



Análisis multitemporal de las coberturas del suelo en la subcuenca Río Alto Bogotá (2016-2025)

Sneider Barrera Santamaria

Nicolás Felipe Quevedo Blanco

Bladimir Berdugo Ardila

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

Tutora: Ing. Ana María Giraldo Patiño

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

Cita	(Barrera Santamaría, S. 2025)
Referencia	Barrera Santamaría, S., Quevedo Blanco, N. F., & Berdugo Ardila, B. (2025). <i>Análisis multitemporal de las coberturas del suelo en la subcuenca Rio Alto Bogotá (2016-2025)</i> . [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Manizales.
Estilo APA 7 (2020)	RIDUM: Repositorio Institucional Universidad de Manizales.



Especialización en Sistemas de Información Geográfica - Virtual, I

Seleccione grupo 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, 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

Dedicamos este trabajo a nuestras familias, por su apoyo constante, paciencia y motivación durante todo nuestro proceso de formación.

A nuestros padres, por ser nuestro pilar y ejemplo de esfuerzo y dedicación.

A todas las personas que creyeron en nosotros y nos acompañaron en este camino académico.

Tabla de contenido

1	Resumen.....	9
2	Abstract	10
3	Introducción	11
4	Ubicación	12
5	Planteamiento del problema.....	13
6	Antecedentes	16
7	Justificación	24
8	Objetivos	26
8.1	Objetivo general	26
8.2	Objetivos específicos.....	26
9	Hipótesis	27
9.1	Hipótesis de trabajo	27
9.1.1	Hipótesis nula.....	27
9.1.1.1	<i>Hipótesis alterna.</i>	27
9.1.1.1.1	Variables.....	27
10	Marco teórico	29
11	Metodología	34
11.1	Fase I: Recolección y preprocesamiento de imágenes satelitales	34
11.2	Fase II: Clasificación de las principales coberturas del suelo y análisis de cambios.....	36
11.2.1	Metodología general para pérdida, ganancia y persistencia.....	40
11.2.2	Metodología específica para analizar la expansión urbana (Clase 1 - Zonas urbanizadas)	41
11.2.3	Metodología específica para analizar la clase Bosques (Clase 3).....	41
11.2.4	Metodología específica para analizar Aguas continentales (Clase 5).....	41

11.2.5	Metodología específica para analizar Pastos (Clase 2)	42
11.2.6	Metodología específica para Áreas abiertas o con poca vegetación (Clase 4).....	42
11.3	Fase III: Formulación de recomendaciones a partir de resultados	42
12	Resultados y analisis	43
12.1	Fase I: Recolección y preprocesamiento de imágenes satelitales	43
12.1.1	Resultados visuales preliminares de cobertura del suelo (2016–2025).....	43
12.1.2	Resultados visuales de la clasificación NDVI de coberturas del suelo (2016–2025) 44	
12.2	Fase II: Clasificación de las principales coberturas del suelo y análisis de cambios	46
12.2.1	Resultados de la clasificación supervisada de coberturas del suelo (2016–2025) ...	46
12.2.2	Análisis espacial del cambio total (2016–2025)	47
12.2.3	Análisis de las transiciones de cobertura por periodo bianual (2016–2025).....	49
12.2.4	Cuantificación e interpretación de las áreas de cambio (2016–2025	54
12.2.4.1	Pérdida, ganancia y persistencia de coberturas del suelo (2016–2025).....	54
12.2.4.2	Expansión de zonas urbanizadas por periodo (2016–2025)	56
12.2.4.3	Pérdida de cobertura boscosa y su distribución por clase de destino (2016– 2025) 58	
12.2.4.4	Comportamiento de la cobertura ‘Aguas continentales’ (2016–2025)	60
12.2.4.5	Comportamiento de la cobertura ‘Pastos’ (2016–2025)	61
12.2.4.6	Comportamiento de la cobertura ‘Áreas abiertas o con poca vegetación’ (2016– 2025) 62	
12.3	Fase III: Formulación de recomendaciones a partir de resultados	64
13	Discusión.....	66
14	Conclusiones	68
15	Recomendaciones.....	70
16	Referencias	71

Lista de Anexos

Anexo 1: Salidas Graficas

Lista de tablas

Tabla 1 Identificación de variables	27
Tabla 2 Clasificación de coberturas	37
Tabla 3 Rangos de reclasificación de NDVI. Tomado de Ríos., et al (2014).	39
Tabla 4 Área total con y sin cambio de cobertura del suelo entre 2016 y 2025.	47
Tabla 5 Perdida, ganancia y persistencia por clase de cobertura del suelo en hectáreas (2016–2025).	55
Tabla 6 Expansión de zonas urbanizadas por periodo (2016–2025).	56
Tabla 7 Destino de la pérdida de cobertura boscosa en la Subcuenca Río Alto Bogotá (2016–2025).	58
Tabla 8 Comportamiento de la cobertura ‘Aguas continentales’ en la Subcuenca Río Alto Bogotá (2016–2025).	60
Tabla 9 Evolución de la pérdida, ganancia y persistencia de la cobertura ‘Pastos’ en la Subcuenca Río Alto Bogotá (2016–2025).	61
Tabla 10 Evolución de la pérdida, ganancia y persistencia de la cobertura ‘Áreas abiertas o con poca vegetación’ en la Subcuenca Río Alto Bogotá (2016–2025).	63

Lista de Figuras

Figura 1 Localización geográfica de la subcuenca Río Alto Bogotá.	12
Figura 2 Selección de imágenes para descargar de Planet Labs Inc.	35
Figura 3 Orden para la descarga de imágenes de Planet Labs Inc.	36
Figura 4 Calculó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)	38
Figura 5 Composición RGB natural de la Subcuenca Río Alto Bogotá (2016, 2018, 2020, 2022, 2024, 2025), a partir de imagen PlanetScope.....	44
Figura 6 Clasificación de índices espectrales NDVI para los años 2016, 2018, 2020, 2022, 2024 y 2025.....	45
Figura 7 Clasificación supervisada de coberturas del suelo en la Subcuenca Río Alto Bogotá (2016–2025).	46
Figura 8 Mapa binario de cambio/no cambio de cobertura del suelo (2016–2025).....	48
Figura 9 Transiciones de cobertura (2016–2018).	50
Figura 10 Transiciones de cobertura (2018–2020).	51
Figura 11 Transiciones de cobertura (2020–2022).	52
Figura 12 Transiciones de cobertura (2022–2024).	53
Figura 13 Transiciones de cobertura (2024–2025).	54
Figura 14 Gráfico comparativo de pérdida, ganancia y persistencia por clase de cobertura del suelo en hectáreas (2016–2025).	55
Figura 15 Gráfico expansión de zonas urbanizadas por periodo (2016–2025).....	57
Figura 16 Distribución gráfica de la pérdida de bosques según clase de destino (2016–2025).....	59
Figura 17 Distribución gráfica del comportamiento de la cobertura ‘Aguas continentales’ (2016–2025).....	60
Figura 18 Comportamiento de la cobertura ‘Pastos’ por periodo (2016–2025).	62
Figura 19 Comportamiento de la cobertura ‘Áreas abiertas o con poca vegetación’ por periodo (2016–2025)	63

Siglas, acrónimos y abreviaturas

ha	hectáreas
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada)
SIG	Sistemas de Información Geográfica
UManizales	Universidad de Manizales

1 Resumen

Este trabajo de investigación desarrolla un análisis multitemporal de las coberturas del suelo en la Subcuenca Río Alto Bogotá entre los años 2016 y 2025, a partir del procesamiento y clasificación de imágenes satelitales PlanetScope. Se emplearon herramientas de análisis espacial en ArcGIS Pro para evaluar cuantitativamente los cambios territoriales a lo largo del periodo de estudio. La metodología se estructuró en tres fases: (i) preprocesamiento y análisis visual de imágenes satelitales, (ii) evaluación cuantitativa de las transiciones de cobertura mediante técnicas SIG, y (iii) formulación de recomendaciones para la gestión ambiental del territorio.

Los resultados evidencian transformaciones sustanciales del paisaje, destacándose la expansión progresiva de las zonas urbanizadas, la pérdida significativa de coberturas naturales como bosques y cuerpos de agua, así como la fragmentación de pastos y áreas abiertas. A través del cálculo de pérdida, ganancia y persistencia para cada clase, se identificaron patrones espaciales clave, permitiendo establecer indicadores de presión y cambio ambiental.

Adicionalmente, se emplearon representaciones gráficas, mapas temáticos y rásteres binarios para visualizar las zonas de transformación y estabilidad. Estos insumos facilitaron la interpretación del comportamiento del territorio, sirviendo como base para proponer medidas de ordenamiento territorial, conservación ecológica y fortalecimiento de la gobernanza local. El estudio demuestra el valor de las herramientas geomáticas y los datos satelitales de alta resolución como insumo clave para la toma de decisiones sostenibles y la planificación ambiental a escala de cuenca.

Palabras clave: Análisis multitemporal, cobertura del suelo, imagen satelital, clasificación supervisada, subcuenca.

2 Abstract

This research presents a multitemporal analysis of land cover in the Río Alto Bogotá Sub-watershed between 2016 and 2025, based on the processing and classification of PlanetScope satellite imagery. Spatial analysis tools in ArcGIS Pro were used to quantitatively assess territorial changes throughout the study period. The methodology was structured in three phases: (i) preprocessing and visual analysis of satellite images, (ii) quantitative evaluation of land cover transitions using GIS techniques, and (iii) formulation of recommendations for territorial environmental management.

The results show substantial landscape transformations, notably the progressive expansion of urban areas, significant loss of natural cover types such as forests and water bodies, and the fragmentation of pastures and open areas. Through calculations of loss, gain, and persistence for each land cover class, key spatial patterns were identified, allowing for the establishment of indicators of environmental pressure and change.

Additionally, thematic maps, graphs, and binary raster outputs were used to visualize transformation and stability zones. These outputs supported the interpretation of territorial dynamics and served as a foundation for proposing land-use planning measures, ecological conservation actions, and the strengthening of local governance. The study highlights the value of geospatial tools and high-resolution satellite imagery as key resources for informed decision-making and sustainable environmental planning at the watershed scale.

Keywords: multitemporal analysis, land cover, satellite imagery, supervised classification, sub-watershed.

3 Introducción

Los cambios de coberturas y uso del suelo son una de las principales problemáticas medioambientales a nivel mundial ya que con está de agudizan los efectos del cambio climático, favoreciendo a la degradación de ecosistemas de relevancia para muchas comunidades, es por este motivo que las administraciones territoriales plantean esfuerzos para contrarrestar los efectos negativos que se han venido presentando por los constantes cambios de coberturas y usos del suelo, debido a la intensificación en las dinámicas climatológicas, para ello es indispensable un buena planificación y ordenación del territorio y para esto se incluye el uso de herramientas que permitan analizar el estado de los ecosistemas, dado que el contar oportunamente con información precisa de los coberturas y usos del suelo representa una importancia para el desarrollo de actividades de planificación y gestión territorial (Lillesand et al., 2015).

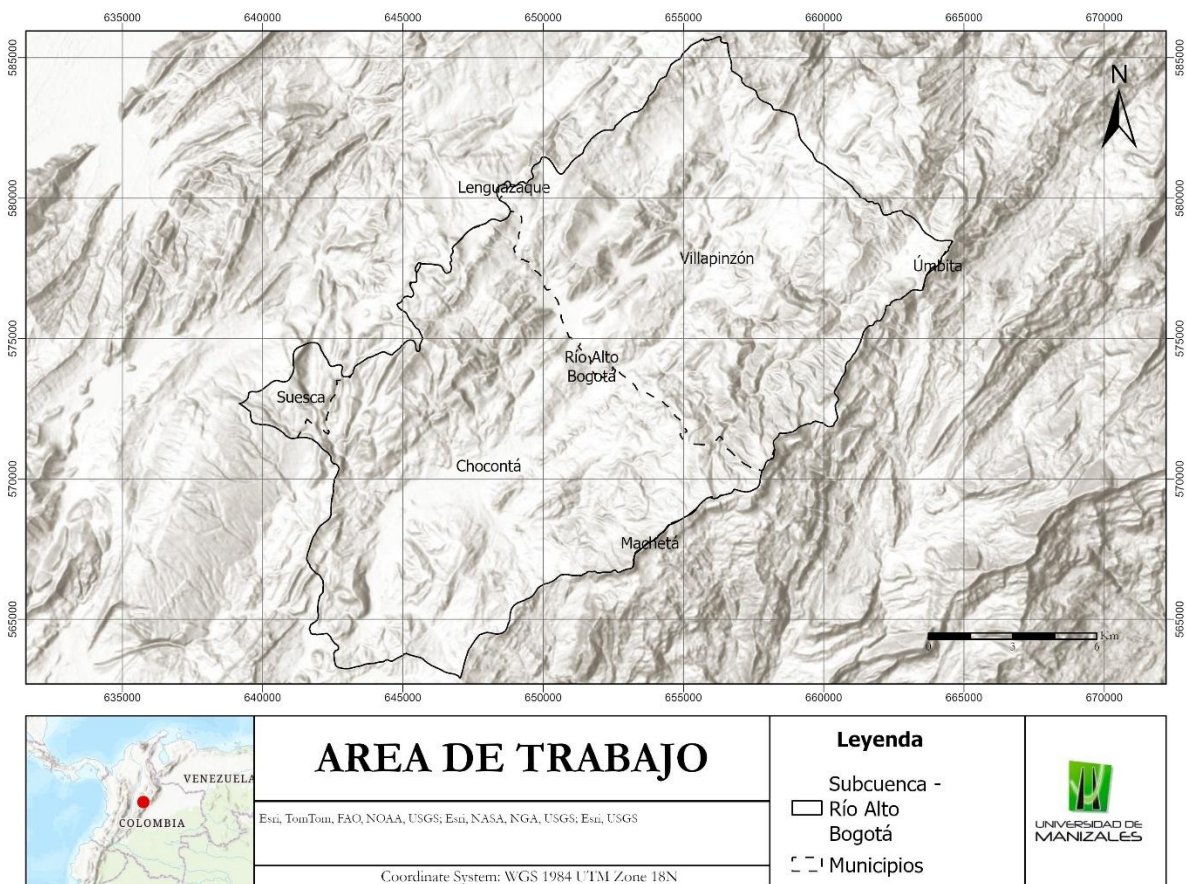
La subcuenca Río Alto Bogotá cumple con un papel de importancia en la conservación y protección del recurso hídrico presente en el río Bogotá, por eso identificar los cambios de coberturas de este sector aporta conocimientos sobre el estado actual de sus ecosistemas y del éxito en las estrategias de manejo, debido a que un aumento en la vegetación favorecerá el equilibrio ecosistémico y la prestación de servicios de gran importancia para la recuperación del recurso hídrico y por consiguiente del bienestar humano, es por esto que la implementación de un análisis multitemporal que abarque el análisis de los cambios de coberturas en los últimos 10 años permitirá conocer la evolución de las misma e identificar los cambios positivos y negativos para las comunidades de esta subcuenca, estableciendo así una fuente de información relevante para la toma de decisiones y la implementación de acciones que busquen el mantener las bosques o recuperarlos.

En conclusión el uso de la teledetección permite clasificar las coberturas del territorio procesando imágenes satelitales obtenidas de la constelación PlanetScope haciendo comparaciones visuales de las coberturas presentes en un periodo de 10 años con una secuencia de imágenes que presentan una separación de dos años entre cada una y así analizar las transformaciones ocurridas en ese tiempo, generando salidas gráficas que relacionan la presencia, persistencia y la modificación de 5 coberturas entre las que se encuentran los bosques, pastos, zonas urbanizadas, áreas sin o poca vegetación y aguas continentales, clasificadas y analizadas a través del software ArcGIS Pro.

4 Ubicación

La subcuenta Río Alto Bogotá se encuentra en el Departamento de Cundinamarca, abarcando principalmente los municipios de Chocontá, Villapinzón y Suesca, en menor proporción los municipios de Lenguazaque, Úmbita y Machetá como se muestra en la Figura 1. La subcuenta presenta un área de aproximadamente de 273,1 Km².

Figura 1 Localización geográfica de la subcuenta Río Alto Bogotá.



Fuente: Propia

5 Planteamiento del problema

Los ecosistemas de forma somera consisten en áreas donde interactúan componentes bióticos y abióticos generando intercambios de energía y materia, los cuales pueden darse de formas graduales y sutiles o rápidas y catastróficas, siendo algunos fáciles de predecir y otros no (Kumar & Mina, 2021), por lo tanto, es de relevancia conocer los cambios que puedan ser positivos para su conservación, dado que un ecosistema presta beneficios tangibles e intangibles para el ser humano y para el desarrollo de las sociedades, estos aspectos benéficos se ven reflejados en lo que conocemos como servicios ecosistémicos, los cuales se consideran como los procesos y las situaciones en las que un ecosistema produce a partir de algunos de sus componentes bienes como alimentos, madera, combustibles entre otros, y favorece a la presencia de funciones de sostén y regulación, mismas que aportan en gran manera al desarrollo de las actividades realizadas por el hombre y la sociedad (Arango Sánchez et al., 2023), es así, que con el pasar del tiempo la poblaciones han hecho uso de estos recursos aumentado su demanda y debido al constante crecimiento poblacional, se ha generado una agotamiento exacerbado de los mismos, a su vez aunado a este factor antrópico hay otros como la deforestación, la contaminación, la urbanización y el cambio climático que causan una alarmante degradación de los ecosistemas (Mieles-Giler et al., 2024).

La degradación de los ecosistemas es una problemática de importancia a nivel global, debido a la transformación de los mismos, dichas transformaciones están ligadas a una pérdida considerable de cobertura boscosa, situación que es alarmante teniendo en cuenta que los bosques en el mundo cuentan con cerca de 4.060 millones de hectáreas y donde entre 1990 y 2020 se han perdido aproximadamente 178 millones de hectáreas (FAO, 2020), en el caso de Colombia para 2023 se estima que se deforestó un área de 79.256 hectáreas (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM & Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible - MADS, 2024). Por lo tanto, la deforestación es definida como la conversión de los bosques a otro tipo de uso de la tierra sin importar si es causada o no por el ser humano, a su vez es de aclarar que principalmente se basa en el cambio en el uso de la tierra más que en la cobertura de árboles pero en el caso de algunos estudios en donde se usa teledetección si se ha tenido en cuenta (FAO, 2022), por consiguiente, se puede afirmar que una problemática específica a considerar en nuestro territorio es el cambio de los usos del suelo, como es el caso de la agricultura, la ganadería y la urbanización las cuales son causantes de destrucción y fragmentación de hábitats, debido a la

pérdida de comunidades vegetales provocada por la herbivoría del ganado, o la nula reversión de los procesos sucesionales, truncados por la infraestructura y la baja disponibilidad de recursos florales y de anidamiento para fauna polinizadora (Lázaro & Tur, 2018), la cual es de gran relevancia para la propagación de especies vegetales y por lo tanto un incremento en su densidad.

