57.808 hectáreas (14,16 %), evidenciando un proceso significativo de pérdida de conectividad ecológica. Este valor supera al de la pérdida de bosque, que sumó 26.596 hectáreas (6,51 %), lo que indica que en gran parte del territorio los cambios en la cobertura fueron graduales y no condujeron a la deforestación completa.

Figura 30: *Porcentaje de área cambios en las coberturas 2010 a 2017*



Fuente: Elaboración propia

Figura 31: Porcentaje de área cambios en las coberturas 2010 a 2017

Fuente: Elaboración propia

La recuperación del bosque cubrió 44.177 hectáreas (10,82 %), lo que sugiere procesos de regeneración en áreas previamente intervenidas, mientras que la recuperación glaciár fue mínima, con apenas 118 hectáreas (0,03 %), confirmando el estado crítico de estos ecosistemas.

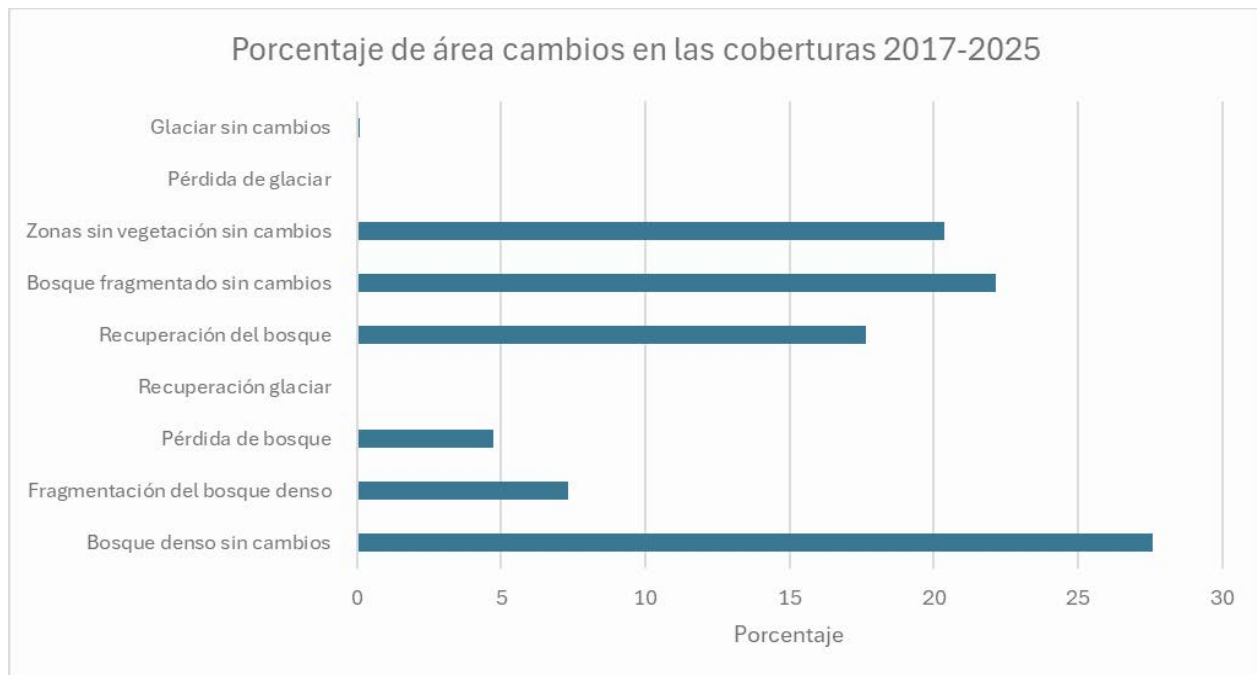
El bosque fragmentado sin cambios y las zonas sin vegetación sin cambios ocuparon 86.834 hectáreas (21,27 %) y 75.581 hectáreas (18,52 %), respectivamente, evidenciando la permanencia de extensas áreas con cobertura interrumpida o vegetación poco densa, posiblemente vinculadas a zonas montañosas y suelos erosionados.

En cuanto a los glaciares, la pérdida de glaciar alcanzó 171 hectáreas (0,04 %), superando al glaciar sin cambios, que se mantuvo en 526 hectáreas (0,13 %), en concordancia con la tendencia de retroceso asociada al cambio climático.

8.3.4. *Período 2017-2025*

El análisis de la dinámica de coberturas para el periodo 2017–2025 muestra que una parte considerable del resguardo mantuvo su vegetación original. El bosque denso sin cambios, con 112.721 hectáreas (27,61 %), sigue siendo el componente más representativo, consolidando la presencia de áreas con alta integridad ecológica.

Figura 32: *Porcentaje de área cambios en las coberturas 2017 a 2025*



Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, los procesos de transformación de la cobertura forestal no fueron uniformes. La fragmentación del bosque denso se presentó en 29.839 hectáreas (7,31 %), superando a la pérdida de bosque, que alcanzó 19.331 hectáreas (4,74 %). Esta diferencia evidencia que, aunque hubo intervención en la cobertura arbórea, gran parte de ella no llegó a convertirse en deforestación total, manteniendo cierto grado de vegetación y funcionalidad ecológica.

La recuperación del bosque alcanzó un área destacada de 71.988 hectáreas (17,63 %), lo que sugiere una capacidad de regeneración significativa, posiblemente vinculada a la reducción de actividades extractivas o a procesos naturales de recuperación. En contraste, la recuperación glaciaria fue prácticamente inexistente, con apenas 19 hectáreas (0,005 %), ratificando la vulnerabilidad de estos ecosistemas.

Las categorías bosque fragmentado sin cambios y zonas sin vegetación sin cambios abarcaron 90.492 hectáreas (22,17 %) y 83.188 hectáreas (20,38 %), respectivamente. Estas cifras reflejan la permanencia de amplias áreas con vegetación discontinua o escasa, asociadas a terrenos de alta montaña y suelos degradados.