En resumen, los cambios de uso del suelo favorecen a la deforestación y esta trae consigo afectaciones en el suministro de servicios de gran importancia para el equilibrio ecosistémico, ejemplo de ello son los servicios de regulación y soporte, donde podemos encontrar el almacenamiento de carbono, la regulación climática e hídrica, el control de la erosión, entre otros (Monroy Hernández, 2022), de ahí que la correcta gestión de las cuencas hidrográficas sea de suma importancia en la conservación de los recursos naturales. En Colombia una cuenca que se ha visto afectada por los cambios de uso del suelo es la cuenca hidrográfica del Río Bogotá que debido al crecimiento demográfico, las actividades industriales y agrícolas han llevado a un deterioro de la calidad del agua por su contaminación con vertimientos y la degradación de sus ecosistemas (Güiza-Suarez et al., 2020), de igual forma, también se observa una presión alta sobre el recurso hídrico evidenciada en el predominio de valores altos del índice de uso del agua y en que aproximadamente el 74% de las subcuencas presentan índices de regulación hídrica entre muy bajo a bajo e índices de vulnerabilidad por desabastecimiento hídrico entre muy alto a alto (Autoridad Nacional de Licencias Ambientales - ANLA, 2020).

De las 19 subcuencas que la conforman las de la parte norte tienen una gran relevancia por ser consideradas zonas de recarga hídrica y de regulación ya que permiten que el agua infiltre en la tierra y se almacene en acuíferos siendo el caso de ecosistemas como los páramos (Jarro, 2004), y al ser áreas de recarga de alta productividad hidrogeológica, son relevantes los esfuerzos para su conservación, debido a que proporcionan una conectividad ecológica y la protección de importantes corredores faunísticos y florísticos. (Autoridad Nacional de Licencias Ambientales - ANLA, 2020), es así como se puede observar una seria problemática en la subcuenca Río Alto Bogotá, la cual cuenta con una parte muy importante de páramos, y donde se pudo identificar que entre 1985 y 2003 se perdieron más de 3000 hectáreas, causadas por la expansión agrícola al implementar cultivos y ganadería en áreas que fueron quemadas o taladas (CAR, 2006). Por otro lado, en ese mismo tiempo hubo un incremento de las zonas urbanas en aproximadamente 4 veces su tamaño inicial, lo cual también es un factor a considerar pues teniendo en cuenta que el río Bogotá es próximo a la carretera central del norte y a las zonas urbanas continuas y discontinuas

de los municipios de Villapinzón y Chocontá, hay una alta concentración de actividades económicas como la agricultura, la ganadería y la industria de curtiembres (CAR, 2006) asunto que puede relacionarse con la presencia de diversos tensionantes sobre los ecosistemas circundantes, dado que las áreas donde se busca aprovechar las tierras con fines productivos, favorecen el retiro de la vegetación riparia, cuando esto ocurre el suelo disminuye su capacidad de retención hídrica y se aumentan los procesos erosivos, los cuales aportan sedimentos a los ríos siendo un factor de gran relevancia en la ocurrencia de inundaciones (Jarro, 2004).

En el caso del municipio de Villapinzón, las intervenciones antrópicas han generado que se evidencie una sensibilidad y vulnerabilidad altas y una baja capacidad adaptativa al cambio climático, esta última dada por la nula existencia de herramientas de planificación para implementar medidas de adaptación a pesar de contar con variados ecosistemas estratégicos. (Espitia Falla, 2020) y aunque desde hace varios años se han venido implementando estrategias de restauración no hay suficiente información actualizada que muestre su eficiencia en la recuperación de las coberturas boscosas de estos sectores o la continuidad en la pérdida de estas por los constantes cambios en los usos del suelo.

5.1. Pregunta de investigación

¿Cuáles han sido los principales cambios en la cobertura del suelo en la subcuenca del río Alto Bogotá entre los años 2016 y 2025, y cómo pueden estos ser analizados mediante herramientas SIG y teledetección para apoyar la toma de decisiones en gestión ambiental y ordenamiento territorial?

6 Antecedentes

El análisis multitemporal es comúnmente utilizado para la evaluación de coberturas y existen variedad de metodologías que permiten clasificar y generar material cartográfico para la toma de decisiones por ejemplo, en el estudio de Barrios Amaya & Ochoa Cáceres (2021) denominado “Análisis Multitemporal De Cambios Del Uso Del Suelo Y Cobertura En La Cuenca Media Del Río Bogotá Desde 2013 A 2020.” realizaron un análisis de multitemporalidad en la parte media de la cuenca del Río Bogotá , para identificar y cuantificar cambios en las coberturas y usos del suelo en un periodo de 7 años comprendido entre el 2013 y 2020, haciendo uso de la metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia y de herramientas SIG e imágenes satelitales con el fin de generar información temática y documental que permitiera conocer los cambios surgidos, logrando evidenciar un aumento de tejido urbano del 28,26%, de cultivos permanentes un 45,71% y un 11,31% en áreas de extracción minera, mostrando de manera concluyente la transformación del territorio, el incremento de la deforestación y la consecuente degradación de los ecosistemas.

García Culqui & Hachi Pazmiño (2022) a través de su investigación “Análisis multitemporal de la dinámica de uso de suelo y cobertura vegetal en la microcuenca del Río Illangama” analizaron los cambios en las coberturas y uso del suelo en un periodo de 25 años que abarca desde 1996 a 2021, utilizando una metodología no experimental de enfoque cualitativo y sumamente descriptivo, haciendo uso de la clasificación supervisada para 6 clases de coberturas, además de incluir el índice Diferencial Normalizado de Vegetación, arrojando en la etapa inicial valores entre -0,41 y 0,48 y para el año final -0,7 y 0,54, indicando disminución de las áreas sin cobertura vegetal.

Pumarejo Cabrera (2024) en su estudio “Análisis de los cambios en la cobertura vegetal en el Sistema Delta Estuarino del Río Magdalena Ciénaga Grande de Santa Marta por medio de imágenes satelitales” Analizó las variaciones de la cobertura vegetal a partir de imágenes Landsat de los años 1996, 2001, 2011, 2016 y 2021 y utilizando el software ArcGIS Pro y así clasificar las coberturas y desarrollar el análisis de estas, encontrando un predominio de las áreas de cultivos, ganaderas y espacios sin vegetación, a su vez se identificaron zonas de poca intervención con bosques de manglar.

Este tipo de análisis también son utilizados en conjunto con otros fines relacionando los resultados de la distribución y el cambio de coberturas con otros fenómenos como ocurre en Shults et al. (2025) en su artículo “Multi-Temporal Remote Sensing Satellite Data Analysis for the 2023 Devastating Flood in Derna, Northern Libya” donde evaluaron las consecuencias de las inundaciones en el área de estudio haciendo uso de imágenes Sentinel-2 y GEOEYE, procesadas en el Google Earth Engine, buscando explorar distintos algoritmos y conjuntos de datos de teledetección con el fin de cuantificar los cambios ocurridos después de la inundación, los métodos de clasificación supervisada fueron Random Forest (RF), Support Vector Machine (SVM), Naïve-Bayes, and Classification and Regression Tree (CART), a su vez se usó el análisis basado en objetos para las imágenes, seguidos del cálculo de Índices de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), obteniendo como resultado cambios en las clases primarias además de los mapas con los que se representaron dichos cambios. Por otro lado, también se puede enfocar en actividades productivas como se puede ver en Escobar-López et al. (2024) en su artículo “Identification of coffee agroforestry systems using remote sensing data: a review of methods and sensor data” en el que realizaron un estudio con el fin de identificar la distribución espacial de Sistemas Agroforestales (SAF’s) de Café haciendo uso de los sensores remotos, aplicando métodos computacionales y datos de satélites para mapearlos, como resultado se evidenció que el de máxima verosimilitud fue el más utilizado además de identificar la importancia de las imágenes multispectrales de alta resolución en el mapeo de SAF’s. Otro caso es el de Valencia & Beltrán (2025) que realizaron un estudio donde buscaban cuantificar los cambios de cobertura del suelo y sus transiciones entre 2014 y 2024 en Tabacundo Ecuador, para ello generaron mapas de cobertura a partir de un análisis multitemporal usando una ortofoto de 2014 y una imagen Sentinel-2 de 2024, además de aplicar un algoritmo de clasificación supervisada llamada Random Forest y procesada Google Earth Engine, obteniendo como resultado que el territorio sufrió una transformación del 45,2% donde incrementaron los invernaderos y disminuyó la cobertura boscosa, dejando como conclusión la pérdida de ecosistemas naturales debido a la expansión de la floricultura intensiva, sumado a lo anterior estos estudios también pueden ser útiles para el sector forestal un caso es el Gutiérrez Villalobos & Tarqui Delgado (2021) en su trabajo “Evaluación multitemporal en plantaciones de eucalipto (*Eucalyptus globulus* L.), con el uso de teledetección y S.I.G. en el municipio de Inquisivi, La Paz” realizaron un análisis de los cambios de uso del suelo y la pérdida de cobertura vegetal evaluando a través de imágenes satelitales la tasa de cambio en plantaciones

de eucalipto entre los periodos 1996, 2005 y 2014, dentro de las metodologías utilizadas está la comparación de coberturas de imágenes satelitales, índices de vegetación y una clasificación supervisada, identificando incrementos en la superficie de plantaciones, suelos desnudos, áreas con poca vegetación y cuerpos de agua, mientras que arbustos y pastizales disminuyeron su área, concluyendo que en el área de estudio las plantaciones tienen un papel importante.

Para el caso de Colombia el análisis multitemporal de coberturas se realiza teniendo en cuenta la Metodología Corine Land Cover, por ejemplo, Suárez-Parra et al. (2016) realizaron un estudio con el fin de evaluar las coberturas de la tierra de la microcuenca de la quebrada la Mecha en Combita, Boyacá, haciendo uso de imágenes satelitales Landsat-8 para los años 2014 y 2015, siendo procesadas con el software ArcGIS y ajustadas con Google Earth Pro, además de implementar en la clasificación de coberturas la metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia, observando como resultado una alta fragmentación de la vegetación de paramo a causa del incremento de áreas de cultivo y de minería, finalmente, se concluye que esta metodología se considera una herramienta de confianza para determinar cambios espaciotemporales de coberturas.

Gutiérrez Mora (2022) en su trabajo de grado “Implementación de la metodología Corine Land Cover para generación de la capa geográfica de coberturas de la tierra del año 2019, escala 1:25000, a partir de imágenes satelitales Planet Scope para la jurisdicción de Corpochivor” realizó un mapa el cual utilizó de insumo imágenes satelitales y aplicó la metodología Corine Land Cover con el fin de interpretar y clasificar coberturas del territorio de estudio, buscando obtener productos gráficos a escala 1:25.000, los cuales mostraron una imagen actualizada de su diversidad de coberturas concluyendo que la clasificación de imágenes por objetos hace más fácil la obtención de mapas de coberturas en comparación con la clasificación por píxeles.

En el análisis de imágenes y en la clasificación de las coberturas se usan diferentes procesos, metodologías y algoritmos buscando mayor precisión para así generar mapas que permitan tomar decisiones más acertadas, Arias-Muñoz et al. (2024) en su investigación “Tendencias de cambio de usos y coberturas de suelo en la cuenca hidrográfica media-alta del río Mira en Ecuador” determinaron el cambio y proyectaron el uso y las coberturas del suelo utilizando imágenes multiespectrales Landsat y Sentinel de los años 1996, 2007 y 2018, pasando por un pretratamiento y un tratamiento, además se hizo la proyección de cambios de 2018 a 2030, arrojando como resultados incremento de zonas urbanas y áreas de cultivo y una disminución de bosques y pastos,

relacionando los cambios a crecimiento demográfico y a actividades económicas como el agrícola, ganadero, minero y forestal.

Ivanova et al. (2025) evaluaron la incidencia del cambio de coberturas vegetales sobre la capacidad de regulación hídrica en la cuenca del Río Cuja, Colombia a través del análisis multitemporal con imágenes satelitales y una clasificación con la metodología Corine Land Cover, esta última hecha con la herramienta “Semi-Automatic Clasificación Plugin del software QGIS, mostrando como resultado un incremento de coberturas en áreas cultivos y zonas urbanizadas a su vez, los pastos pasaron a ser suelos degradados, concluyendo que los cambios en la coberturas no incidieron en la regulación hídrica.

León León et al. (2021) en su artículo “Mapa de coberturas del suelo utilizando imágenes satelitales Sentinel-2 y Landsat-8 del municipio de Covarachía – Colombia” generaron a a partir de imágenes satelitales Sentinel-2 y Landsat-8 un mapa de coberturas del suelo, aplicando una combinación de bandas para obtener una imagen de verdadero color y crear recortes del área de interés, a su vez, implementaron algoritmos de clasificación supervisada y no supervisada, finalizando con una matriz de confusión para medir la efectividad del mapa de cobertura, como resultado, de los algoritmos supervisados el de mayor porcentaje fue máxima probabilidad en imágenes Sentinel-2 con un 92,82% y en Landsat-8 el clasificador de distancias mahalanobis con el 86,77%, mientras que en el caso de los algoritmos no supervisados el clasificador K-means fue el mayor porcentaje para los dos tipos de imagen, la Sentinel-2 con 94,21% y Landsat-8 con 84,99% concluyendo que los supervisados facilitan mejores resultados y favorecen una mejor identificación de coberturas.

García et al. (2024) en su investigación “Detección de cambios en el uso del suelo en el Corredor Ecológico Río Tea (NO España)” analizaron diferentes fuentes de información para cuantificar los cambios de cobertura y uso del suelo del área de estudio entre los años 2015 a 2023, para lograrlo se utilizaron metodologías de clasificación por redes neuronales Artificiales (ANN) y Análisis de Imágenes Basadas en objetos (OBIA) en imágenes Sentinel-2 y PlanetScope, arrojando como resultado una precisión en la clasificación de 80% para Metodología OBIA y PlanetScope, en el caso del Sentinel-2 fue de 70%, mientras que con la metodología ANN y PlanetScope la precisión fue del 55%, concluyendo la importancia de la utilidad de los datos geoespaciales disponibles para identificar y cuantificar los cambios en el uso del suelo, además de no detectar cambios considerables en las coberturas.

Toro Espinoza & Artos Usuy (2024) evaluaron la calidad ambiental ecosistémica de la subcuenca del Río Lita en Ecuador utilizando herramientas de teledetección para poder observar los cambios de uso del suelo a partir de imágenes Landsat en los años 2015 y 2023, para su respectivo análisis aplicaron una clasificación supervisada la cual se validó mediante índices de kappa y de exactitud global, identificándose 7 clases de coberturas y donde se observó un aumento para el 2023 del 16% en cultivos y una reducción del 4,1% en bosques y 0,7% en paramo, además se obtuvo un índice de calidad ambiental negativo, concluyendo en un desequilibrio ecosistémico y pérdida de biodiversidad y servicios ecosistémicos.

Ezaidi et al. (2022) en su estudio “Multi-temporal Landsat-derived NDVI for vegetation cover degradation for the period 1984-2018 in part of the Arganeraie Biosphere Reserve (Morocco)” evaluaron en Marruecos la degradación de la cubierta vegetal en un periodo de 30 años haciendo uso del índice de vegetación de diferencia normalizada con la aplicación de la técnica de detección de cambios de diferencia de imagen y la clasificación IsoData, logrando observar que los últimos 10 años estudiados presentaron mayor degradación, específicamente por la ocurrencia de incendios forestales, concluyendo la importancia de utilizar los cambios del NDVI a largo plazo para evaluar los daños de causa antrópica y los cambios del NDVI a corto plazo para tener un mejor análisis cronológico de la degradación existente.

Ozyavuz et al. (2015) determinaron cambios en la intensidad de la vegetación haciendo uso de imágenes Landsat de los años 1987, 2002 y 2012, además de aplicar el NDVI, realizando inicialmente la rectificación de las imágenes, seguido de una corrección radiométrica y la clasificación NDVI, dando como resultado del análisis de precisión un 78% para el año 1987, 76% para el 2002 y 80% en 2012 además de un índice de Kappa de 0,6903, 0,6731 y 0,7085 para estos 3 años respectivamente.

(Aslan & Koc-San, 2021) en su artículo “The Use of Land Cover Indices for Rapid Surface Urban Heat Island Detection from Multi-Temporal Landsat Imageries” analizaron los efectos de la isla de calor urbana superficial y los cambios en la cobertura y usos del suelo entre los años 2002 a 2020, para ello usaron imágenes Landsat y aplicaron varios índices, entre los que se encuentran Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI), Índice de Agua de Diferencia Normalizada Modificado (MNDWI) y el Índice Construido Basado en índice (IBI), arrojando que estos pueden utilizar de manera eficaz para determinar las

coberturas y usos del suelo urbano, de vegetación y de agua donde la precisión se encuentra entre 89,60% y el 95,90%.

Acevedo Moreno (2024) realizó un estudio denominado “Identificación de coberturas mediante procesamiento de imágenes satelitales para monitoreo del paisaje ecológico” donde buscaba generar una metodología haciendo uso de técnicas de procesamiento de imágenes satelitales que permitiera realizar la clasificación e identificación de coberturas en el municipio de Carmen de Viboral, para desarrollarlo utilizó Google Earth Engine y para la clasificación supervisada entrenó distintos modelos entre los que se encuentran Random Forest (RF), Clasificación and Regression Trees(CART) entre otros, identificando coberturas de bosque, cultivos, pastos, suelo desnudo y áreas de origen antrópico, además se validaron los modelos y se obtuvieron matrices de confusión de cada uno para evaluar su rendimiento, teniendo como resultado similitudes en varias zonas de cada cobertura.

Chomani & Pshdari (2024) en su artículo “Evaluation of Different Classification Algorithms for Land Use Land Cover Mapping” evaluaron diferentes algoritmos para identificar cual tiene mayor precisión a la hora de clasificar y generar coberturas y usos del suelo confiables, para ello usaron el software ArcGIS Pro y Google Earth Engine e imágenes Landsat-8 y Sentinel-2, los algoritmos para evaluar las imágenes fueron Maquinas de Vectores de Soporte (SVM), Bosques aleatorios o Random Forest (RF), Máxima Verosimilitud y árboles de clasificación y regresión (CART) entre otros, y para conocer el rendimiento de cada uno se utilizaron coeficientes Kappa, como resultado Random Forest presentó la mayor precisión con la imagen Sentinel-2 con un 83% y también se observó que la mayoría de algoritmos trabajaron mejor con Sentinel-2 que con Landsat-8, siendo estas imágenes las más adecuadas para mapear las coberturas y usos del suelo de forma más precisa.

Bill Donatien et al. (2024) en su estudio “Land use land cover change detection using multi-temporal Landsat imagery in the North of Congo Republic: a case study in Sangha region” evaluaron los cambios de coberturas y usos del suelo de los años 2013, 2018 y 2023 teniendo como insumo imágenes OLI Landsat-8, además de implementar el algoritmo Support Vector Machine (SVM) para la detección de cambios, obteniendo una disminución considerable de los bosques de humedales y cuerpos de agua en 33,78% y 19,22% respectivamente, por otro lado, las coberturas que presentaron un aumento fueron bosques abiertos, áreas urbanas y suelos desnudos.

Rentería Cárdenas (2024) en su tesis “Análisis comparativo del rendimiento de clasificación supervisada en imágenes compuestas y modificadas por reducción en PNN los nevados y alrededores” muestra como determinar el rendimiento de las imágenes satelitales comparando las de bandas compuestas sin modificación y con bandas modificadas por reducción con el fin de clasificar las coberturas del área estudiar, teniendo como resultado una concordancia entre las clasificaciones obtenidas y las condiciones reales del terreno en ambas tipos de imágenes, y donde las asociadas a las obtenidos por reducción tienen levemente un valor mayor.

Liang et al. (2022) en su artículo “Land Use Classification Based on Maximum Likelihood Method” se analizó el uso del suelo de la cuenca del Río Minjiang realizando una clasificación supervisada bajo el método de máxima verosimilitud, teniendo como resultado áreas de bosque, cultivos, suelos no utilizados, terrenos en construcción y cuerpos de agua, donde la cobertura forestal fue la de mayor proporción con 65,42%, llegando a la conclusión que la cuenca presenta un buen entorno ecológico y una alta cobertura vegetal.

Agus et al. (2023) realizaron un estudio con el objetivo de identificar y evaluar las coberturas y usos del suelo de la ciudad de Samarinda, para ello utilizaron imágenes Landsat 5, 7 y 9 para el periodo comprendido entre 1994 a 2022, además de puntos de control en terreno, para determinar las coberturas aplicaron una clasificación supervisada con el método de máxima verosimilitud a las coberturas vegetación no cultivada, cultivada, cuerpos de agua y áreas edificadas, dando como resultado una disminución de las áreas no cultivadas y cultivadas con un 6,38% y 5,52% respectivamente, a su vez las coberturas que aumentaron fueron los cuerpos de agua en un 2,39% y los terrenos edificados con un 9,51%, lo cual indica cambios en las coberturas de la ciudad en los últimos 30 años.

Liang et al. (2020) en su artículo “Maximum Likelihood Classification of Soil Remote Sensing Image Based on Deep Learning” propusieron un método de clasificación de imágenes satelitales, realizando un preprocesamiento, seguido del uso de un algoritmo de aprendizaje profundo y un algoritmo de máxima verosimilitud para clasificar la imagen, arrojando como resultado una efectividad del método para segmentar la imagen con una precisión alta, demostrando que el método es superior y efectivo.

Basheer et al. (2024) en su investigación “A comparative analysis of PlanetScope 4-band and 8-band imageries for land use land cover classification” evaluaron el rendimiento del sensor superDove de PlanetScope, con la comparación de dos imágenes con combinaciones de bandas

distintas una de 4 y la otra de 8, además de procesarlo en ArcGIS Pro para el año 2021, por otro lado, utilizaron clasificación supervisada incluyendo métodos de Máquina de Vectores de Soporte (SVM), K-Vecinos Más Cercanos (KNN), Bosques aleatorios (RF), Y Máxima Verosimilitud (ML), donde las coberturas principales fueron bosque agricultura, vegetación, suelos desnudos, cuerpos de agua y áreas urbanas, seguido a esto se evaluó la precisión con el coeficiente kappa, de esta manera los resultados mostraron que la mayor precisión se observó con imágenes de 8 bandas y el clasificador SVM, concluyendo que este clasificador funciona bien con este tipo de imágenes siendo de potencial en la clasificación de coberturas y usos del suelo en comparación a las de 4 bandas.

7 Justificación

A nivel global los retos a enfrentar en el ámbito social, económico y ambiental se establecen en los 17 objetivos de desarrollo sostenible, los cuales se han enfocado en mejorar las condiciones de vida de las personas, poner fin a la pobreza y proteger el planeta, y de los cuales podemos destacar los objetivos 6, 13 y 15 que abarcan temas como agua limpia y saneamiento, acción por el clima y vida de ecosistemas terrestres respectivamente (Moran, s. f.), temas de importancia que fundamentan el estudio de la subcuenca Río Alto Bogotá, debido a la presencia de los municipios de Villapinzón y Chocontá, donde el 30% de su población se ubica en el área urbana mientras que el 70 restante en la zona rural, y que a su vez presentan deficiencias en el servicio de abastecimiento de acueducto y alcantarillado, características a tener en cuenta en el ámbito del saneamiento básico, igualmente se le suma que las actividades económicas que allí se realizan como la industria de curtiembres, la agricultura y la ganadería la convierten en el punto de inicio de la afectación por contaminación del río Bogotá (CAR, 2006), por otro lado, es de interés la susceptibilidad a inundaciones de este sector, el cual tiene un antecedente de desbordamiento del río Bogotá por fuertes lluvias presentadas en el año 2010, teniendo como factor de relevancia la deforestación de su ronda (Contreras Contreras & Contreras Contreras, 2021), asunto que se aguza con los efectos del cambio climático y los cambios de uso del suelo y la modificación del paisaje.

Es así como los entes gubernamentales han iniciado labores que contrarrestan estos efectos, los cuales van desde la implementación de la sentencia emitida en el año 2014 por el consejo de estado, la cual busca establecer medidas que permitan la recuperación y conservación integral de la cuenca hídrica del río Bogotá (Moya Ángel & Párraga, 2014) hasta su integración en los documentos de ordenación territorial entre los que se encuentran los Esquemas de Ordenamiento Territorial (EOT) de los municipios de Villapinzón y Chocontá, el Plan de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca Hidrográfica (POMCA) del Río Bogotá, además del convenio 279 de 2015 hecho para la identificación de las áreas a restaurar (CAR, 2019b). Estos esfuerzos buscan un equilibrio entre lo económico, social y ambiental del sector, por tal razón, es importante conocer los cambios de coberturas del suelo tanto positivos como negativos presentados en los últimos años y de esta manera se puedan seguir tomando decisiones de gran relevancia para la gestión de la subcuenca y a su vez para la recuperación del río Bogotá.

Una manera de aportar al conocimiento de los cambios de las coberturas del suelo en la subcuenca Río Alto Bogotá es a través del análisis multitemporal que según Riaño (2002) consiste

en establecer diferencias de un fenómeno a través de la adquisición de información de épocas diferentes (Citado en Niño Martínez, 2020, p. 25), y con el uso de imágenes satelitales de los últimos 10 años busca conocer si la vegetación riparia ha ido en aumento o se conserva, si los sitios asociados a restauración ecológica han mejorado su cobertura boscosa o si en definitiva el desarrollo económico y los cambios de uso del suelo siguen generando cambios negativos para el bienestar de la parte alta de la cuenca del río Bogotá.

8 Objetivos

8.1 Objetivo general

Analizar las transformaciones en la cobertura del suelo en la Subcuenca Río Alto Bogotá durante el período comprendido entre 2016 y 2025, mediante el procesamiento de imágenes satelitales y la aplicación de herramientas de análisis espacial, con el propósito de identificar los cambios más relevantes ocurridos en el territorio a lo largo del tiempo.

8.2 Objetivos específicos

- Realizar un análisis visual de las transformaciones espaciales en la cobertura del suelo entre los años 2016 y 2025, a partir del procesamiento de imágenes satelitales mediante combinaciones de bandas e índices espectrales, con el fin de caracterizar los cambios detectados en la Subcuenca Río Alto Bogotá.
- Cuantificar la variación temporal de la cobertura del suelo durante el período de estudio, identificando las áreas dentro de la subcuenca que han experimentado los mayores niveles de alteración.
- Formular propuestas y recomendaciones orientadas a la gestión territorial y la conservación ambiental, con base en los resultados obtenidos del análisis espacial y multitemporal realizado sobre la Subcuenca Río Alto Bogotá.

9 Hipótesis

9.1 Hipótesis de trabajo

La transformación de la cobertura del suelo presentada en la Subcuenca Río Alto Bogotá entre el periodo de 2016 a 2025 está relacionada con el incremento de la intervención antrópica, especialmente la expansión urbana, lo cual ha generado una reducción significativa de la cobertura vegetal, evidenciada mediante el análisis multitemporal y el índice NDVI.

Se considera la siguiente relación entre variables:

- **Variable independiente:** nivel de intervención antrópica (urbanización, cambio de uso del suelo).
- **Variables dependientes:** cambios en la cobertura del suelo y variación en los valores del NDVI (cobertura vegetal).

9.1.1 Hipótesis nula

No existe relación significativa entre los cambios en la cobertura del suelo y la intervención antrópica en la subcuenca Río Alto Bogotá entre el periodo de 2016 a 2025; los valores del NDVI y la cobertura permanecen estables o varían sin conexión directa con las actividades humanas.

9.1.1.1 Hipótesis alterna.

Existe una relación significativa entre la intervención antrópica y los cambios en la cobertura del suelo en la Subcuenca Río Alto Bogotá entre el periodo de 2016 a 2025, reflejada en la pérdida de cobertura vegetal según el análisis NDVI y multitemporal.

9.1.1.1.1 Variables.

En el contexto de la subcuenca Río Alto Bogotá, resulta fundamental realizar un análisis de los cambios en la cobertura del suelo, con el propósito de identificar las transformaciones espaciales y temporales que han tenido lugar en esta región.

A continuación, se presentan las variables relacionadas con la hipótesis planteada, clasificadas según su tipo, junto con la definición de su operatividad e indicadores, tal como se resume en la Tabla 1.

Tabla 1 Identificación de variables

Nombre de la variable	Tipo	Definición operacional	Indicador
Intervención antrópica	Independiente	Nivel de impacto humano en el territorio (urbanización, agricultura, deforestación)	Áreas transformadas, expansión urbana
Cobertura del suelo	Dependiente	Distribución espacial de clases cobertura del suelo	Cambios de clase (bosque → urbano, etc.)
Cobertura vegetal (NDVI)	Dependiente	Índice que refleja la densidad y salud de la vegetación	Variación del NDVI (-1 a +1)
Tiempo (2016–2025)	Temporal	Comparación multitemporal en los años definidos	Año de captura de imágenes satelitales

Nota. Se establecen las variables de la investigación y se relaciona el tipo, definición e indicador de estas. Fuente: Propia.

10 Marco teórico

- **Las coberturas, los usos del suelo y la importancia de la Metodología CORINE Land Cover para clasificación:**

Las coberturas de la tierra se refieren a la descripción de los materiales físicos presentes en la superficie terrestre, mientras que el uso del suelo considera los cambios hechos a las coberturas (Suárez Londoño et al., 2017), Las coberturas se clasifican visualmente a través de la interpretación de imágenes satelitales, en ellas se pueden observar los cambios en cortos o largos periodos de tiempo, y a partir de ellos definir sus posibles consecuencias, teniendo en cuenta que los cambios en el uso del suelo se deben a la acción del hombre lo cual modifica la superficie terrestre llevando a pérdidas, fragmentación y destrucción de hábitats naturales (Lázaro & Tur, 2018). Asimismo, la identificación de las modificaciones en las coberturas permite estudiar las diferentes interacciones del entorno y sus comunidades faunísticas y florísticas dado que se puede tener un registro de los recursos presentes y de los cambios, información de relevancia para entender las dinámicas de los mismos (Perea-Ardila et al., 2022), y a partir de estos realizar una correcta toma de decisiones, que favorezca a acciones positivas, por ejemplo, aumentar las coberturas boscosas o mantenerlas permite preservar los ecosistemas del área, además de ampliar el área de conservación, su biodiversidad y los servicios ecosistémicos que este presta, tal es el caso de zonas donde hay cambios del uso del suelo que llevan consigo el incremento de recursos florales favoreciendo la presencia de organismos polinizadores, los cuales se consideran un impacto positivo (Lázaro & Tur, 2018).

En términos de gestión del territorio y planificación del mismo se hace uso de metodologías que suministren información sobre los cambios en las coberturas de un área para establecer las acciones a tomar y los documentos base a elaborar, así pues en el ámbito nacional estos se determinan a través de la Metodología CORINE LAND COVER adaptada para Colombia escala 1:100.000 (IGAC, 2021), además de la aplicación de técnicas de análisis espacial que incluyen el uso de la teledetección y la clasificación, la cual ayuda a generar categorías de un área con base en unas variables que se evalúan para determinar similitudes entre las clases existentes y las opciones posibles (Olaya, 2020). Esta metodología inició con la creación del programa CORINE Land Cover por la Unión Europea en 1985 establecida con el fin de recolectar datos y organizarlos para conocer el estado de los recursos naturales y el medio ambiente, y actualmente brinda información acerca de la cobertura terrestre, los usos del suelo y sus cambios. En el caso de Colombia se creó una

adaptación con la cual se implementó la zonificación de las coberturas de la tierra de la Cuenca Magdalena-Cauca a escala 1: 100.000 y que se realizó para caracterizar las coberturas naturales y antropizadas, además de ser usada como instrumento de ordenación (IDEAM, IGAC Y CORMAGADLENA, 2008), finalmente en el año 2010 usando como base la anterior información se construyó la Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra, Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia escala 1:100.000 (Martínez Ardila & Murcia García, 2010). Con esta metodología los conocimientos sobre Sistemas de Información Geográfica y la Teledetección se puede realizar un análisis multitemporal que permita ver los cambios ocurridos en diferentes periodos de tiempo.

- **La Teledetección y los Sistemas de Información Geográfica en el análisis de coberturas:**

Los Sistemas de Información Geográfica SIG se consideran un elemento de análisis, presentación e interpretación de hechos relacionados con la superficie terrestre (Olaya, 2020), aunque una manera más concreta es definirlo como una herramienta que integra datos geográficos, hardware y software para capturar, almacenar, gestionar y analizar información geográfica con la finalidad de solucionar problemas de planificación y gestión del territorio (IGAC, 2023), lo cual adquiere una gran relevancia a la hora de observar la presencia o ausencia de coberturas en un área determinada debido a la posibilidad de estudiarlas de forma cuantitativa a través del análisis espacial, el cual es variado ya que permite realizar consultas espaciales, analizar la topología, medir o combinar información, entre otras (Olaya, 2020), igualmente, esta tecnología permite crear, organizar y manipular datos geográficos de manera más sencilla y de forma simultánea, ayudando a la realización de procesos como el análisis multicriterio con el fin de hacer que estos datos sean útiles y favorezcan a la toma de decisiones en determinado espacio (Toro Espinoza & Artos Usuy, 2024), siendo la interrelación espacial de diferentes tipos de información obtenidos de variadas fuentes como uno de los beneficios más importantes de los SIG (Lillesand et al., 2015).

Por otro lado, la percepción remota o también conocida como teledetección es una ciencia que tiene como función conseguir información de objetos con los cuales no se ha tenido contacto directo y donde a partir de sensores se pueden recoger datos del espacio exterior, aire, agua, suelo y otros más (Arellano Verdejo et al., 2024) esto se logra con la medición de las perturbaciones generadas en el entorno por los objetos, las cuales son de tipo electromagnético (Olaya, 2020). Según Chuvieco (2008), es fundamental la presencia de tres componentes esenciales, el sensor, el objeto observado y flujo de energía que los conecta, además, la información que capta un sensor

remoto se puede obtener a través de tres mecanismos principales: la reflexión, la emisión y la emisión-reflexión (Citado en Rentería Cárdenas, 2024, p. 20). A su vez, cuando se presenta la interacción del sensor con el objeto, para cualquier radiación dada al alcanzar a este último se generan tres fenómenos, la absorción, que ocurre cuando el objeto toma la energía de la radiación, luego esta atraviesa el objeto y sigue su camino lo cual se conoce como la transmisión y por último está la reflexión donde la radiación rebota en el objeto y regresa al espacio (Olaya, 2014), siendo de gran importancia para la teledetección la que es reflejada ya que esta se emplea posteriormente en la generación de las imágenes satelitales, mismas que permiten realizar la evaluación y el monitoreo de las coberturas y usos del suelo (Perea-Ardila et al., 2022).

- **Las imágenes satelitales y su procesamiento:**

Con el uso de las imágenes satelitales, los datos de teledetección son empleados comúnmente en el mapeo y monitoreo de la vegetación, por ejemplo, en inventarios de cobertura vegetal o la evaluación de su crecimiento, además de la estimación del rendimiento y producción (Ozyavuz et al., 2015). Las Imágenes satelitales se definen como representaciones visuales de datos obtenidos a través sensores ubicados en satélites artificiales (Lozano Rodriguez, 2024), de forma general las imágenes pueden ser muy útiles en los SIG por la información almacenada en ellas, y la metodologías útiles para su procesamiento y análisis, debido a que pasan por distintos procesos como correcciones, mejoras y extracción de información lo cual implica el uso de diferentes tipos de análisis según las necesidades, pudiendo realizarse de forma manual o automatizada (Olaya, 2014).

Para el procesamiento de las imágenes, se debe realizar un preprocesamiento para eliminar las imprecisiones que aparecen cuando el sensor capta la información, estas correcciones se realizan de manera individual en cada una de las bandas, los principales tipos de deficiencias a corregir son: las geométricas y radiométricas (Olaya, 2020), debido a variaciones espaciales que se dan por el movimiento del sensor durante la adquisición de los datos se hace necesario el uso de correcciones geométricas, las cuales buscan hacer ajustes a la geometría de la imagen satelital a un sistema de referencia espacial definido (Gutiérrez Villalobos & Tarqui Delgado, 2021)

Hay distintos tipos de imágenes como las Sentinel, Landsat y PlanetScope entre otras, estas últimas no necesitan de correcciones ya que vienen corregidos radiométrica y geoméricamente, donde la corrección geométrica utiliza modelos digitales de elevación de alta precisión (Planet, 2020). Planet ofrece tres líneas de productos para imágenes PlanetScope: un producto Basic Scene,

un producto Ortho Scene y un producto Ortho Tile. (Gutiérrez Mora, 2022), PlanetScope es una constelación o grupo de satélites artificiales la cual obtiene imágenes de la tierra todos los días, y es operada por la empresa Planet Labs (Florez Alcalá, 2023), se compone de un poco más de 150 satélites pequeños llamados doves, mismos que trabajan imágenes con una resolución espacial promedio de 3,7 metros, además genera productos multibanda en las que se incluyen RGB y NIR (Olaya, 2020).

- **Análisis SIG y la multitemporalidad:**

Una operación habitual en el análisis SIG es la clasificación, esta se da debido a que las imágenes Satelitales están conformadas por un numero incontable de pixeles, a los cuales se les asigna una categoría con base en su vector y se compara con un conjunto de pixeles predefinidos, donde al finalizar se logra obtener una imagen con varias clases que representan distintos grupos de coberturas (Toro Espinoza & Artos Usuay, 2024). El principal objetivo de la clasificación de imágenes es generar categorías agrupando a los pixeles de una imagen en clases que contienen una reflectancia espectral o emisividad similar y con las cuales se puedan representar las diferentes coberturas de la superficie (Lillesand et al., 2015) teniendo en cuenta la información que se busca extraer, las clases se relacionan a características del terreno que sean conocidas o en su defecto que presenten diferencias (Florez Alcalá, 2023). Los métodos para clasificar las coberturas a través de imágenes pueden ser de tipo supervisado o no supervisado. La clasificación supervisada es un tipo de clasificación que necesita que se establezca claramente la firma espectral adecuada para cada clase a evaluar (Olaya, 2020), su proceso se basa en asignar a un punto un conjunto de valores que se asocian a una clase o área con una determinada firma espectral denominadas zonas de entrenamiento, buscando se identifiquen todas las áreas con características similares (Florez Alcalá, 2023), en conclusión, es importante que el evaluador tenga un conocimiento base del área a intervenir y de sus coberturas, para que posea una idea de que representan los pixeles en la imagen seleccionada (Severino Jiménez, 2024).