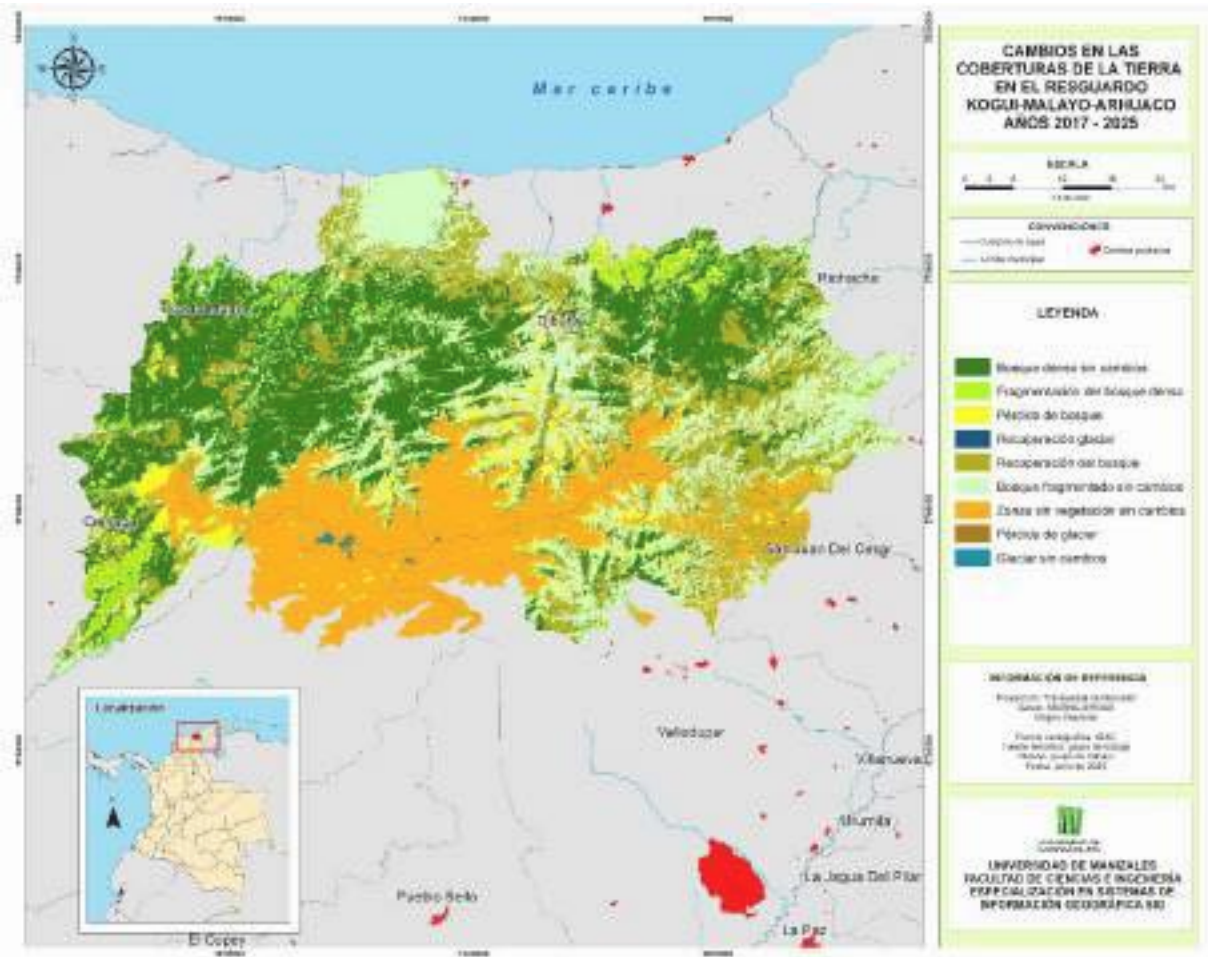
Finalmente, los glaciares continúan en retroceso: la pérdida de glaciaria sumó 291 hectáreas (0,07 %), superando al glaciario sin cambios, que se limitó a 354 hectáreas (0,09 %). Este comportamiento está alineado con la tendencia global de disminución de las masas glaciares.

En conjunto, el periodo 2017–2025 evidencia un balance en el que predomina la estabilidad de la cobertura forestal y una recuperación apreciable, aunque los procesos de fragmentación y pérdida, sumados a la crítica situación de los glaciares, continúan representando retos para la conservación integral del territorio.

El análisis de la dinámica de coberturas entre 1990 y 2025 evidencia transformaciones importantes en la estructura del paisaje del resguardo. El bosque denso sin cambios, aunque sigue siendo la categoría más amplia, muestra una tendencia descendente: pasó de superar el 35 % del área en 1999 a situarse en torno al 28 % en 2017–2025, lo que refleja una reducción progresiva de superficies de vegetación continua.

La fragmentación del bosque denso tuvo fluctuaciones marcadas: tras alcanzar su máximo en 1999–2010 (alrededor del 11 %), disminuyó a valores cercanos al 7 % en 2017–2025, sugiriendo una menor presión sobre la conectividad del bosque. Sin embargo, la pérdida de bosque, que se mantuvo entre el 3 % y 6 %, confirma que la deforestación continúa afectando áreas críticas.

Un cambio notable se observa en la recuperación del bosque, que pasó de representar cerca del 12 % en 1990–1999 a un 22 % en 2010–2017, antes de estabilizarse alrededor del 17 % en 2017–2025. Este incremento indica procesos de regeneración más activos en las últimas décadas, posiblemente relacionados con reducción de actividades extractivas y regeneración natural.