Las clasificaciones con frecuencia son utilizadas para establecer las coberturas y usos del suelo aplicando técnicas de análisis visual y procesamiento de imágenes (Perea-Ardila et al., 2022) evaluando la presencia de coberturas en diferentes instantes de tiempo, dado que si se desea realizar un análisis de cómo evoluciona un evento en un determinado periodo de tiempo se debe hacer uso de imágenes que cubran los tiempos deseados, además de incluir procesos previos al análisis para generar compatibilidad entre todas las imágenes utilizadas para así poderlas comparar (Tristán et

al., 2008). A partir de un análisis multitemporal se puede inferir el desarrollo de un hábitat natural o las transformaciones negativas que la acción del hombre ejerce sobre las mismas, esto debido a que permite identificar cambios presentados en distintas épocas (Montero et al., 2023), para lograrlo se hace uso de variadas técnicas entre las que se encuentran las composiciones, cocientes y vectores multitemporales, diferencias entre imágenes y regresión (Atencia Vergara et al., 2008) al haber gran cantidad de imágenes disponibles es necesario realizar un análisis detallado, y para ello se usan imágenes de sensores que brinden la mayor resolución temporal posible (Tristán et al., 2008), cabe aclarar que para analizar las imágenes satelitales se tienen en cuenta cuatro tipos de resoluciones, espacial, espectral, temporal y radiométrica (Arellano Verdejo et al., 2024).

Por otro lado, los estudios multitemporales se pueden considerar como un método dinámico para la interpretación de imágenes satelitales y es un gran aporte a diferentes estudios realizados en la superficie terrestres (Barrios Amaya & Ochoa Cáceres, 2021) como es caso del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), el cual consiste en algoritmos para calcular el vigor de la vegetación mostrando la biomasa fotosintética activa (Lozano Rodriguez, 2024) y con esto monitorear sus cambios en diferentes periodos estacionales, además de ser usado eficazmente como indicador de su estado al identificar su presencia o ausencia, aunado a su distribución espacio-temporal (Montero et al., 2023).

11 Metodología

La presente investigación adopta un enfoque cuantitativo con un componente espacial y multitemporal, fundamentado en el análisis de datos obtenidos mediante sensores remotos y Sistemas de Información Geográfica (SIG). El enfoque cuantitativo permite medir de manera objetiva los cambios ocurridos en la cobertura del suelo y en la vegetación a lo largo del período 2016–2025, a partir de datos numéricos y métricas derivadas de imágenes satelitales. Este enfoque es adecuado para el análisis multitemporal, ya que facilita la comparación entre periodos, la cuantificación de áreas transformadas y la identificación de patrones espaciales mediante herramientas estadísticas y geoespaciales.

La metodología se estructuró en tres fases principales, las cuales se muestran a continuación:

11.1 Fase I: Recolección y preprocesamiento de imágenes satelitales

Esta fase consistió en la obtención y preparación de los datos satelitales para el análisis posterior. Se seleccionaron imágenes multitemporales cada dos años para el periodo de tiempo comprendido entre 2016 a 2025, provenientes de los sensores de empresa Planet Labs Inc.

Las imágenes fueron descargadas a través de la plataforma PlanetScope: <https://www.planet.com/explorer/>, en la cual se realizó el registro con el correo institucional. La página cuenta con 5 pasos iniciales para la selección de las imágenes: 1. Se selecciona el área de interés para este caso la subcuenca Rio Alto Bogotá, 2. Se especifican los filtros necesarios como la cobertura de nubes cercana al 0%, 3. Se escogieron los rangos de fechas (2016 – 2025), 4. Se agrega la orden de imágenes que se desea descargar y 5. Se realiza la orden como se muestra en la Figura 2.

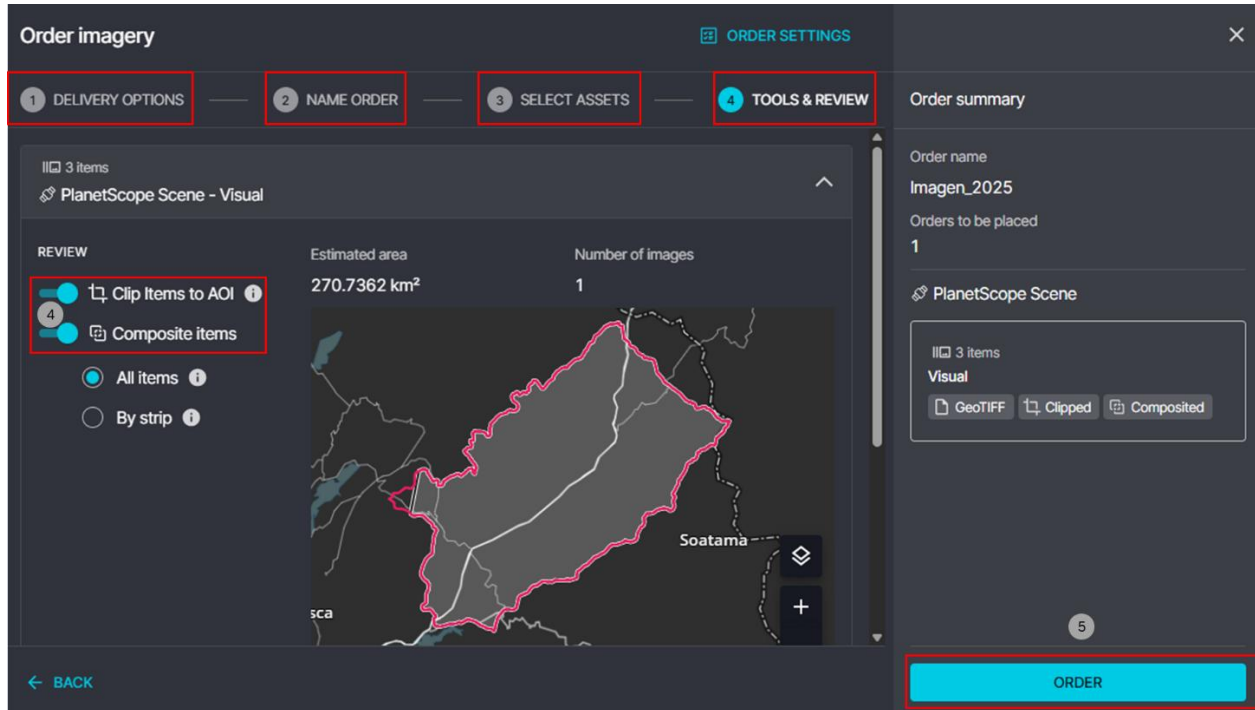
Figura 2 Selección de imágenes para descargar de Planet Labs Inc.



Fuente: Imagen tomada de Planet Labs Inc y modificada.

Por último, se realizan 6 pasos para la descarga de las imágenes de Planet Labs Inc: 1. Se selecciona el formato de las imágenes para este caso se escogió el formato Geotiff, 2. Se les asigna el nombre a las imágenes, 3. Se selecciona el tipo de bandas que se desean descargar lo cual se procedió a descargar las bandas RGB y NIR, 4. Se activan las pestañas de como queremos descargar las imágenes, se activaron las pestañas de; recortar al polígono en este caso el de la subcuenca Rio Alto Bogotá y que solo nos descargue una sola imagen y 5. Se realiza la orden y se descargan las imágenes como se muestra en la Figura 3.

Figura 3 Orden para la descarga de imágenes de Planet Labs Inc.



Fuente: Imagen tomada de Planet Labs Inc. y modificada.

Las imágenes se descargaron con correcciones atmosféricas y radiométricas automáticas, a su vez se tuvo en cuenta verificaciones como: tamaño de celda (misma resolución en todas las imágenes), extensión, sistemas de coordenadas. Este procedimiento aseguró la comparabilidad entre escenas y redujo interferencias relacionadas con condiciones atmosféricas.

11.2 Fase II: Clasificación de las principales coberturas del suelo y análisis de cambios

Con las imágenes descargadas, se realizó una interpretación visual de coberturas del suelo y se clasificaron mediante la metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia, por su rigurosidad técnica, estandarización nacional y alineación con estándares internacionales (IDEAM, (2018)). A partir de la revisión visual de las imágenes se definieron previamente las clases de cobertura del suelo pertinentes al área de estudio. Teniendo en cuenta la resolución de las imágenes y las coberturas que se evidencian con esta, se clasificaron en los niveles 1 y 2 según la metodología ya mencionada, y se seleccionaron las coberturas: Zonas urbanizadas, pastos, bosques, áreas abiertas o con poca vegetación y aguas continentales. En la Tabla 2 se muestra los niveles, así como una descripción de las coberturas de suelo que se eligieron.

Tabla 2 Clasificación de coberturas

Nivel I	Nivel II	Descripción
Territorios artificializados	1. Zonas urbanizadas	Abarcan zonas que involucran infraestructura urbana, comercial, industrial y redes de comunicación clasificándose en un uso de suelo denominado infraestructura.
Territorios agrícolas	2. Pastos	Estos incluyen áreas dedicadas a la producción de alimentos, fibras y otras materias primas de uso industrial. Se pueden incluir suelos con presencia de cultivos transitorios, permanentes, zonas agrícolas heterogéneas y pastos, es decir, áreas con una marcada acción antrópica
Bosques y áreas seminaturales	3. Bosques	Comprende espacios naturales o seminaturales donde predominan los árboles.
	4. Áreas abiertas o con poca vegetación	Las conforman áreas donde la cobertura vegetal no existe o es escasa y que se compone principalmente por suelos desnudos y quemados formados por procesos naturales o antrópicos.
Superficies de agua	5. Aguas continentales	Engloba cuerpos y cauces de aguas permanentes, intermitentes y estacionales, entre las que se encuentran ríos, lagos, lagunas, canales y cuerpos de aguas artificiales entre otros.

Nota. Se presenta la clasificación de coberturas usadas en la investigación su nivel y descripción.

Así mismo se generó el índice NDVI para complementar dicho análisis visual, esto como un complemento y acercamiento inicial a la identificación e interpretación de los cambios en las coberturas.

Se calculó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) para los seis años evaluados entre el 2016 a 2025, mediante la herramienta de índices de ArcGIS Pro con el propósito de evaluar la cobertura vegetal. El NDVI se obtiene de la siguiente fórmula (Pettorelli, N., Vik, J. O., Mysterud, A., Gaillard, J. M., Tucker, C. J., & Stenseth, N. C. (2005)):

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

Donde:

NIR: Representa la banda del infrarrojo cercano

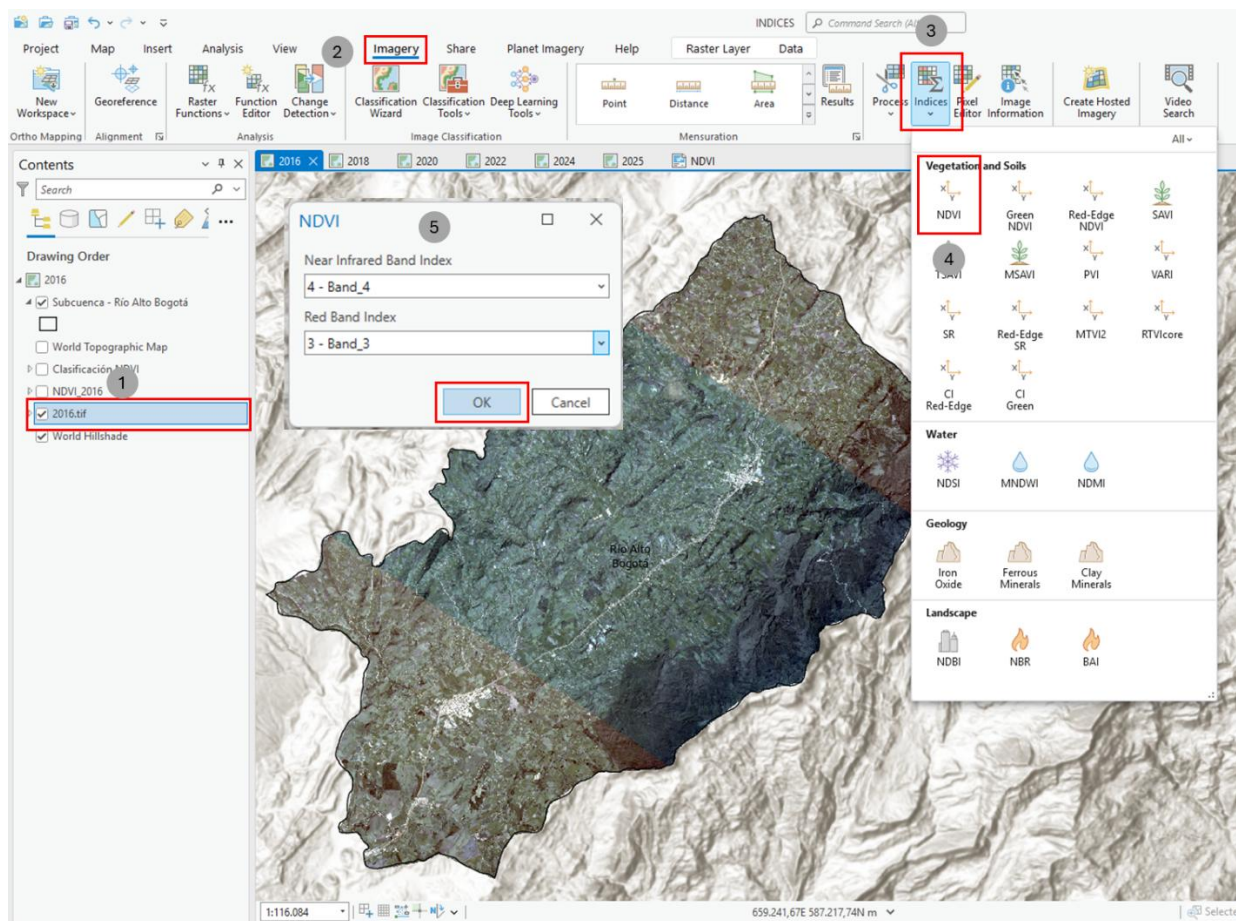
RED: La banda del rojo visible

Nota: Los valores más altos indican mayor densidad de vegetación.

El cálculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) mediante la herramienta de índices de ArcGIS Pro se calcula de la siguiente manera: 1. Se selecciona la imagen

a la que se le va a realizar el cálculo del índice, 2. Dirigirse a la pestaña imágenes, 3. Desplegar el panel índice, 4. Seleccionar el índice a calcular en este caso el NDVI, y 5. Seleccionar las bandas en este caso la banda 4 o la banda del infrarrojo cercano y la banda 3 en este caso la banda roja, por último, se selecciona Ok y se obtiene el resultado del índice como se muestra en la Figura 4.

Figura 4 Calculó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)



Fuente: Imagen tomada de ArcGIS Pro y modificada.

Según Ríos., et al (2014) en su trabajo comenta que el índice espectral NDVI varía en 1 y -1, donde:

Valores cercanos a -1: podrían corresponder a zonas de aguas

Valores cercanos a 0: podría corresponder a zonas urbanizadas o suelos desnudos

Valores cercanos a 1: podría corresponder a zonas con vegetación.

Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado se realiza una reclasificación de los valores del NDVI como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3 Rangos de reclasificación de NDVI. Tomado de Ríos., et al (2014).

Clase	Valores de NDVI	Cobertura de la tierra	Descripción
1	< -0.1	Clases no vegetales	Ríos, quebradas, lagunas, nubes
2	-0,1 – 0,15	Tierra desnuda	Tierras degradadas, asentamientos, vías, suelo sin cobertura vegetal
3	0,15 – 0,25	vegetación dispersa	Tierras cultivadas, herbazales, arbustos, pastizales, terreno arado para cultivo
4	0,25 – 0,40	vegetación abierta	vegetación leñosa, plantación arbustiva, bosque seco
5	> 0,40	vegetación cerrada	Plantas densas en crecimiento, bosque húmedo

A partir de los mapas NDVI generados en ArcGIS Pro, se realizó una comparación multitemporal para apoyar a identificar áreas con pérdida significativa de vegetación o cambios de vegetación a suelos desnudos o asentamientos. Esta información se relacionó espacialmente con datos de expansión urbana, infraestructura y uso del suelo para interpretar posibles causas.

Una vez obtenidos los mapas rasters de cobertura para los seis años analizados (2016, 2018, 2020, 2022, 2024 y 2025), por medio de la clasificación supervisada por Máxima Verosimilitud (Maximum Likelihood Classification), ampliamente reconocida por su robustez estadística y precisión en estudios de teledetección (Richards & Jia, 2006; Jensen, 2005), se llevó a cabo un análisis visual de transformaciones espaciales, donde se identificaron áreas de cambio notorio, expansión urbana, deforestación, revegetación y reducción o aumento de cuerpos de agua.

Seguidamente se hizo el análisis multitemporal que permite evaluar la dinámica del uso y cobertura del suelo mediante la comparación de imágenes clasificadas en distintos momentos, facilitando la detección de cambios espaciales y temporales relevantes en el territorio (Lillesand et al., 2015; Jensen, 2005).

Para identificar los píxeles que presentaron al menos un cambio en la cobertura del suelo a lo largo del periodo 2016–2025, se implementó una expresión lógica en la herramienta Raster Calculator de ArcGIS Pro. Esta técnica permite generar un ráster binario donde se distingue entre las áreas estables (valor 0) y aquellas que experimentaron alguna transformación en cualquier

intervalo del análisis (valor 1). Este enfoque es altamente efectivo para visualizar la magnitud espacial total de las transformaciones territoriales (Lillesand et al., 2015; ESRI, 2024). Para calcular el área total del polígono que tuvo cambio entre 2016 y 2025, y el área que no lo tuvo, se debe multiplicar el número de píxeles por el tamaño de cada píxel (3×3 metros = 9 m^2), lo que equivale a 0.0009 hectáreas por píxel.

Para identificar los cambios de cobertura entre años consecutivos, se utilizó la herramienta 'Combine' de ArcGIS Pro, la cual permite cruzar imágenes clasificadas píxel a píxel y obtener combinaciones únicas de clases entre dos fechas (ESRI, 2024). Esta técnica es comúnmente utilizada en estudios de cambio de uso del suelo (IDEAM, 2018).

Seguidamente, la herramienta 'Tabulate Area' fue aplicada para cuantificar las áreas de cambio en los diferentes periodos, siguiendo las recomendaciones metodológicas del IDEAM (2018) para el análisis de cobertura de la tierra basado en CORINE Land Cover adaptado a Colombia.

A partir de esta herramienta se obtuvieron las áreas de cambio entre pares de años consecutivos y se consolidaron en una tabla de transición de coberturas que sirvió como insumo principal para los posteriores cálculos. Posteriormente, se realizaron distintos cálculos de síntesis e interpretación, con el fin de analizar de manera integral las dinámicas de cobertura del suelo durante todo el periodo de estudio (2016–2025), mediante los siguientes procedimientos:

11.2.1 Metodología general para pérdida, ganancia y persistencia

Se utilizó una tabla consolidada de transiciones bitemporales entre clases de cobertura del suelo (2016–2018, 2018–2020, ..., 2024–2025), generada con la herramienta Tabulate Area en ArcGIS Pro. La tabla contiene los siguientes campos: Periodo, Clase_origen, Clase_destino, Píxeles y Área_m2.