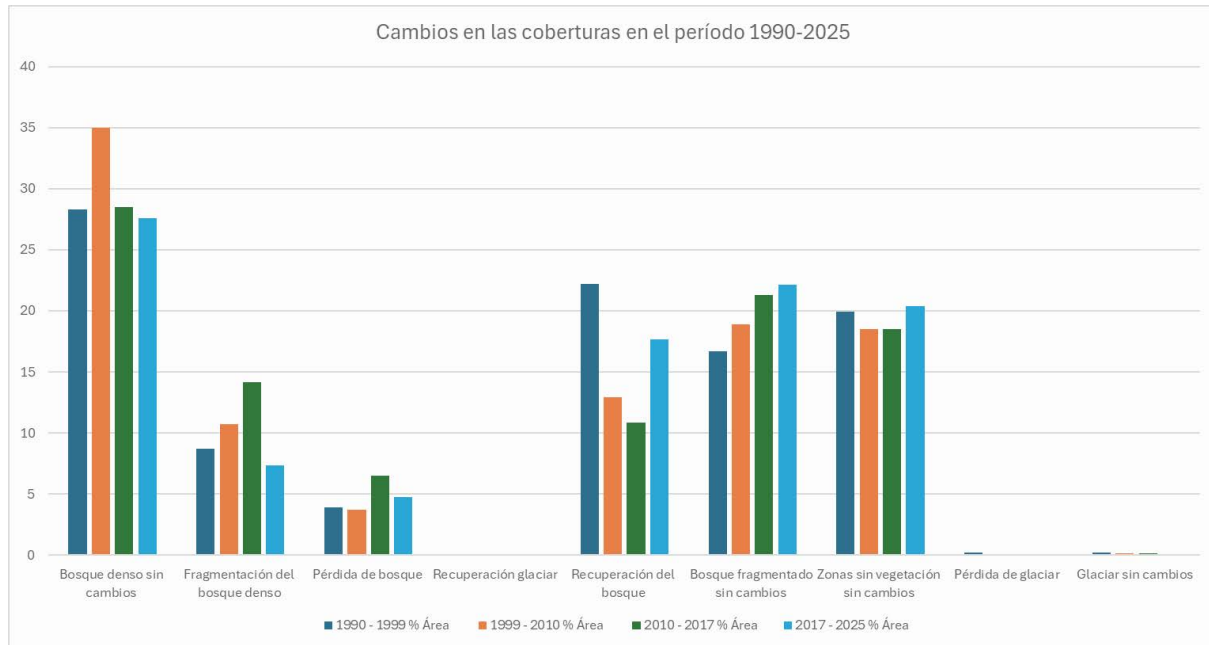
Figura 33: Mapa cambios en las coberturas 2017 a 2025

Fuente: Elaboración propia

Las categorías bosque fragmentado sin cambios y zonas sin vegetación sin cambios se han mantenido relativamente estables, oscilando entre el 20 % y 23 %, reflejando la persistencia de áreas con vegetación discontinua o limitada.

En lo que respecta a los glaciares, tanto la pérdida de glaciar como el glaciar sin cambios representan porcentajes mínimos, inferiores al 0,1 %, pero evidencian un retroceso continuo a lo largo de todo el periodo, en línea con la tendencia global de disminución de masas glaciares.

En conjunto, los datos muestran una disminución progresiva del bosque denso y un aumento de la recuperación forestal, con una fragmentación que, aunque sigue presente, se ha reducido. No obstante, la persistencia de la pérdida forestal y la reducción glaciar plantean desafíos para la conservación de los ecosistemas y la conectividad del paisaje.

Figura 34: Porcentaje de área cambios en las coberturas 1990 a 2025

Fuente: Elaboración propia

8.3 Evaluación de las tendencias y patrones de COBERTURA a lo largo del período de estudio, identificando posibles factores socioambientales que influyen en dichos cambios.

El análisis reveló dinámicas de transformación significativas en varias coberturas del territorio del Resguardo Kogui-Malayo-Arhuaco a lo largo del período 1990–2025. Estas transformaciones reflejan tanto presiones antrópicas como procesos naturales, en un contexto territorial influido por factores ambientales, culturales y socioeconómicos.:

Bosque denso. Presentó un crecimiento durante la primera década del estudio (1990–1999), posiblemente asociado a procesos de regeneración secundaria o a una disminución temporal de la presión antrópica. Sin embargo, a partir del año 2000, se observó una reducción sostenida hasta 2017, lo que podría explicarse por una mayor intensidad de actividades como la tala, la ampliación de la frontera agrícola o la minería informal. Hacia 2025 se identifica una recuperación parcial, lo que sugiere dinámicas alternantes de degradación y restauración, posiblemente vinculadas a prácticas de conservación impulsadas por las comunidades o instituciones gubernamentales.

Bosque fragmentado con vegetación secundaria. Este tipo de cobertura muestra un comportamiento oscilante: disminuyó entre 1990 y 1999, aumentó significativamente hasta 2017 y volvió a disminuir en el último periodo. Estas variaciones pueden estar asociadas a la sustitución del bosque denso por coberturas intermedias como la vegetación secundaria, como respuesta a perturbaciones antrópicas, seguidas por procesos de sucesión ecológica. La disminución reciente podría indicar nuevas presiones sobre estas áreas de transición ecológica.

Afloramientos rocosos. La reducción observada hasta 2010, seguida de una leve recuperación, puede interpretarse de dos maneras: como resultado de cambios reales en la cobertura vegetal que cubre estas áreas, o como un efecto de error de clasificación en zonas de transición entre formaciones rocosas y vegetación escasa. Este tipo de cambio es común en terrenos montañosos, donde la cobertura puede variar estacionalmente o por efectos climáticos extremos.