- **Pérdida por clase:** suma del área (ha) en la que una clase fue origen, pero cambió a otra distinta.
- **Ganancia por clase:** suma del área (ha) donde una clase fue destino desde otra clase distinta.
- **Persistencia por clase:** suma del área (ha) que permaneció sin cambios (misma clase como origen y destino).
- **Conversión de unidades:** el área se expresa en hectáreas ($1 \text{ ha} = 10,000 \text{ m}^2$).

11.2.2 Metodología específica para analizar la expansión urbana (Clase 1 - Zonas urbanizadas)

- Se filtraron las transiciones en las que la clase destino fue “Zonas urbanizadas” (Clase 1) y la clase origen fue diferente de 1.
- Para cada periodo bianual, se sumaron las áreas que cambiaron a urbano.
- Se compararon los resultados por periodo para determinar el de mayor expansión.

11.2.3 Metodología específica para analizar la clase Bosques (Clase 3)

- **Pérdida:** suma del área en ha en la que los bosques (clase 3) fueron origen y pasaron a otra clase $\neq 3$.
- **Ganancia:** suma del área que fue destino en clase 3 desde otras $\neq 3$.
- **Persistencia:** área donde la clase 3 se mantuvo como origen y destino.

11.2.4 Metodología específica para analizar Aguas continentales (Clase 5)

Para evaluar la dinámica de la clase Aguas continentales durante el periodo 2016–2025, se aplicó un enfoque basado en el análisis de las transiciones de cobertura a partir de las combinaciones bitemporales. Se distinguieron tres tipos de comportamiento:

- **Pérdida:** Se identificaron todos los píxeles cuyo valor de clase original era 5 (Aguas continentales) y cuyo valor de clase en el año siguiente fue diferente de 5, es decir, aquellos casos en los que el agua fue reemplazada por otra cobertura terrestre.
- **Ganancia:** Se contabilizaron los píxeles que no eran de clase 5 en el año inicial, pero que se transformaron en clase 5 en el año final del periodo bitemporal, reflejando zonas donde apareció o se incrementó el cuerpo de agua.
- **Persistencia:** Se registraron los píxeles que conservaron la clase 5 en ambos años del par bitemporal, es decir, que permanecieron como *Aguas continentales* sin cambios.

Los valores de cantidad de píxeles se convirtieron en área (hectáreas) mediante la fórmula:

$$\text{Área (ha)} = (\text{Número de píxeles} \times 9) / 10,000 \quad (1)$$

dato que cada píxel representa 9 m² y una hectárea equivale a 10,000 m².

11.2.5 Metodología específica para analizar Pastos (Clase 2)

La clase Pastos fue analizada a partir de las tablas de atributos generadas por las herramientas de combinación (“Combine”) entre pares de años. Para cada uno de los cinco periodos evaluados, se aplicaron las siguientes definiciones:

- **Pérdida:** Incluye todos los píxeles que tenían clase 2 en el año inicial del par (origen = 2) y cambiaron a una clase diferente en el año final (destino \neq 2).
- **Ganancia:** Se refiere a los píxeles que en el año inicial no eran clase 2 (origen \neq 2), pero que en el año final pasaron a serlo (destino = 2).
- **Persistencia:** Comprende los píxeles que mantuvieron la clase 2 en ambos años (origen = 2 y destino = 2).
- El conteo de píxeles para cada categoría fue convertido a hectáreas usando la fórmula (1).

11.2.6 Metodología específica para Áreas abiertas o con poca vegetación (Clase 4)

El análisis de esta clase se realizó siguiendo un enfoque similar al aplicado a las demás coberturas, utilizando las tablas de atributos de los ráster de transición. Se definieron las métricas de la siguiente manera:

- **Pérdida:** Corresponde a los píxeles cuyo valor en el año inicial era 4 (origen = 4) y en el año final cambió a una clase diferente (destino \neq 4).
- **Ganancia:** Comprende aquellos píxeles que inicialmente pertenecían a otra clase (origen \neq 4) y que en el año final se clasificaron como clase 4 (destino = 4).
- **Persistencia:** Incluye todos los píxeles que conservaron su clasificación como clase 4 en ambos años (origen = 4 y destino = 4).
- El conteo de píxeles para cada categoría fue convertido a hectáreas usando la fórmula (1).

11.3 Fase III: Formulación de recomendaciones a partir de resultados

En esta última fase, con base en los hallazgos, se elaboraron recomendaciones orientadas a la gestión ambiental y planificación territorial, incluyendo sugerencias para el control de la expansión urbana, la protección de áreas ecológicas estratégicas y la restauración de zonas degradadas.

12 Resultados y análisis

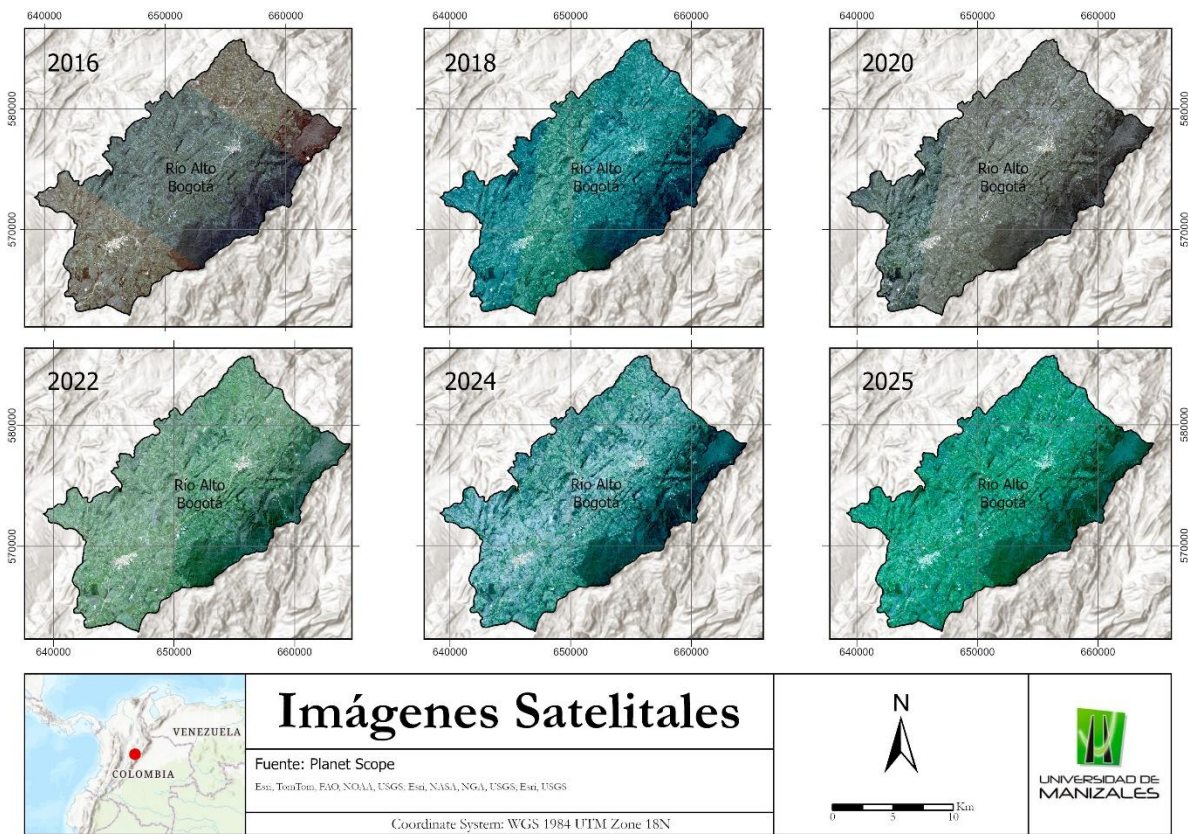
12.1 Fase I: Recolección y preprocesamiento de imágenes satelitales

12.1.1 *Resultados visuales preliminares de cobertura del suelo (2016–2025)*

continuación, se presentan las composiciones en color natural (RGB) generadas a partir de imágenes satelitales PlanetScope correspondientes a los años 2016, 2018, 2020, 2022, 2024 y 2025 como se muestra en la Figura 5.

El objetivo de esta visualización es ofrecer una referencia del estado general de la cobertura del suelo en cada uno de los años del periodo de estudio. Sin embargo, debido a la resolución espectral limitada y la similitud visual entre algunas clases, estas composiciones no permiten por sí solas identificar o cuantificar cambios espaciales de cobertura del suelo de manera precisa. Por ello, fueron complementadas con análisis temáticos y clasificatorios detallados que se presentan en las secciones siguientes.

Figura 5 Composición RGB natural de la Subcuenca Río Alto Bogotá (2016, 2018, 2020, 2022, 2024, 2025), a partir de imagen PlanetScope.



Fuente: Imagen satelital PlanetScope (2016, 2018, 2020, 2022, 2024, 2025).

Si bien las imágenes RGB permiten distinguir de forma general zonas de vegetación, áreas urbanas y cuerpos de agua, su principal utilidad dentro de esta investigación fue servir como base para el análisis visual preliminar y como insumo para la clasificación supervisada que permitió generar mapas temáticos de coberturas del suelo.

En consecuencia, estas composiciones deben entenderse como una representación visual del territorio para cada año, mas no como evidencia directa de los cambios ocurridos entre periodos, los cuales fueron evaluados mediante herramientas de análisis multitemporal específicas en ArcGIS Pro.

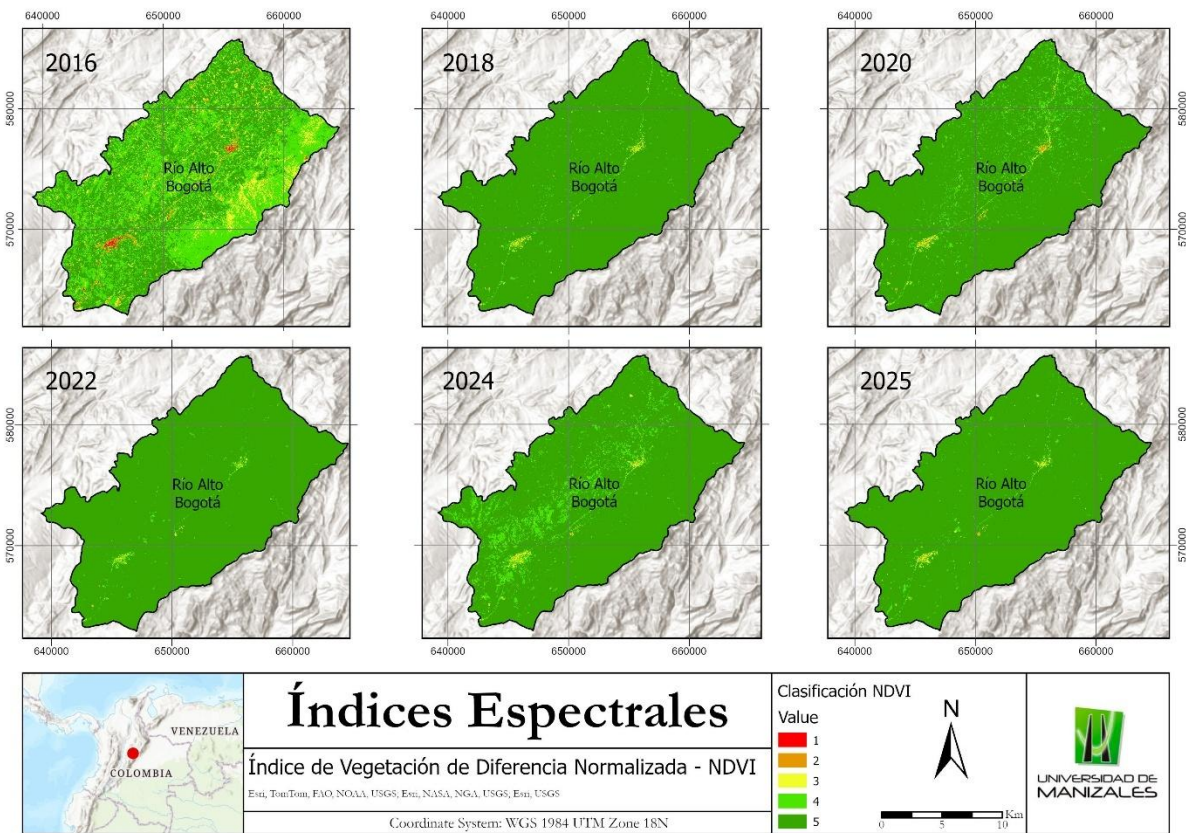
12.1.2 Resultados visuales de la clasificación NDVI de coberturas del suelo (2016–2025)

Para complementar el análisis visual de las imágenes de la cobertura vegetal se complementó con el índice espectral NDVI, esta herramienta ayudo a diferenciar entre la cobertura

vegetal como bosques y pastos, de las coberturas antrópicas como las áreas urbanizadas y las vías, además, de las áreas abiertas o con poca vegetación.

En la Figura 6 se muestra la clasificación del NDVI para cada una de las imágenes desde el 2016 hasta el 2025. Según lo propuesto por Ríos., et al (2014) en su clasificación, concuerda con los resultados que se obtuvieron, donde los valores de menos uno (-1) y cercanos a cero (0), arrojaron coberturas como áreas abiertas o con poca vegetación y zonas urbanizadas como las vías y las cabeceras urbanas de los municipios de Chocontá y Villapinzón, por lo tanto, los valores cercanos a uno (1) arrojaron coberturas de bosques y pastos.

Figura 6 Clasificación de índices espectrales NDVI para los años 2016, 2018, 2020, 2022, 2024 y 2025.



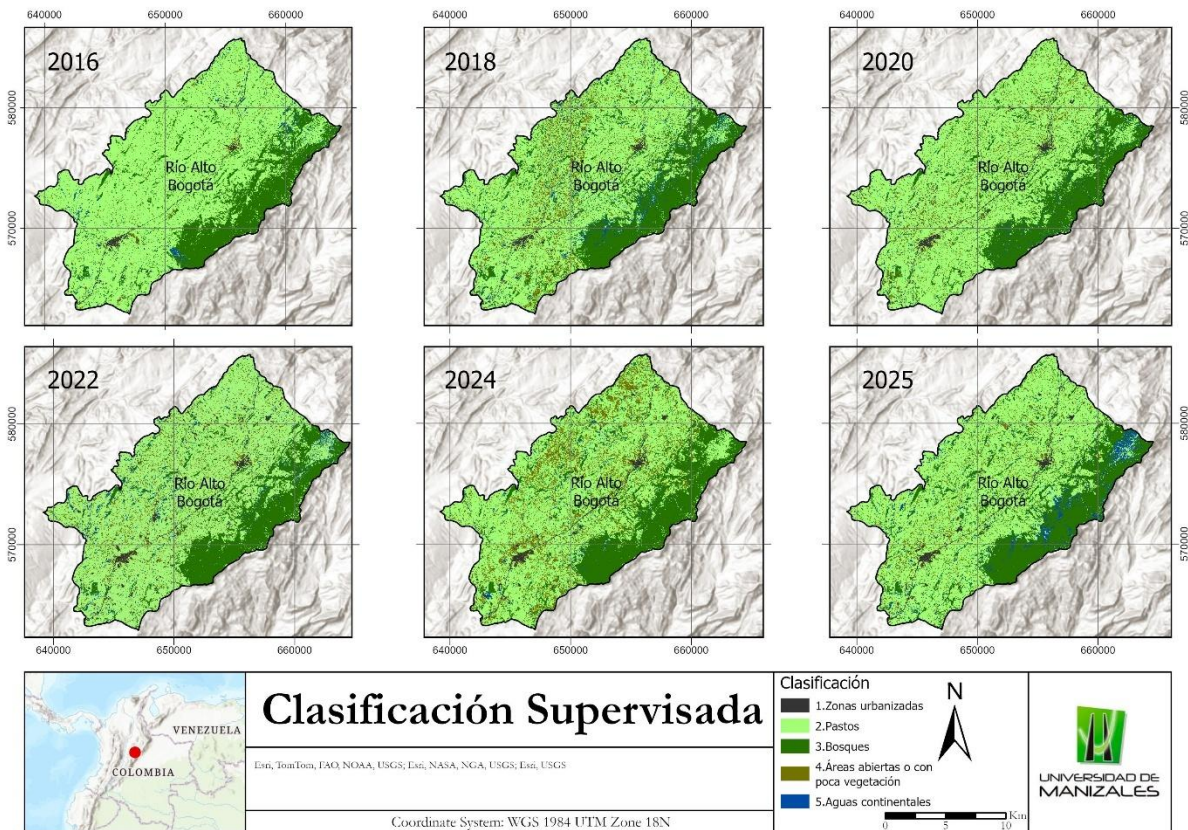
Fuente: Imagen satelital PlanetScope.

12.2 Fase II: Clasificación de las principales coberturas del suelo y análisis de cambios

12.2.1 Resultados de la clasificación supervisada de coberturas del suelo (2016–2025)

La Figura 7 muestra la serie de clasificaciones supervisadas obtenidas a partir de imágenes satelitales PlanetScope para los años 2016, 2018, 2020, 2022, 2024 y 2025, en la Subcuenca Río Alto Bogotá. Las coberturas del suelo fueron agrupadas en cinco clases principales: zonas urbanizadas (1), pastos (2), bosques (3), áreas abiertas o con poca vegetación (4) y aguas continentales (5).

Figura 7 Clasificación supervisada de coberturas del suelo en la Subcuenca Río Alto Bogotá (2016–2025).



Fuente: Elaboración propia con base en imágenes PlanetScope (2016–2025).

La secuencia de mapas clasificados para los años 2016, 2018, 2020, 2022, 2024 y 2025 permite identificar visualmente los principales cambios espaciales en la Subcuenca

Río Alto Bogotá. Este análisis muestra una transformación progresiva del paisaje, facilitando una lectura integrada de las dinámicas territoriales a lo largo del periodo de estudio.

Se evidencia una expansión sostenida de las zonas urbanizadas, especialmente marcada entre 2016 y 2018, y con mayor consolidación hacia 2024 y 2025. Esta clase avanza principalmente sobre áreas previamente ocupadas por pastos y zonas abiertas, lo que refleja procesos de urbanización acelerada.

Los pastos, aunque siguen siendo la clase predominante, presentan una reducción gradual y un patrón de fragmentación creciente, posiblemente asociado al abandono del uso agropecuario o a la presión del crecimiento urbano.

Los bosques muestran una mayor estabilidad, con sectores persistentes, aunque también con pérdidas localizadas, indicando presiones sobre los ecosistemas naturales. En cuanto a las áreas abiertas, su cobertura disminuye de manera progresiva, lo que puede estar relacionado con revegetación, urbanización o cambio de uso.

Las aguas continentales experimentan variaciones leves, con algunas transformaciones hacia el final del periodo, posiblemente por causas hidrológicas naturales o alteraciones artificiales.

En conjunto, estos mapas permiten comprender visualmente las tendencias de transformación del paisaje, complementando los análisis cuantitativos presentados en las secciones siguientes.

12.2.2 Análisis espacial del cambio total (2016–2025)

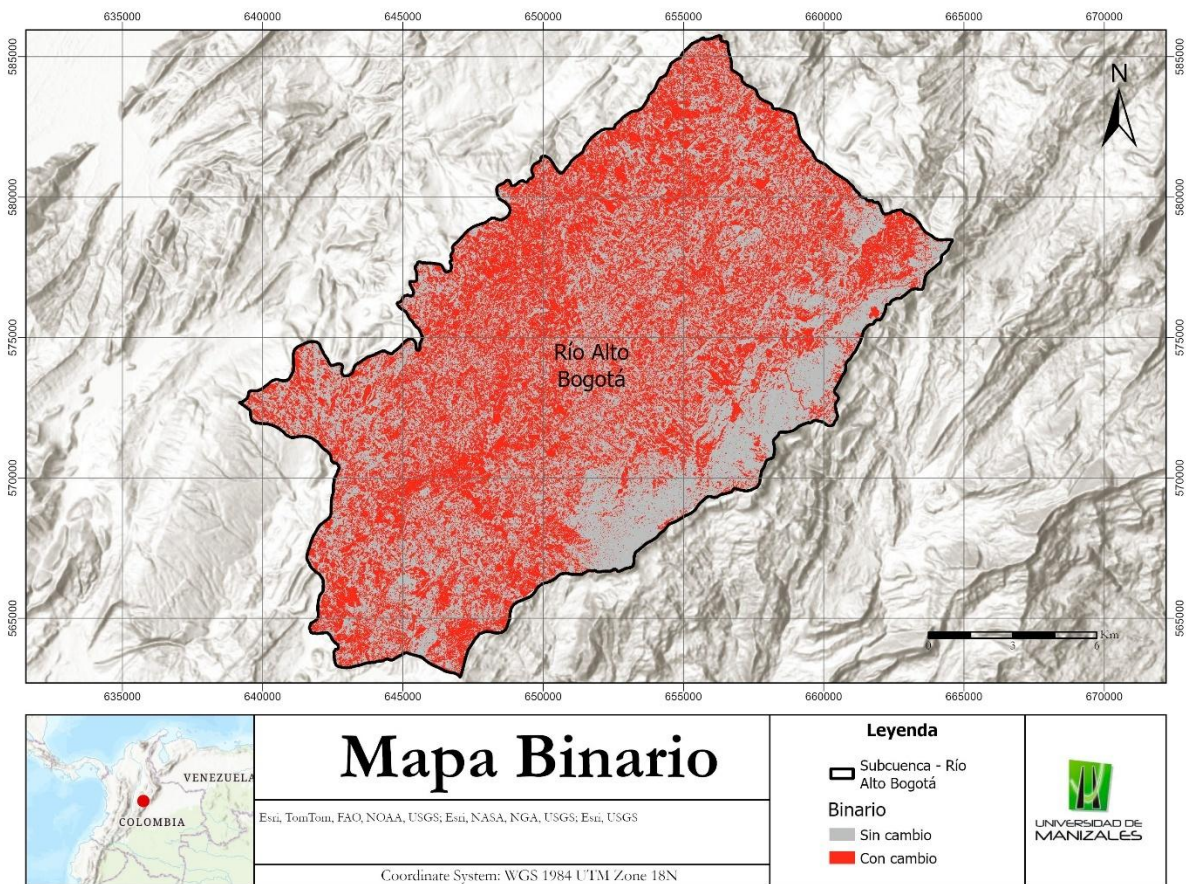
Con el fin de identificar la magnitud total del cambio en la cobertura del suelo durante el periodo de estudio, se generó un ráster binario que distingue las áreas con transformación (valor 1, gris) y las que permanecieron estables (valor 0, rojo). A partir de este análisis, se calculó el número total de píxeles para cada categoría y su equivalente en hectáreas, considerando que cada píxel representa un área de 9 m² (0,0009 ha). Los resultados se presentan en la Tabla 4 y en la Figura 8.

Tabla 4 Área total con y sin cambio de cobertura del suelo entre 2016 y 2025.

Valor (VALUE)	Tipo	COUNT	Área (ha)
0	Sin cambio	15,250,256	13,725.23
1	Con cambio	15,076,796	13,569.12
Total	—	30,327,052	27,294.35

Fuente: Elaboración propia.

Figura 8 Mapa binario de cambio/no cambio de cobertura del suelo (2016–2025).



Fuente: Elaboración propia con base en imágenes PlanetScope (2016–2025).

Los resultados indican que aproximadamente el 49,7% del área total analizada (13.569,12 ha) experimentó algún tipo de cambio en la cobertura del suelo entre 2016 y 2025, mientras que el 50,3 % (13.725,23 ha) se mantuvo estable. Esta distribución relativamente equilibrada sugiere una dinámica territorial activa, en la que casi la mitad del territorio ha sido objeto de transformaciones en su cobertura.

No obstante, se destaca que la zona oriental de la subcuenca muestra una concentración de áreas sin cambio, lo cual se explica porque esta región corresponde al páramo de Guacheneque, una zona de alta montaña declarada como ecosistema estratégico y área protegida por su papel fundamental en la regulación hídrica, dado que los páramos son ecosistemas clave para el país, desempeñan un papel fundamental en la regulación y provisión de aproximadamente el 70 % del agua disponible, además, de almacenar importantes cantidades de carbono en sus suelos y albergar

una notable diversidad de especies endémicas (Burbano Girón et al., 2020). A partir de la Ley 99 de 1993 se encuentran, de manera expresa, en especial protección y actualmente son considerados de importancia estratégica y prioridad nacional de conservación de la biodiversidad por medio de la Ley 1930 de 2018. La protección legal y ambiental de esta zona limita las actividades antrópicas, contribuyendo a su estabilidad en términos de cobertura del suelo.

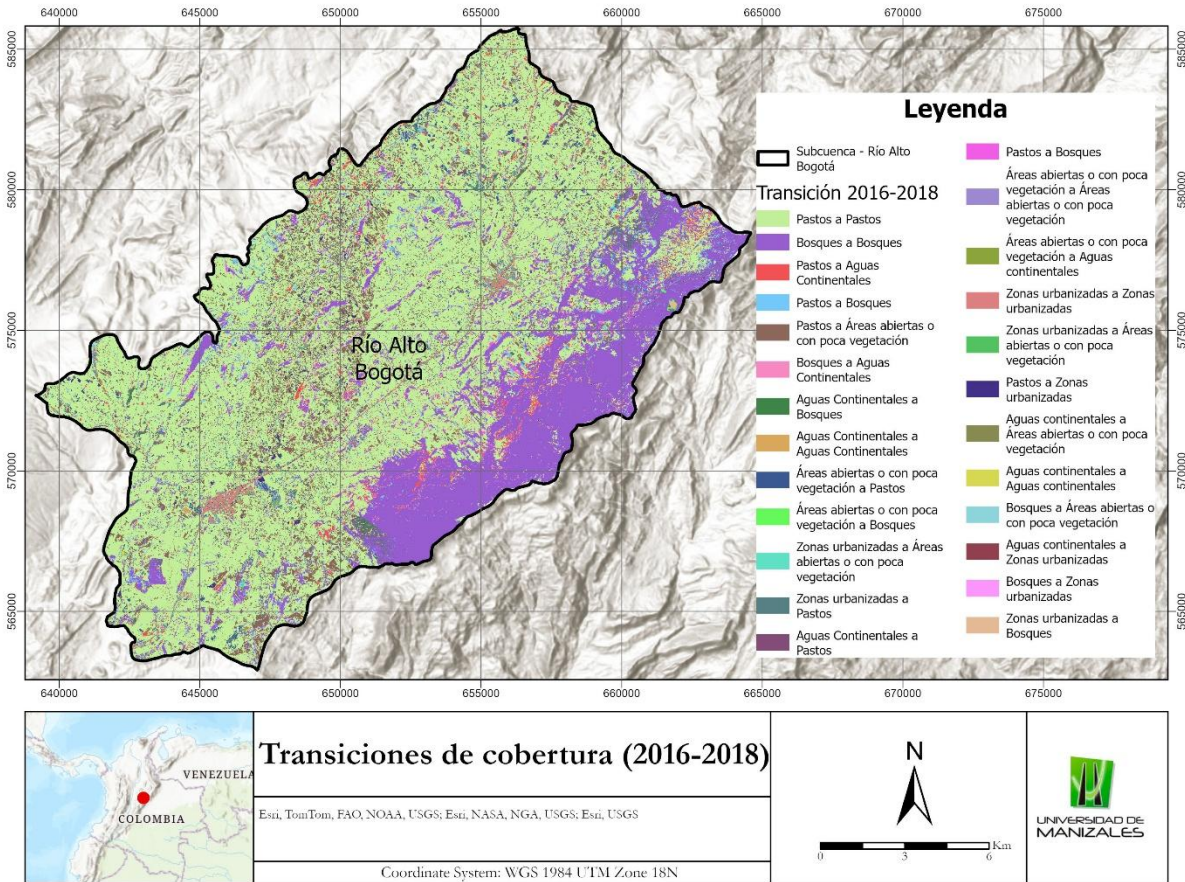
12.2.3 Análisis de las transiciones de cobertura por periodo bianual (2016–2025)

Con el fin de identificar los cambios espaciales detallados entre las distintas coberturas del suelo, se aplicó la herramienta Combine de ArcGIS Pro, la cual permite comparar dos imágenes clasificadas para detectar transiciones específicas píxel a píxel.

La secuencia de mapas permite observar con claridad las principales dinámicas de cambio en la Subcuenca Río Alto Bogotá durante el periodo 2016–2025:

- **Periodo 2016–2018:** En la Figura 9 se identifica un notable proceso de urbanización, evidenciado por el cambio de **pastos y áreas abiertas hacia zonas urbanizadas**, especialmente al suroccidente y centro de la subcuenca. Asimismo, se destaca una significativa pérdida de coberturas boscosas, principalmente hacia pastos, indicando presión antrópica por expansión agrícola y ganadera.

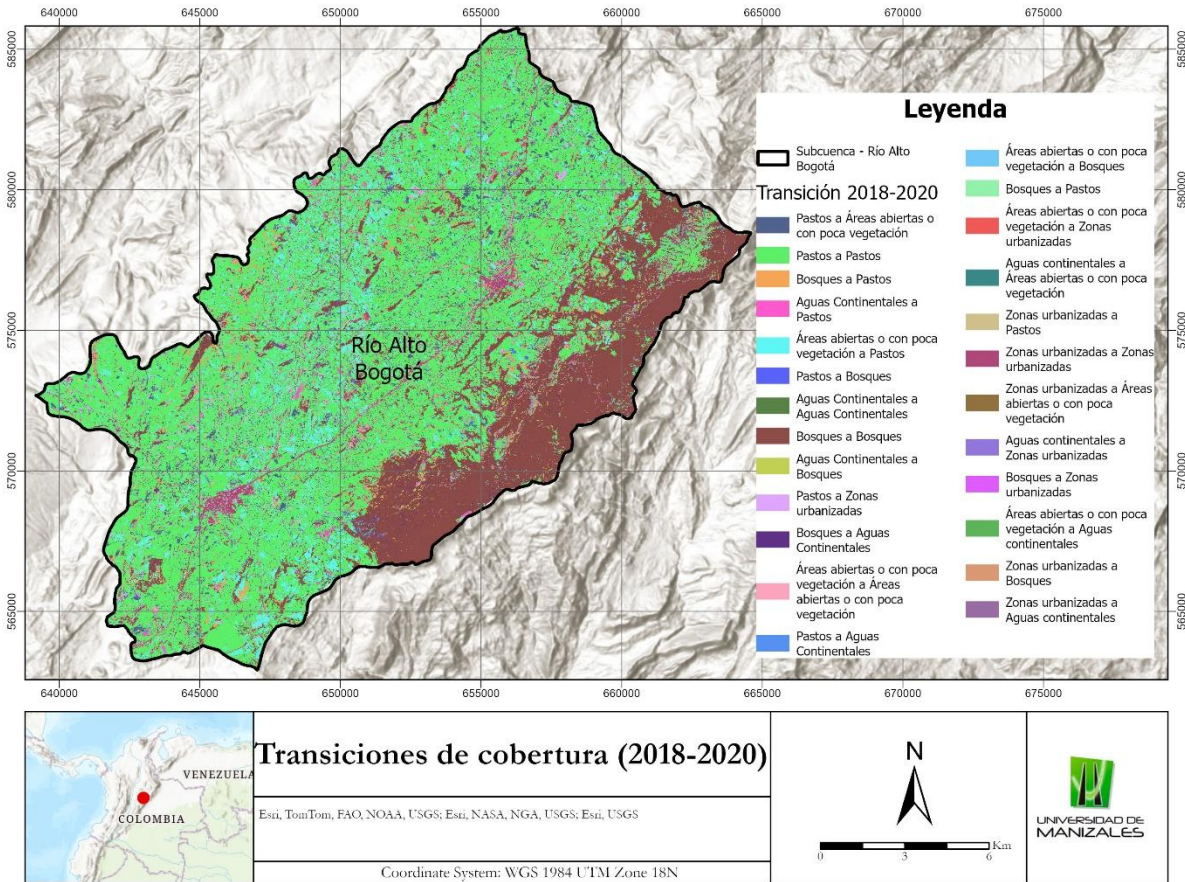
Figura 9 Transiciones de cobertura (2016–2018).



Fuente: Elaboración propia con base en imágenes PlanetScope (2016–2018).

- **Periodo 2018–2020:** En la Figura 10 se evidencian que se mantiene la tendencia de expansión urbana, aunque con menor intensidad. Se registran nuevas áreas donde los **bosques son sustituidos por pastos**, además de algunas transiciones de áreas abiertas hacia bosques, lo cual sugiere procesos localizados de revegetación o regeneración.

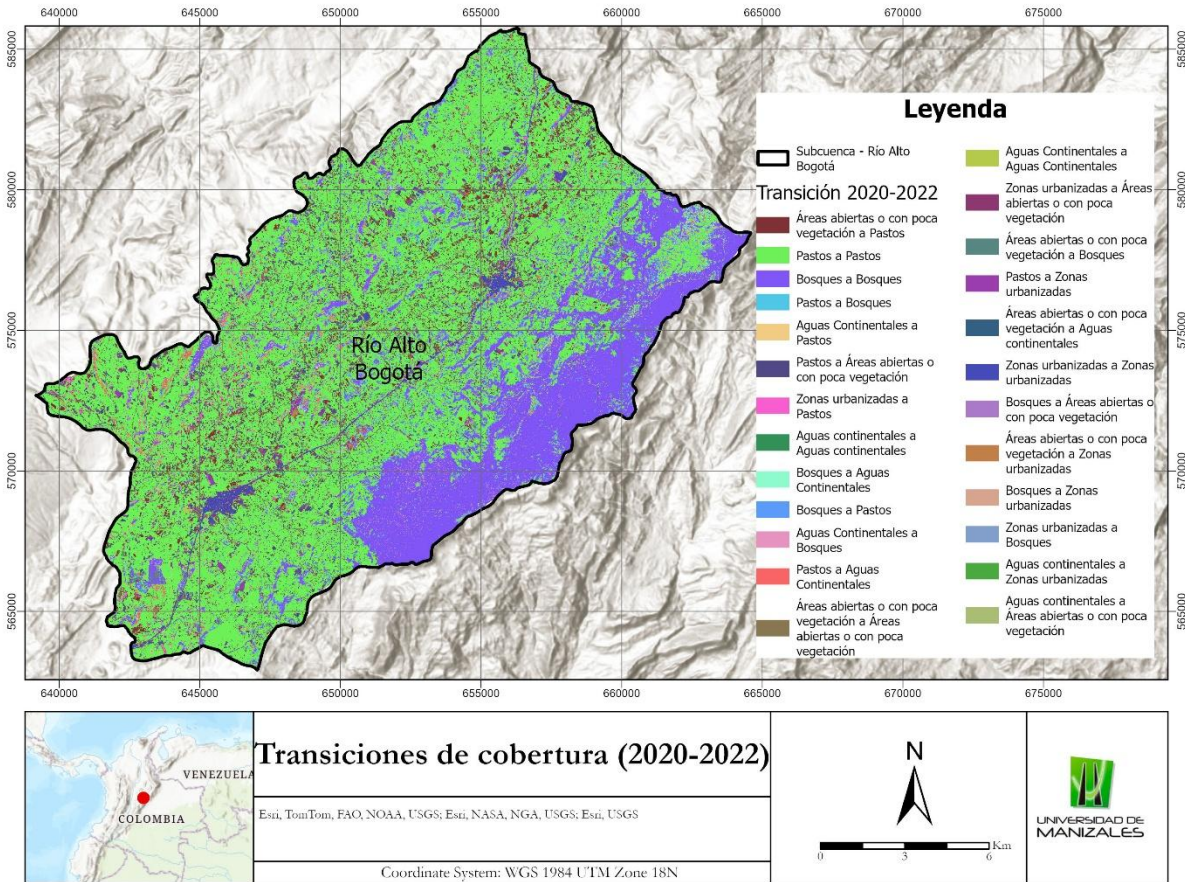
Figura 10 Transiciones de cobertura (2018–2020).



Fuente: Elaboración propia con base en imágenes PlanetScope (2018–2020).

- **Periodo 2020–2022:** Se observa en la Figura 11 una estabilización parcial de la cobertura, aunque persisten cambios puntuales desde **pastos y áreas abiertas hacia zonas urbanizadas**, y una ligera recuperación de vegetación en algunas zonas altas, probablemente asociada a condiciones climáticas o restricciones legales.

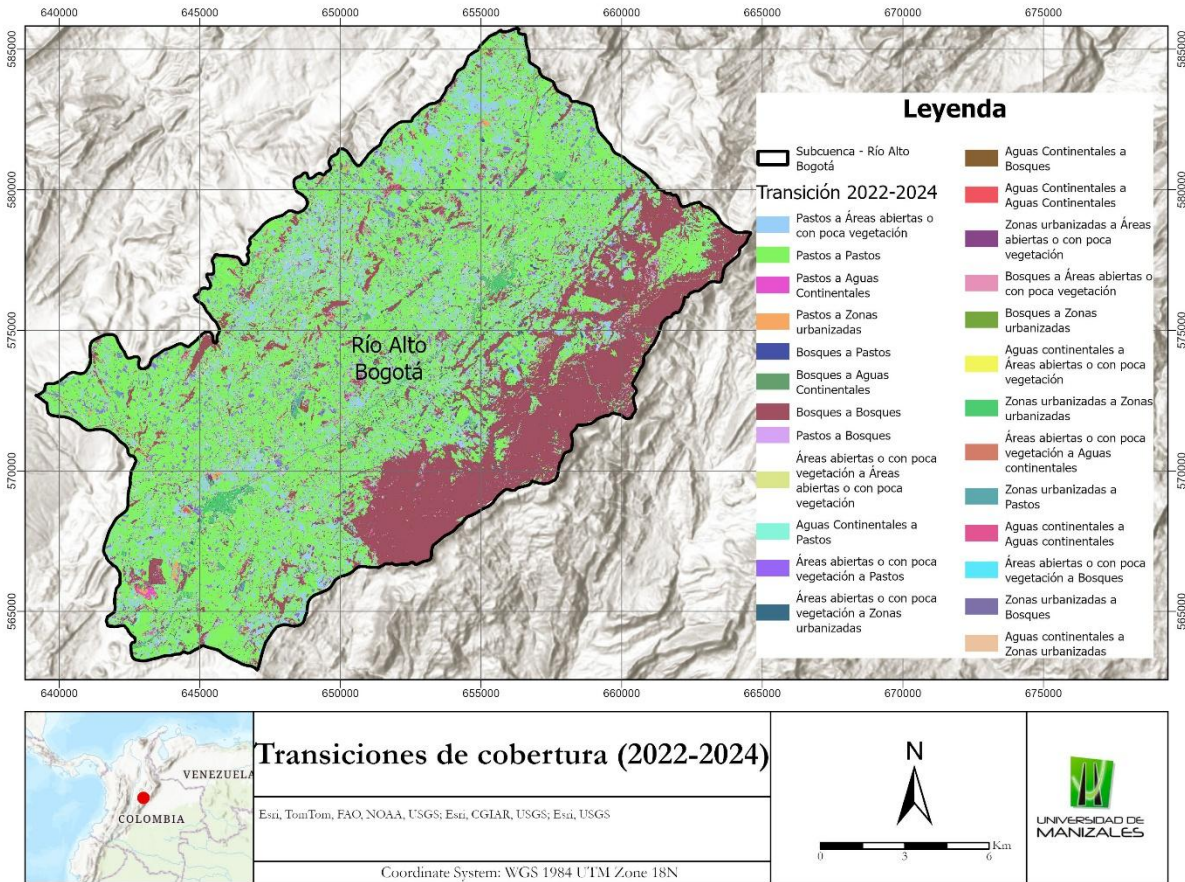
Figura 11 Transiciones de cobertura (2020–2022).