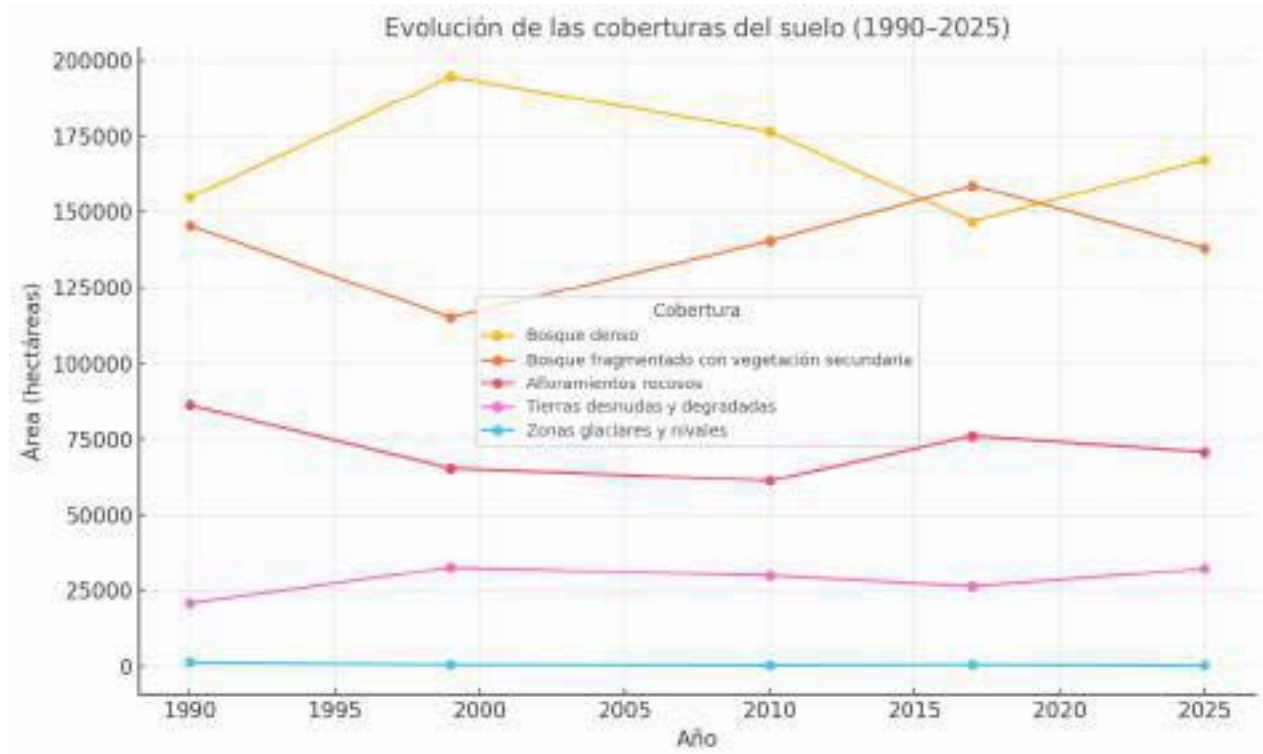
Tierras desnudas y degradadas. Se identificó un crecimiento continuo, que sugiere un proceso sostenido de pérdida de cobertura vegetal y deterioro físico del suelo. Este patrón es indicativo de fenómenos como erosión, sobrepastoreo o abandono de tierras agrícolas, así como del impacto acumulativo de actividades humanas y fenómenos climáticos extremos.

Zonas glaciares y nivales. La disminución constante y marcada de estas coberturas refleja un patrón claro de retroceso glaciar, consistente con múltiples estudios sobre los impactos del cambio climático en ecosistemas de alta montaña en Colombia. Este retroceso representa una pérdida significativa para los sistemas hidrológicos y culturales de las comunidades indígenas que habitan la Sierra Nevada.

Los datos cuantitativos indican un aumento neto en la cobertura de bosque denso (+12.371 ha), acompañado de una disminución en las zonas glaciares (-1.055 ha) y en los afloramientos rocosos (-15.357 ha). Por su parte, las tierras desnudas y degradadas registraron un incremento (+11.434 ha), lo cual resulta coherente con los procesos de deterioro progresivo del paisaje observados en estudios previos.

Estos resultados se ilustran en la Figura 35 que muestra la evolución temporal de cada cobertura:

Figura 35: Evolución de las coberturas del suelo en el Resguardo Kogui-Malayo-Arhuaco entre 1990 y 2025.



Fuente: Elaboración propia

La Tabla 7 resume los cambios netos acumulados en hectáreas para el periodo analizado:

Tabla 7: Cambios netos en el uso del suelo entre 1990 y 2025

Cobertura	Cambio Neto (1990 - 2025) Ha
Bosque denso	12371.2
Bosque fragmentado (c/vegetación secundaria)	-7432.5
Afloramientos rocosos	-15357.6
Tierras desnudas y degradadas	11433.8
Zonas Glaciares y nivales	-1054.5

Fuente: Elaboración propia

Estos resultados permiten identificar patrones de transformación espacial en el territorio y refuerzan la hipótesis de que las actividades humanas, como la expansión agrícola, la tala y los cambios de uso del suelo no planificados, han tenido una influencia directa en las coberturas. Asimismo, el retroceso glaciar registrado es consistente con los efectos del cambio climático

documentados en la región. La brecha social y la inequidad que se refleja en las grandes urbes del país y en otros entes territoriales de menor escala es evidente en los Parques Nacionales Naturales y en sus entornos municipales. Al menos el 63 % de quienes habitan estos espacios viven en la pobreza, y la incidencia de la pobreza multidimensional en los contextos municipales es en promedio de 51.4 %, siendo este factor más persistente en los contextos de los parques de tierras bajas y altas temperaturas.

Según la investigación de Patiño Y Coronado (2021), las contribuciones de los parques a la economía nacional benefician a todo el país. En ese sentido, se hace necesario avanzar en su identificación y valoración para el bienestar humano.