Fuente: Elaboración propia con base en imágenes PlanetScope (2020–2022).

- **Periodo 2022–2024:** Se identifica en la Figura 12 una consolidación del patrón de ocupación urbana, pero con una intensidad espacial más concentrada. Las transiciones desde **áreas abiertas y pastos a zonas urbanizadas** se evidencian particularmente en las zonas bajas y medias.

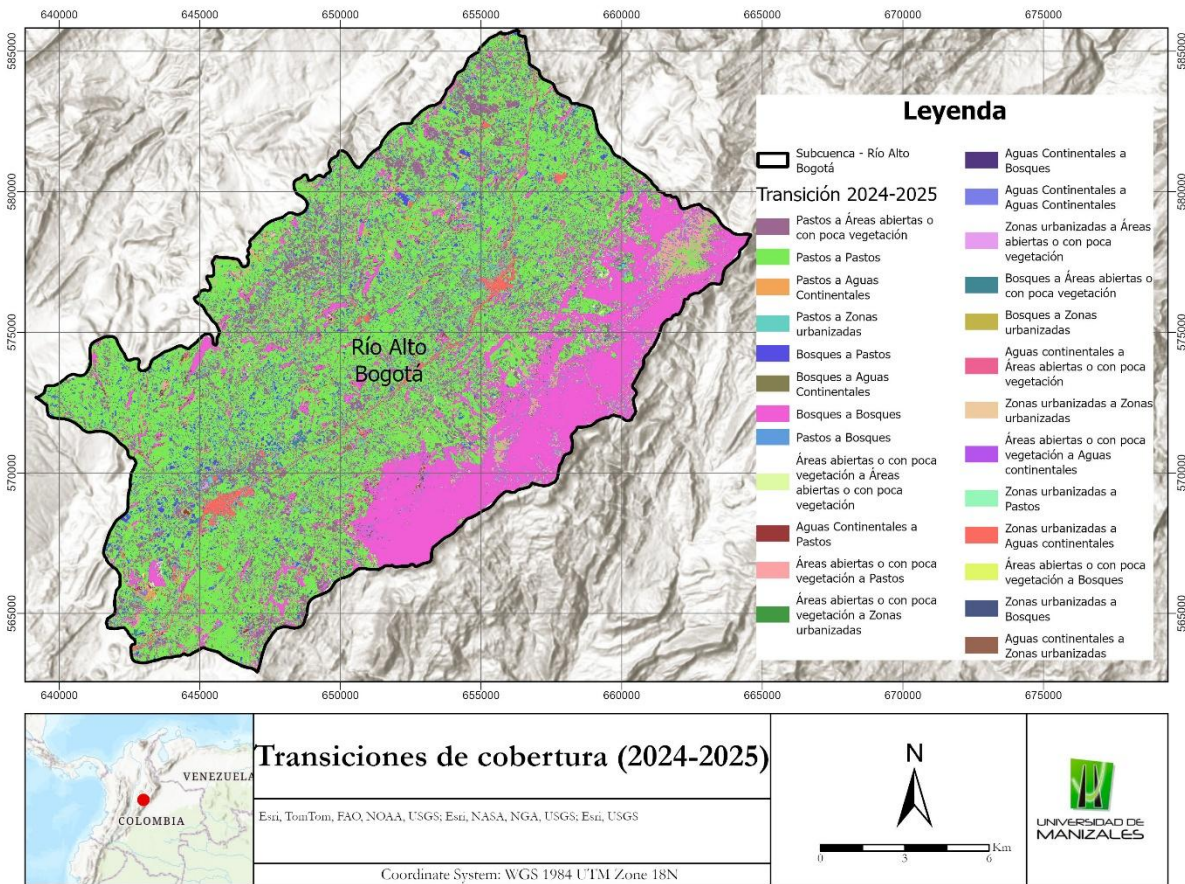
Figura 12 Transiciones de cobertura (2022–2024).



Fuente: Elaboración propia con base en imágenes PlanetScope (2022–2024).

- Periodo 2024–2025:** En la Figura 13 se identifica que, a pesar de la corta duración de este intervalo, se registran cambios menores, con predominio de estabilidad espacial. Sin embargo, siguen presentes conversiones puntuales hacia zonas urbanizadas, en detrimento de coberturas naturales.

Figura 13 Transiciones de cobertura (2024–2025).



Fuente: Elaboración propia con base en imágenes PlanetScope (2024–2025).

En conjunto, el análisis multitemporal revela una transformación progresiva del paisaje, caracterizada por la pérdida de coberturas vegetales naturales (bosques y áreas abiertas) y el crecimiento sostenido de las zonas urbanizadas, especialmente durante el primer periodo (2016–2018). Estas tendencias reflejan las presiones territoriales actuales sobre la subcuenca y destacan la necesidad de fortalecer los mecanismos de planificación y conservación, en particular hacia sectores estratégicos como el páramo de Guacheneque, que muestra alta estabilidad y bajo nivel de cambio.

12.2.4 Cuantificación e interpretación de las áreas de cambio (2016–2025)

12.2.4.1 Pérdida, ganancia y persistencia de coberturas del suelo (2016–2025)

La Tabla 5 y la Figura 14 presentan los resultados del análisis multitemporal de pérdida, ganancia y persistencia de las clases de cobertura del suelo en la Subcuenca Río Alto Bogotá

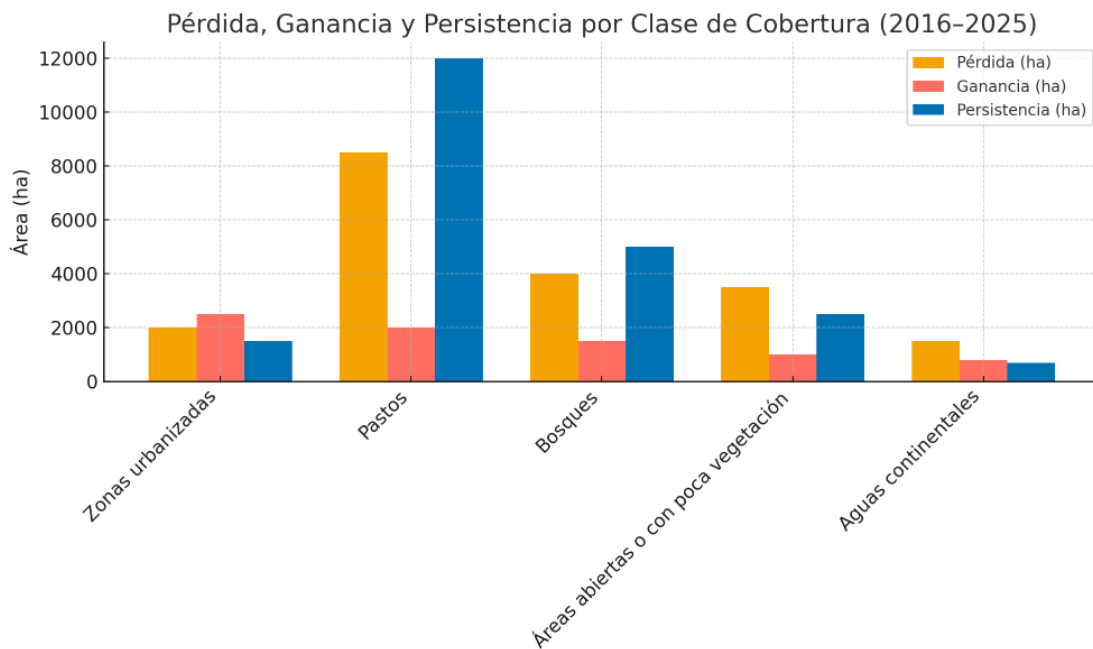
durante el periodo 2016–2025. Este análisis se basa en la comparación de transiciones entre clases de cobertura a lo largo de cinco periodos bitemporales consecutivos.

Tabla 5 Pérdida, ganancia y persistencia por clase de cobertura del suelo en hectáreas (2016–2025).

N° de Clase	Clase	Pérdida (ha)	Ganancia (ha)	Persistencia (ha)
1	Zonas urbanizadas	1,964.88	3,163.80	1,138.83
2	Pastos	8,733.32	2,082.72	12,560.11
3	Bosques	5,260.75	1,910.82	4,709.37
4	Áreas abiertas o con poca vegetación	2,629.47	1,050.87	2,897.85
5	Aguas continentales	<u>1,021.20</u>	674.91	607.53

Fuente: Elaboración propia.

Figura 14 Gráfico comparativo de pérdida, ganancia y persistencia por clase de cobertura del suelo en hectáreas (2016–2025).



Fuente: Elaboración propia.

Se observa que la clase con mayor pérdida acumulada fue Pastos, con 8.733,32 hectáreas transformadas a otras coberturas. Esta tendencia indica una fuerte presión sobre áreas

tradicionalmente dedicadas a actividades ganaderas o agropecuarias, posiblemente debido a expansión urbana, revegetación natural o degradación del uso del suelo.

En contraste, la mayor ganancia se registró en las Zonas urbanizadas, con 3.163,80 hectáreas, reflejando un proceso claro de urbanización a lo largo de la subcuenca, especialmente en los primeros años del periodo analizado. Le siguen las ganancias en Pastos y Bosques, lo que puede indicar procesos de recuperación o cambio reverso del uso del suelo.

En términos de persistencia, los Pastos nuevamente lideran con 12.560,11 hectáreas que se mantuvieron estables durante todo el periodo, lo que confirma su papel como clase dominante. Las coberturas de Bosques y Áreas abiertas o con poca vegetación también mostraron niveles relevantes de estabilidad.

Finalmente, la clase Aguas continentales presentó tanto pérdida (1.021,20 ha) como ganancia (674,91 ha), lo cual refleja cierta variabilidad, posiblemente influenciada por dinámicas hídricas estacionales, cambios climáticos o intervención antrópica.

12.2.4.2 Expansión de zonas urbanizadas por periodo (2016–2025)

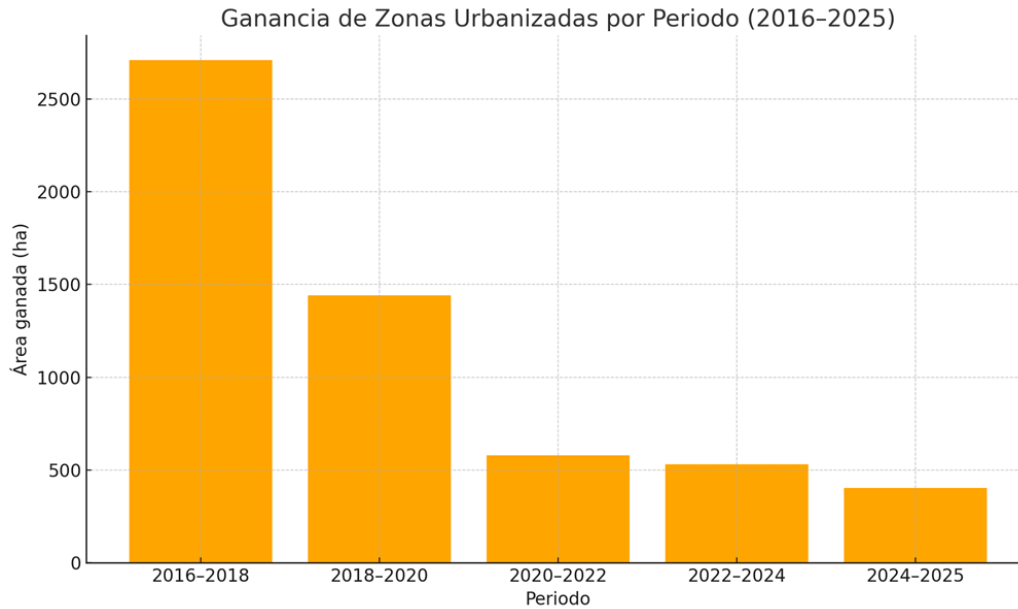
La evolución de la expansión urbana en la Subcuenca Río Alto Bogotá fue cuantificada por periodos bianuales y trianuales entre 2016 y 2025, con base en los resultados obtenidos mediante el análisis bitemporal de coberturas del suelo. La Tabla 6 y la Figura 15 muestran la ganancia neta de áreas urbanizadas (en hectáreas) para cada intervalo.

Tabla 6 Expansión de zonas urbanizadas por periodo (2016–2025).

Periodo	Ganancia de zonas urbanizadas (ha)
2016–2018	2708.67
2018–2020	1441.63
2020–2022	577.83
2022–2024	531.57
2024–2025	403.97

Fuente: Elaboración propia.

Figura 15 Gráfico expansión de zonas urbanizadas por periodo (2016–2025)



Fuente: Elaboración propia.

Los resultados evidencian que el periodo 2016–2018 concentró la mayor expansión urbana de toda la década, con una ganancia de 2.708,67 ha, lo que representa más del 40% del total acumulado en el periodo 2016–2025. Esta cifra resalta una dinámica de urbanización acelerada al inicio del periodo, posiblemente asociada al crecimiento poblacional, expansión de infraestructura o cambios en políticas de ordenamiento territorial.

Posteriormente, se observa una disminución progresiva en la ganancia de zonas urbanizadas, siendo 2024–2025 el periodo con menor aumento (403,97 ha). Esta tendencia sugiere una desaceleración en el ritmo de expansión urbana, que podría estar relacionada con el agotamiento de áreas disponibles para urbanización o con medidas de planificación y control del uso del suelo más estrictas en años recientes.

El patrón general refleja una transformación importante del territorio, con implicaciones relevantes en la pérdida de coberturas naturales o seminaturales (pastos, áreas abiertas) y en la configuración del paisaje de la subcuenca. Este comportamiento será complementado con análisis espaciales de localización del crecimiento urbano, los cuales permitirán entender con mayor precisión los sectores más afectados por estos procesos.

12.2.4.3 Pérdida de cobertura boscosa y su distribución por clase de destino (2016–2025)

Con el objetivo de caracterizar las transformaciones específicas que dieron lugar a la pérdida de coberturas boscosas en la Subcuenca Río Alto Bogotá durante el periodo 2016–2025, se analizó el destino de los píxeles clasificados originalmente como “Bosques”. Este enfoque permite identificar hacia qué clases de cobertura se transformó este ecosistema estratégico a lo largo del tiempo.

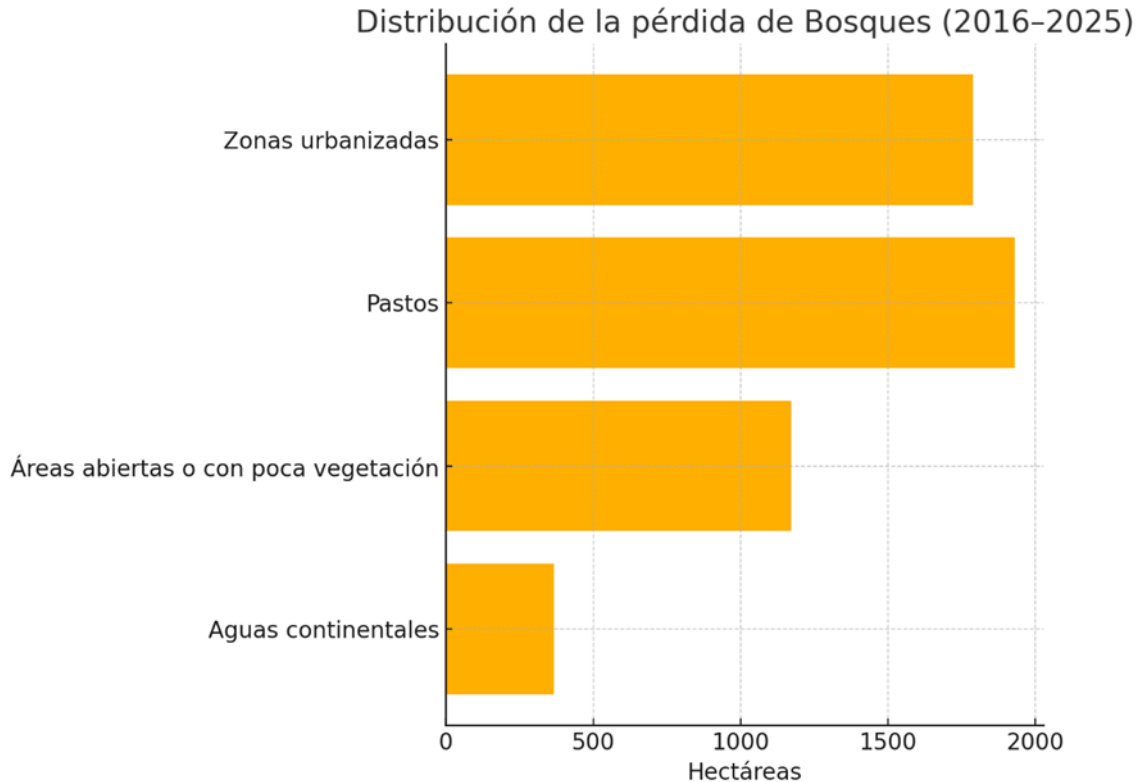
La Tabla 7 presenta la superficie de cobertura boscosa que fue sustituida por otras clases de uso del suelo, mientras que la Figura 16 resume gráficamente la magnitud de estas transiciones, facilitando su análisis comparativo.

Tabla 7 Destino de la pérdida de cobertura boscosa en la Subcuenca Río Alto Bogotá (2016–2025)

Clase origen	Clase destino	Hectáreas
Bosques	Zonas urbanizadas	1789.29
Bosques	Pastos	1932.35
Bosques	Áreas abiertas o con poca vegetación	1171.8
Bosques	Aguas continentales	367.31

Fuente: Elaboración propia.

Figura 16 Distribución gráfica de la pérdida de bosques según clase de destino (2016–2025).



Fuente: Elaboración propia.

Entre 2016 y 2025, los bosques de la subcuenca experimentaron un proceso significativo de transformación. Las principales clases de destino fueron pastos (1.932,35 ha) y zonas urbanizadas (1.789,29 ha), lo que sugiere una fuerte presión relacionada con procesos antrópicos de conversión del suelo. La transición hacia pastos refleja la expansión de actividades agropecuarias en áreas previamente cubiertas por vegetación arbórea, mientras que la conversión a zonas urbanizadas evidencia el avance de la urbanización sobre ecosistemas naturales.