Ante esta situación, Sandra Vilarity destaca que existen dificultades para realizar procesos pedagógicos que giren en torno a la conservación de los ecosistemas protegidos teniendo en cuenta que el sector público, no lo visualiza como un activo importante, sino como un problema porque no le genera ingresos por renta y le impide hacer proyectos de desarrollo, sobre todo en la región Caribe, afirmando que existe una falla institucional para que se ejecuten articulaciones armoniosas con el papel de la conservación y su importancia en las actividades productiva.

Si bien el cambio climático es un factor clave, no se puede atribuir toda la pérdida glaciaria a las actividades humanas locales. Las comunidades locales han comenzado a registrar una disminución en sus cultivos y una creciente escasez de agua a medida que el clima se vuelve más impredecible (CIT, 2015). La región presenta subzonas con un alto potencial de erosión hídrica (IDEAM, 2018), lo que aumenta la vulnerabilidad de la región al cambio climático. Las presiones antropogénicas en las áreas de páramo son relativamente bajas, representando solo el 0,8% de la transformación en estas áreas (Sarmiento et al., 2013), pero aún así, los efectos del cambio climático son evidentes y devastadores.

Juntos, estos factores dependientes e independientes del cambio climático están contribuyendo a la inseguridad hídrica y alimentaria en la región. Las comunidades indígenas, que dependen de los recursos naturales para su sustento, están viendo cómo el clima cambiante afecta sus cultivos, su acceso al agua y, por ende, su bienestar. La pérdida de glaciares y la disminución de las precipitaciones son solo algunos de los factores que agravan la situación, creando un panorama de incertidumbre para las generaciones futuras

Tomando en cuenta los principales procesos históricos ocurridos durante las últimas décadas en el territorio de la Sierra Nevada de Santa Marta, se puede evidenciar una correlación entre los cambios de cobertura evidenciados y los procesos antrópicos en esta

9. Discusión

Las tendencias observadas revelan un proceso de transformación del paisaje condicionado por múltiples factores socioambientales. La reducción de áreas glaciares es atribuible de forma directa al calentamiento global, lo cual coincide con estudios previos sobre el retroceso glaciar en la Sierra Nevada de Santa Marta (Correal, 2022; Díaz, 2021).

Entre los factores que inciden en la degradación de los ecosistemas del Caribe colombiano, de acuerdo con la docente e investigadora Vilarity, se encuentran las características climáticas particulares diferentes a las de las otras zonas del país. “La región está influenciada por los vientos alisios, que secan y absorben la humedad. Por lo tanto, hace parte ese cinturón árido pericaribeño. Es decir, hay otras zonas dentro del Caribe que se comportan con otras dinámicas del clima, pero la mayoría es climáticamente seca”, afirma Vilarity.

Para la experta, “en la medida en que la región va perdiendo bosques al interior de los Parques Nacionales, y también humedales por las dificultades climáticas, se van enfermando los ecosistemas del entorno y es por esta razón que el Caribe colombiano cuenta con grandes territorios amenazados”.

Por otro lado, la dinámica entre coberturas boscosas y tierras degradadas sugiere un modelo de presión y recuperación temporal en el territorio, posiblemente impulsado por actividades como la ganadería, cultivos ilícitos o minería artesanal, seguidos por periodos de abandono y regeneración secundaria. Esta hipótesis es consistente con los registros de CORPAMAG (2021) y la literatura que describe la fragmentación ecológica y pérdida de hábitats en la región (Ibarra-Trujillo y García-Alzate, 2017).

La fragmentación progresiva del bosque y el aumento de zonas degradadas también pueden reflejar la expansión de asentamientos humanos o vías de acceso, muchas veces sin una planificación territorial adecuada. La presión antrópica sobre territorios indígenas, sin consulta previa ni regulación efectiva, ha sido documentada por múltiples fuentes normativas y estudios académicos en la zona.

Las coberturas con mayor variabilidad fueron el bosque denso y el bosque fragmentado con vegetación secundaria, lo que sugiere un comportamiento dinámico en la cobertura vegetal del resguardo. La expansión de las tierras degradadas indica un deterioro continuo del suelo que, posiblemente, está vinculado al uso no planificado del territorio y a la presión sobre ecosistemas

frágiles. La pérdida progresiva de las zonas glaciares señala un fenómeno sostenido de reducción de hielo en las partes altas de la Sierra, probablemente vinculado a las condiciones climáticas actuales.

La combinación de estas tendencias sugiere que el territorio ha estado sujeto a presiones tanto ecológicas como humanas, con efectos diferenciados en las distintas coberturas.

10. Conclusiones

El análisis multitemporal de las coberturas de tierra entre 1990 y 2025 en el Resguardo Kogui-Malayo-Arhuaco revela tendencias de transformación significativas que comprometen la integridad ecológica del territorio. Destacan el retroceso de zonas glaciares, el aumento de tierras degradadas y una dinámica fluctuante en las coberturas boscosas, todo ello en un contexto de alta sensibilidad ambiental y cultural.

En conclusión, entre 1990 y 2025 el Resguardo Indígena Kogui-Malayo-Arhuaco ha experimentado una disminución progresiva de su bosque denso, que pasó de superar el 35 % del área en 1999 a cerca del 28 % en 2017-2025. La fragmentación del bosque, que alcanzó su máximo con un 11 % en 1999-2010, descendió a alrededor del 7 %, mientras que la pérdida de bosque se mantuvo estable entre el 3 % y el 6 %. Destaca la recuperación forestal, que aumentó del 12 % en 1990-1999 al 22 % en 2010-2017, estabilizándose en torno al 17 % en el último periodo. Las coberturas de bosque fragmentado sin cambios y zonas sin vegetación sin cambios permanecieron constantes, ocupando entre el 20 % y 23 % del territorio. Los glaciares, por su parte, continuaron un retroceso sostenido, representando menos del 0,1 % del área. Este balance refleja la coexistencia de procesos de degradación, regeneración y fragmentación, con retos significativos para la conservación integral del paisaje y sus ecosistemas.

Teniendo en cuenta que los glaciares de la Sierra Nevada de Santa Marta han perdido un total de 1.045 hectáreas entre 1999 y 2025, pasando de una superficie inicial de 1.428 hectáreas a tan solo 373 hectáreas, lo que representa la mayor reducción registrada entre todas las coberturas analizadas, se concluye que es un reflejo de los impactos del cambio climático en una región ecológicamente única y culturalmente rica. Aunque no todos los efectos son atribuibles a las actividades humanas locales, la combinación de la deforestación, la desglaciación y el cambio climático está poniendo en peligro el equilibrio ambiental de la región.

Los resultados indican que, aunque existen procesos de recuperación natural, estos no compensan plenamente las pérdidas causadas por las actividades humanas. Por tanto, se hace evidente la necesidad de fortalecer las estrategias de monitoreo, protección de áreas clave y restauración ecológica, integrando el conocimiento ancestral y la gobernanza indígena como pilares para una gestión territorial sostenible.

La Sierra Nevada de Santa Marta ha experimentado transformaciones significativas en sus coberturas de la tierra entre 1990 y 2025, evidenciando una reducción sostenida de áreas naturales y un avance de la frontera antrópica en distintas zonas del territorio. El análisis multitemporal basado en imágenes satelitales Landsat, procesadas en distintos periodos, y la aplicación de la metodología CLC para la clasificación temática, permitieron identificar con claridad estos cambios, aportando una base sólida para la comprensión de los procesos de transformación territorial.

La capa de hielo en los picos más altos de la Sierra mostró una disminución considerable durante el periodo de estudio, evidenciando los efectos del cambio climático sobre los ecosistemas tropicales de alta montaña. A través de la comparación de series históricas de cobertura, fue posible delimitar con precisión la pérdida glacial y relacionarla con otros tipos de coberturas, lo que ofrece una visión integral de las implicaciones ambientales de este fenómeno en el contexto regional.

La expansión de la infraestructura urbana y rural está estrechamente relacionada con procesos de deforestación, muchos de los cuales ocurren de forma no planificada. El reemplazo progresivo de coberturas naturales por usos agrícolas o construidos fue evidente en diversas zonas del resguardo, especialmente en aquellas con mayor accesibilidad. Esta relación directa entre urbanización y pérdida de vegetación subraya la importancia de establecer estrategias de conservación con enfoque preventivo y participativo.

El análisis reveló un proceso de fragmentación creciente del paisaje natural, particularmente en lo que respecta a la continuidad de coberturas como el bosque. La pérdida de conectividad ecológica, visible en la aparición de parches aislados, representa una amenaza para la biodiversidad y limita el funcionamiento de los ecosistemas. Esta tendencia afecta también los flujos hídricos y los corredores biológicos, esenciales para la resiliencia ambiental de la Sierra Nevada.

Los resultados obtenidos demuestran el valor de utilizar herramientas de teledetección junto con metodologías de clasificación homologadas para caracterizar procesos territoriales complejos. La integración de estos enfoques permitió construir una base sólida de información espacial, útil tanto para la planificación institucional como para el fortalecimiento de las capacidades locales de monitoreo y gestión ambiental en el resguardo indígena.

Este trabajo también pone en evidencia cómo el cambio climático y la presión antrópica inciden directamente sobre territorios de alta montaña habitados ancestralmente. La transformación del paisaje entre 1990 y 2025 aporta elementos clave para el diseño de políticas públicas que

promuevan la protección de ecosistemas estratégicos, reconozcan los derechos colectivos y fortalezcan la gobernanza territorial con enfoque diferencial.

La escala de análisis utilizada, 1:100.000, permitió captar patrones regionales de cambio. Esta resolución espacial fue adecuada para evaluar transformaciones de mediana y gran extensión, aunque con limitaciones para detectar modificaciones muy puntuales. No obstante, la escala elegida logró equilibrar el alcance geográfico y el nivel de detalle requerido para cumplir con los objetivos del estudio.

11. Recomendaciones

1. Fortalecer el monitoreo ambiental comunitario con enfoque territorial indígena. Se recomienda establecer un sistema permanente de seguimiento ambiental liderado por las autoridades de los resguardos indígenas involucrados, con apoyo técnico institucional. Este sistema debe basarse en SIG y teledetección para identificar rápidamente nuevas zonas de deforestación o expansión agrícola no concertada. Los resultados obtenidos evidencian que las áreas con mayor pérdida de bosque se sitúan en los límites del resguardo, donde la vigilancia territorial es más débil.

2. Implementar planes de restauración ecológica en zonas con pérdida crítica de cobertura boscosa

A partir de los mapas temáticos generados, se recomienda priorizar intervenciones de restauración en sectores que registraron más del 25% de reducción de bosque entre el tiempo de estudio de este trabajo. Estas zonas deberían ser objeto de reforestación con especies nativas y estrategias de conservación de suelos, con participación activa de las comunidades.

3. Incorporar los hallazgos del análisis multitemporal en los instrumentos de planificación y ordenamiento territorial regional. Dado que los patrones identificados reflejan una expansión agrícola hacia áreas de importancia ecológica y cultural, se recomienda que los municipios y las autoridades ambientales (como CORPAMAG) integren estos insumos en sus Planes de Ordenamiento Territorial (POT) y Esquemas de Ordenamiento Territorial (EOT), asegurando la protección de corredores ecológicos y zonas de recarga hídrica.

4. Diseñar estrategias diferenciadas para zonas de frontera y transición agroecológica. La comparación temporal de coberturas mostró que las áreas con mayor transformación están ubicadas en la periferia del resguardo, donde confluyen prácticas tradicionales e intensivas. Se recomienda diseñar estrategias de manejo agroecológico para estas zonas de transición, promoviendo alternativas productivas sostenibles que reduzcan la presión sobre los ecosistemas sin afectar la seguridad alimentaria local.

5. Fortalecer la articulación entre autoridades ambientales y cabildos indígenas para la gestión territorial. Los resultados evidencian que la debilidad institucional y la falta de concertación en decisiones de uso del suelo han facilitado transformaciones adversas. Se recomienda establecer mesas técnicas

permanentes entre CORPAMAG, el Ministerio de Ambiente y los cabildos indígenas para definir medidas conjuntas de conservación, control del territorio y restitución ecológica.

6. Promover estudios complementarios que integren variables socioeconómicas y territorial
conflictividad

Aunque este estudio permitió detectar los cambios espaciales en la cobertura, se identificó la necesidad de comprender mejor los factores subyacentes, como presión demográfica, migración rural y dinámicas de conflicto armado. Se recomienda desarrollar investigaciones interdisciplinarias que incluyan estas variables para orientar políticas más eficaces de gestión ambiental con enfoque diferencial.

12. Referencias

- Afanador, H., González, G., Ramírez, L., & Cardoso, P. (2021). *Illicit crops, planning of substitution with sustainable crops based on remote sensing: Application in the Sierra Nevada of Santa Marta, Colombia*. En C. Gorse, L. Scott, C. Booth & M. Dastbaz (Eds.), *Climate emergency – Managing, building, and delivering the Sustainable Development Goals* (pp. 419–434). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-79450-7_36
- Aguirre, S., Piraneque, N., & Robles, C. (2024). *Ecosistema Sierra Nevada de Santa Marta: Reflexiones desde la ciencia y la tecnología*. Universidad del Magdalena.
- Alvarado, N; & Mainato, F. (2021). *Herramientas SIG para el estudio de la cobertura vegetal y cambio de uso de suelo en el Cantón Chunchi, Provincia del Chimborazo*. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/20104/1/UPS-CT009032.pdf>
- Anaya, J., Rodríguez, S., & Londoño, M. (2023). *Land cover classification with spatial resolution of 10 meters in forests of the Colombian Caribbean based on Sentinel 1 and 2 missions*. *Revista de Teledetección*, 61, 13–24. <https://doi.org/10.4995/raet.2023.17655>
- Badio, N. D. (2021). Análisis de la influencia de la cobertura del bosque y la deforestación sobre el rendimiento hídrico en la Sierra Nevada de Santa Marta. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10554/57627>
- Correal, C. D., y García, J. (2012). Aspectos físicos a considerar en la calibración radiométrica de imágenes satelitales. *UD y la Geomática*, (6), 11–18. <https://doi.org/10.14483/23448407.4406>
- Chuvieco, E. (2020). *Fundamentals of satellite remote sensing: An environmental approach (3rd ed.)*. Taylor & Francis Group.
- Congreso de Colombia. (1991). *Constitución Política de Colombia*. Diario Oficial No. 47.013. <https://www.constitucioncolombia.com/>
- Congreso de Colombia. (1991). *Ley 21 de 1991, por medio de la cual se aprueba el Convenio 169 sobre pueblos indígenas y tribales en países independientes, adoptado por la OIT en 1989*. Diario Oficial No. 39.656. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=1181>
- Congreso de Colombia. (1993). *Ley 99 de 1993, por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente*. Diario Oficial No. 41.146. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=317>
- Congreso de Colombia. (1997). *Ley 388 de 1997, por la cual se dictan disposiciones en materia de desarrollo territorial*. Diario Oficial No. 43.091. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=3154>
- Congreso de Colombia. (2011). *Ley 1448 de 2011, por la cual se dictan medidas de atención, asistencia y reparación integral a las víctimas del conflicto armado interno*. Diario Oficial No. 48.096. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=43006>
- Correal, M. (2022). *Estimación de los cambios del glaciar en la Sierra Nevada de Santa Marta asociados al deshielo en el periodo de 2016 a 2022* [Tesis de especialización, Universidad de Manizales]. <https://ridum.umanizales.edu.co/handle/20.500.12746/6625?show=full>

- CORPAMAG. (2021). Informe de gestión 2021. Corporación Autónoma Regional del Magdalena.
- De Lange, N. (2023). *Geoinformatics in theory and practice: An integrated approach to geoinformation systems, remote sensing and digital image processing*. Springer.
- Díaz, F. (2021). *Estimación del retroceso glaciar en la Sierra Nevada de Santa Marta para el periodo 2000–2020 a partir de imágenes Landsat* [Trabajo de grado, Universidad Militar Nueva Granada]. <https://repository.unimilitar.edu.co/items/af756605-b0ae-4c3a-ace1-2a16f848b011>
- Durán, M. (2021). Vulnerability assessment of Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia: World's most irreplaceable nature reserve. *Global Ecology and Conservation*
- Etter, A., McAlpine, C., Pullar, D., & Possingham, H. (2006). Modelling the conversion of Colombian lowland ecosystems since 1940: Drivers, patterns and rates. *Journal of Environmental Management*, 79(1), 74–87. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2005.05.017>
- Hernández, R., Fernández-Collado, C., Baptista, P. (2014) *Metodología de la investigación*. México D.F: McGraw-Hill Interamericana.
- Ibarra-Trujillo, E., & García-Alzate, C. (2017). *Ecología trófica y reproductiva de Hemibrycon sierraensis (Characiformes: Characidae), pez endémico del río Gaira, Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia*. *Revista de Biología Tropical*, 65(3), 1033–1045. <https://doi.org/10.15517/rbt.v65i3.29439>
- IDEAM. (2020). Colombia continúa reduciendo la deforestación anual, pasando de un 10% al 19,2%. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2014). *Resolución 192 de 2014: Por la cual se adopta la metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia como instrumento técnico para el monitoreo de coberturas de la tierra*. <https://www.ideam.gov.co>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2013). *Resolución 376 de 2013: Por la cual se establecen los lineamientos para el uso y acceso a la información geoespacial generada por el IDEAM*. <https://www.ideam.gov.co>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2010). *Leyenda nacional de coberturas de la tierra: Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia, escala 1:100.000* (72 págs.). Bogotá, D. C.: Autor.
- Kumar, N., Yamas, S., & Velmurugan, A. (2015). *Applications of remote sensing and GIS in natural resource management*. *Journal of the Andaman Science Association*, 20(1), 1–6.
- Mesa, J. (2022). *Análisis multitemporal del cambio en el estado de las coberturas de los ecosistemas de Páramo en Colombia para el periodo de 2000–2018* [Tesis de grado, Pontificia Universidad Javeriana]. <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/61258>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2024). *Sierra Nevada de Santa Marta cuenta con nueva figura de protección*. <https://archivo.minambiente.gov.co/index.php/noticias-minambiente/3685-sierra-nevada-de-santa-marta-cuenta-con-nueva-figura-de-proteccion>

- Organización Internacional del Trabajo. (1989). *Convenio sobre pueblos indígenas y tribales, 1989* (núm. 169). https://www.ilo.org/dyn/normlex/en/f?p=NORMLEXPUB:12100:0::NO::P12100_ILO_CODE:C169
- Palacios, E., & Peres, C. A. (2007). *Basin-wide effects of game harvest on vertebrate population densities in Amazonian forests: Implications for animal-mediated seed dispersal*. *Biotropica*, 39(3), 304–315. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2007.00272.x>
- Patiño, E., & Coronado, A. (2021). *La Sierra Nevada de Santa Marta, amenazada por la deforestación y el cambio climático*. <https://contextomedia.com/la-sierra-nevada-de-santa-marta-amenazada-por-la-deforestacion-y-el-cambio-climatico/>
- Pimiento, M. (2019). *Análisis Multitemporal del Cambio de Uso de Suelo en el Páramo de Pisba Jurisdicción del municipio de tasco para el periodo 1990 – 2015*. <https://repositorio.uptc.edu.co/server/api/core/bitstreams/962996f0-d684-4e39-9bbe-4fc51f79edf7/content>
- Poveda, G., Vélez, J. I., & Rueda, Ó. A. (2017). Cambios en el uso y cobertura del suelo en la Sierra Nevada de Santa Marta: una aproximación multitemporal. *Revista Colombiana de Geografía*, 26(2), 31–47. <https://doi.org/10.15446/rcg.v26n2.63655>
- Presidencia de la República de Colombia. (2011). *Decreto 3570 de 2011, por el cual se modifica la estructura del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible*. Diario Oficial No. 48.239. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=44486>
- Presidencia de la República de Colombia. (2018). *Decreto 1500 de 2018: Por el cual se adoptan medidas para la protección de los lugares sagrados de los pueblos indígenas Arhuaco, Kogui, Wiwa y Kankuamo en la Sierra Nevada de Santa Marta, y se reconfigura la Línea Negra*. Diario Oficial No. 50.677. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=88257>
- Ramos, A. (2019). *Análisis multitemporal del cambio del área de cobertura glaciar sobre la Sierra Nevada de Santa Marta en los años 2014 y 2018* [Trabajo de grado, Universidad Militar Nueva Granada]. <https://repository.unimilitar.edu.co/items/0683d3b0-2d21-4fae-a69c-27094bf5aa78>
- Rodríguez, A. (2018). *Clasificación y análisis histórico de los cambios en los tipos de cobertura vegetal en la cuenca del río Toribio, Sierra Nevada de Santa Marta* [Trabajo de grado, Universidad del Magdalena].
- Rodríguez, D., Giraldo, S., Mazuera, E., Burbano, A., & Figueredo, E. (2023). *Beyond visualization: Remote sensing applications in prehispanic settlements to understand ancient anthropogenic land use and occupation in the Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia*. *Latin American Antiquity*, 34, 821–841. <https://doi.org/10.1017/laq.2022.91>
- Rodríguez, J., Gonzalo, U., Castillo, N., Arias, J., Agudelo, W., Hernández, L., Romero, J., & Chávez, J. (2021). Análisis de los Cambios de Coberturas de la Tierra en el Periodo 2018 al 2020 en la Amazonia Colombiana. <https://www.sinchi.org.co/files/PUBLICACIONES%20DIGITALES/Documentos%20de%20>

[Odebate/ANA%CC%81LISIS%20DE%20LOS%20CAMBIOS%20DE%20COBERTURAS%20DE%20TIERRA%20%281%29.pdf](#)

- Sarmiento, C., & León Moya, O. A. (Eds.). (2015). Transición bosque-páramo: bases conceptuales y métodos para su identificación en los Andes colombianos. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Serrano, D., Durango, J., Aguilar, T., Pérez, N., Arias, J., Quirós, J., Morelo, L. (2014). Efectos y cambios en la cobertura y uso del suelo de las sabanas de los departamentos de Córdoba, Sucre y la zona semidesértica de La Guajira, mediante la utilización de imágenes de satélite. Grupos de Investigación: Geografía y Medio Ambiente – Biodiversidad, Universidad de Córdoba.
- U.S. Geological Survey (USGS). (s.f.). *EarthExplorer*. <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- Vaca, T. (2024). *Análisis del comportamiento de las sequías en la Sierra Nevada de Santa Marta y su impacto en los cultivos* [Tesis de maestría, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito]. <https://dspace-escuelaing.metacatalogo.com/handle/001/3238>
- Vilora, J. (2005). *Sierra Nevada de Santa Marta: Economía de sus recursos naturales*. Banco de la República. (Documentos de trabajo sobre economía regional).
- Viña, A., Echavarría, F. R., & Rundquist, D. C. (2004). Satellite change detection analysis of deforestation rates and patterns along the Colombian-Ecuador border. *Ambiente y Desarrollo*, 8(15), 45–54.