Además, 1.171,80 ha de bosques fueron transformados en áreas abiertas o con poca vegetación, lo cual podría estar asociado a procesos de deforestación incipiente, actividades extractivas, degradación del suelo o abandono de coberturas. Aunque en menor proporción, se observó también una transición hacia aguas continentales (367,31 ha), posiblemente relacionada con ajustes hidrológicos o cambios en la delimitación de cuerpos de agua.

Estos resultados evidencian que la pérdida de bosques en la subcuenca no responde a un único patrón, sino a una combinación de dinámicas territoriales, entre las que destacan la presión agrícola y la urbanización. Esta situación plantea desafíos importantes para la planificación del

territorio, la conservación de ecosistemas estratégicos y la protección de servicios ambientales clave como la regulación hídrica, la captura de carbono y la conservación de la biodiversidad.

12.2.4.4 Comportamiento de la cobertura ‘Aguas continentales’ (2016–2025)

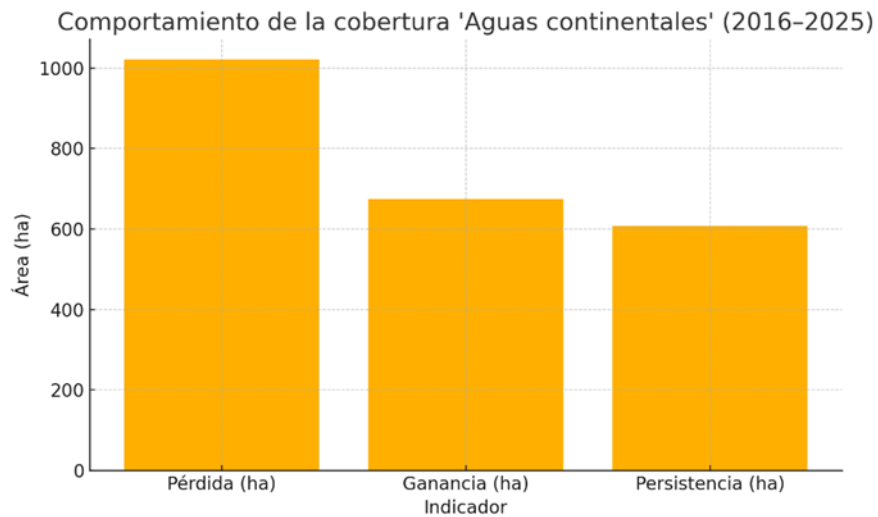
Durante el periodo 2016–2025, la clase Aguas continentales presentó una tendencia a la reducción en la Subcuenca Río Alto Bogotá. Tal como se observa en la Tabla 8, esta cobertura perdió un total de 1.021,20 hectáreas, mientras que su ganancia fue de 674,91 hectáreas y su persistencia alcanzó las 607,53 hectáreas. La Figura 17 permite visualizar de forma clara esta dinámica.

Tabla 8 Comportamiento de la cobertura ‘Aguas continentales’ en la Subcuenca Río Alto Bogotá (2016–2025).

Indicador	Área (ha)
Pérdida (ha)	1021.2
Ganancia (ha)	674.91
Persistencia (ha)	607.53

Fuente: Elaboración propia.

Figura 17 Distribución gráfica del comportamiento de la cobertura ‘Aguas continentales’ (2016–2025).



Fuente: Elaboración propia.

Los datos reflejan que la cobertura de cuerpos de agua en la subcuenca ha disminuido a lo largo del tiempo. Aunque hay cierta recuperación (674,91 ha ganadas), no compensa completamente la pérdida registrada, lo cual implica una disminución neta de esta clase.

Este comportamiento puede deberse a múltiples causas: en algunos casos, los cuerpos de agua pueden haber sido reemplazados por pastos, zonas abiertas o incluso zonas urbanizadas, ya sea por procesos de ocupación del suelo, drenaje artificial o variabilidad estacional del recurso hídrico. También es posible que se deba a fenómenos de sequía, acumulación de sedimentos o modificaciones en la dinámica natural de las quebradas y ríos presentes.

La persistencia relativamente baja (607,53 ha) sugiere que gran parte de las superficies de agua han sido inestables o han cambiado de clase en el periodo observado, lo cual podría afectar la disponibilidad y calidad del recurso hídrico local, así como la conectividad ecológica de los ecosistemas acuáticos.

12.2.4.5 Comportamiento de la cobertura ‘Pastos’ (2016–2025)

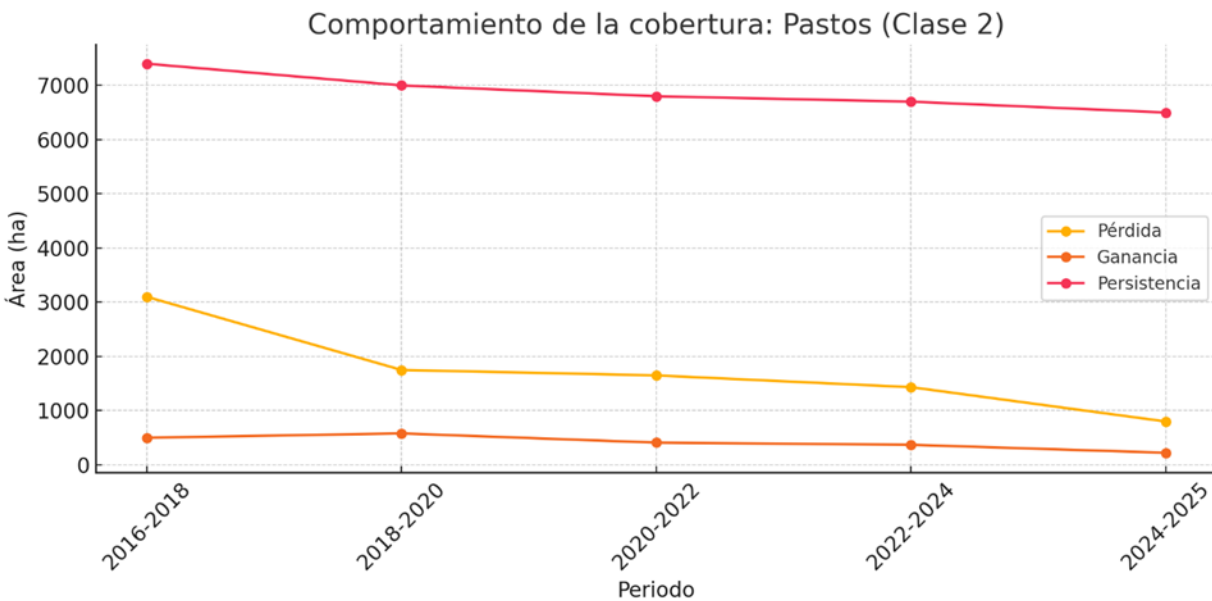
La clase Pastos registró una marcada disminución a lo largo del periodo de análisis, tanto por pérdida de superficie como por disminución progresiva en la persistencia. En la Tabla 9 se muestra el comportamiento detallado por intervalos bianuales, evidenciando una tendencia continua de pérdida y una leve recuperación por ganancia. La Figura 18 grafica esta dinámica en forma de serie temporal.

Tabla 9 Evolución de la pérdida, ganancia y persistencia de la cobertura ‘Pastos’ en la Subcuenca Río Alto Bogotá (2016–2025).

Periodo	Pérdida (ha)	Ganancia (ha)	Persistencia (ha)
2016–2018	3100	500	7400
2018–2020	1750	580	7000
2020–2022	1650	410	6800
2022–2024	1433	370	6700
2024–2025	800	223	6500

Fuente: Elaboración propia.

Figura 18 Comportamiento de la cobertura 'Pastos' por periodo (2016–2025).



Fuente: Elaboración propia.

La cobertura Pastos muestra una tendencia general de pérdida progresiva, especialmente significativa en el primer intervalo (2016–2018), donde se perdieron más de 3.100 ha. Aunque las tasas de pérdida disminuyen en los periodos siguientes, se mantiene una reducción constante.

La persistencia de esta cobertura también disminuye gradualmente, pasando de 7.400 ha en el primer intervalo a 6.500 ha en el último, lo cual sugiere una conversión continua del uso del suelo, posiblemente hacia zonas urbanizadas, áreas abiertas u otros usos productivos.

Por otro lado, la ganancia presenta valores bajos en todos los periodos, sin alcanzar niveles que compensen la pérdida. Esto indica que los procesos de regeneración o reconversión hacia pastos son muy limitados frente al ritmo de transformación territorial.

En conjunto, estos resultados evidencian que los pastizales están siendo reemplazados por otras coberturas, lo cual puede tener implicaciones tanto ecológicas como productivas en el contexto de la subcuenca.

12.2.4.6 Comportamiento de la cobertura 'Áreas abiertas o con poca vegetación' (2016–2025)

La evolución de esta clase muestra una tendencia descendente tanto en su persistencia como en las tasas de pérdida y ganancia. La Tabla 10 detalla los valores registrados por cada periodo

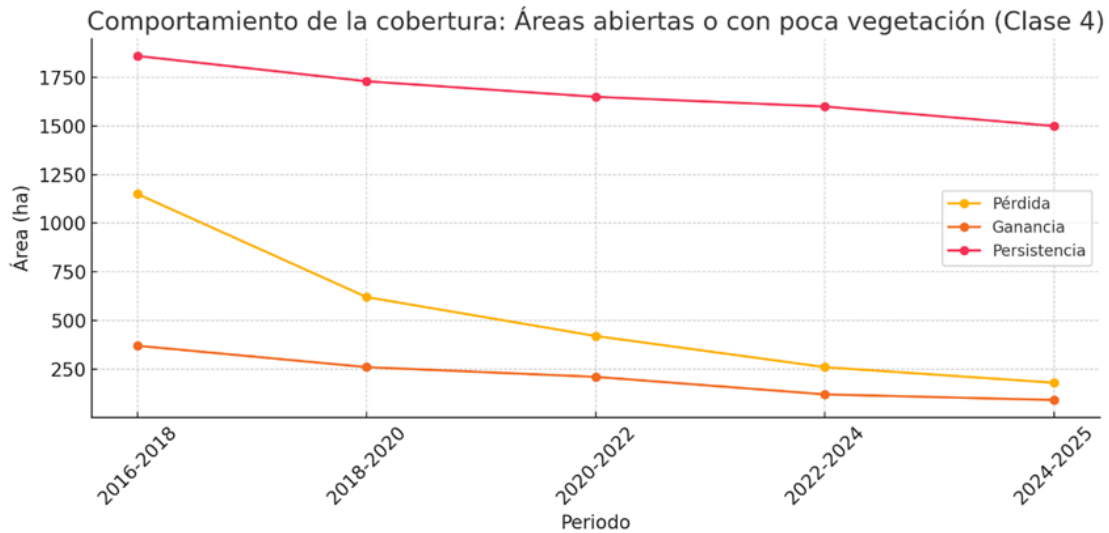
bitemporal, mientras que la Figura 19 presenta gráficamente la dinámica de transformación a lo largo del tiempo.

Tabla 10 Evolución de la pérdida, ganancia y persistencia de la cobertura ‘Áreas abiertas o con poca vegetación’ en la Subcuenca Río Alto Bogotá (2016–2025).

Periodo	Pérdida (ha)	Ganancia (ha)	Persistencia (ha)
2016–2018	1150	370	1860
2018–2020	620	260	1730
2020–2022	420	210	1650
2022–2024	260	120	1600
2024–2025	180	91	1500

Fuente: Elaboración propia.

Figura 19 Comportamiento de la cobertura ‘Áreas abiertas o con poca vegetación’ por periodo (2016–2025)



Fuente: Elaboración propia.

La clase Áreas abiertas o con poca vegetación presenta una reducción progresiva en todos sus indicadores, especialmente en los primeros periodos del análisis. Entre 2016 y 2018 se registró la mayor pérdida (1.150 ha), lo cual podría estar asociado a procesos de revegetación natural, expansión urbana o cambio de uso del suelo hacia coberturas productivas como pastos.

A lo largo de los periodos sucesivos, tanto la pérdida como la ganancia disminuyen gradualmente, lo que indica una disminución en la dinámica de cambio de esta clase, posiblemente debido a su progresiva transformación en etapas anteriores. La persistencia también se reduce de manera constante, pasando de 1.860 ha a 1.500 ha, reflejando un agotamiento de esta cobertura dentro del paisaje.

Este comportamiento sugiere que las áreas abiertas están siendo absorbidas por otros tipos de cobertura, destacando su papel como clases de transición en los procesos de cambio de uso del suelo dentro de la subcuenca.

12.3 Fase III: Formulación de recomendaciones a partir de resultados

Una vez se obtuvieron los mapas de los análisis multitemporales de las coberturas del suelo para la subcuenca Río Alto Bogotá en el periodo comprendido de 2016 a 2025 y, teniendo en cuenta cambios espaciales y temporales de dichas coberturas, con base en estrategias cualitativas y cuantitativas, se podrán establecer propuestas de gestión ambiental.

Debido al alto cambio en las coberturas de suelo, donde el suelo urbano está creciendo rápidamente y, los bosques y los cuerpos de agua está disminuyendo se sugiere lo siguiente para la subcuenca Río Alto Bogotá:

- **Gestión de la expansión urbana**

Se sugiere delimitar zonas para la expansión urbana y así evitar que se ocupen zonas ecológicas susceptibles a cambios

- **Conservación y restauración de bosques**

Diseñar e implementar proyectos de reforestación de bosques en las áreas más afectadas por el cambio en el uso del suelo.

Priorizar la restauración ecológica en zonas que presenten mayor valor estratégico, considerando factores como la persistencia de coberturas, la conectividad ecológica y la resiliencia territorial.

- **Protección de las aguas continentales**

Delimitar zonas de protección a lado y lado de los ríos y quebradas, además, de controlar las actividades antrópicas cercanas a los causes.

- **Educación ambiental para las comunidades**

Generar mesas de trabajo con autoridades locales, juntas de acción comunal, comunidades entre otros para socializar los cambios que se han tenido en la región y de las posibles causas y

sensibilizar sobre los beneficios de conservar los ecosistemas presentes y de explicar las buenas prácticas agrícolas y urbanas.

- **Gobernanza**

Diseñar políticas de incentivos económicos y fiscales para propietarios y comunidades que mantengan coberturas naturales, especialmente bosques y zonas de recarga hídrica, como estrategia de conservación activa.

- **Desarrollo de capacidades locales**

Promover la capacitación de funcionarios, líderes comunitarios y actores locales en el uso e interpretación de herramientas SIG, con el objetivo de fortalecer la gestión territorial desde un enfoque participativo e informado.

Teniendo en cuenta estas recomendaciones a mediano y largo plazo de estas posibles soluciones, pueden ayudar no solo ecológicamente si no socialmente, ya que si se realizan unas buenas prácticas de conservación, restauración, agrícolas y urbanas se promueve la recuperación de especies nativas, aumentarían los bosques y con esto se regularía el clima, se conserva el agua, más captura de carbono y protección de suelos, además, de contribuir con los compromisos climáticos nacionales e internacionales ya que estaría alineado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

13 Discusión

El análisis multitemporal realizado en la Subcuenca Río Alto Bogotá durante el periodo 2016–2025 permitió identificar, cuantificar e interpretar las principales dinámicas de cambio de cobertura del suelo en un territorio de alta importancia ecológica, hídrica y productiva. A través de la combinación de herramientas geomáticas, imágenes satelitales de alta resolución y metodologías reconocidas como CORINE Land Cover adaptado a Colombia (IDEAM, 2018), se logró una aproximación integral a los procesos de transformación territorial.

Desde el preprocesamiento y análisis visual (Fase I), se evidenció la utilidad de las composiciones de bandas e índices espectrales como el NDVI para identificar patrones de vegetación y zonas de expansión urbana. Aunque estas visualizaciones no permitieron una medición cuantitativa, sí facilitaron una lectura preliminar de las transformaciones espaciales, evidenciando tendencias de presión antrópica sobre coberturas naturales, especialmente en las zonas bajas de la subcuenca.

En la fase cuantitativa del análisis multitemporal (Fase II), el uso de herramientas como *Combine*, *Raster Calculator* y *Tabulate Area* en ArcGIS Pro permitió cuantificar con precisión las transiciones de cobertura. Se evidenció un fuerte proceso de conversión de pastos y áreas abiertas hacia zonas urbanizadas, así como una pérdida neta de coberturas boscosas y cuerpos de agua. Esta dinámica estuvo acompañada por patrones de persistencia en ciertas coberturas, especialmente en sectores estratégicos como la zona oriental de la subcuenca, correspondiente al páramo de Guacheneque, el cual ha sido protegido por su importancia ecológica y su papel como fuente del río Bogotá (Instituto Humboldt, 2020).

Los resultados no solo permitieron detectar cambios específicos entre pares de años, sino también identificar las trayectorias de transformación territorial a lo largo de toda la década analizada. La aplicación de un enfoque lógico binario para detectar el cambio acumulado en el tiempo fue clave para estimar el grado de transformación global de la subcuenca, aportando una perspectiva espacial consolidada.

Finalmente, la fase de formulación de recomendaciones (Fase III) permitió traducir los hallazgos técnicos en propuestas concretas de gestión. Las transformaciones observadas implican desafíos urgentes para la planificación del territorio, la conservación de ecosistemas estratégicos y la gestión del recurso hídrico. Por ello, se sugiere incorporar este tipo de análisis en los

instrumentos de ordenamiento territorial y planes de manejo ambiental, a la vez que se fortalecen estrategias de gobernanza local, educación ambiental y restauración ecológica.

En conjunto, el estudio demuestra la potencia de las herramientas SIG y los sensores remotos para apoyar la toma de decisiones basada en evidencia territorial. La metodología empleada es replicable en otras cuencas o regiones del país, y sus resultados constituyen un insumo técnico valioso para autoridades ambientales, entes territoriales y comunidades comprometidas con el desarrollo sostenible.

14 Conclusiones

- La exploración visual mediante el procesamiento de imágenes satelitales PlanetScope, utilizando combinaciones de bandas e índices espectrales, permitió identificar tendencias espaciales clave en la evolución del paisaje de la Subcuenca Río Alto Bogotá entre 2016 y 2025. A través de la secuencia de mapas generados, se evidenció una expansión progresiva de las zonas urbanizadas —especialmente intensa entre 2016 y 2018— sobre áreas previamente ocupadas por pastos y zonas abiertas, marcando una clara transformación del uso del suelo. Esta aproximación también permitió visualizar la relativa estabilidad de los bosques en zonas altas, especialmente en el sector oriental asociado al Páramo de Guacheneque, así como la fragmentación gradual de pastos y la reducción de áreas abiertas. La metodología visual fue fundamental como fase exploratoria para orientar y validar los análisis cuantitativos posteriores.
- La aplicación del índice NDVI complemento de manera satisfactoria en análisis visual ya que permitió diferenciar las coberturas vegetales de las antrópicas, los valores obtenidos del NDVI del periodo comprendido entre 2016 y 2025 son similares con la clasificación propuesta por los autores, los valores obtenidos de NDVI coinciden en que los valores cercanos a -1 y 0 se clasificaron como suelos desnudos y superficies urbanas como las cabeceras de los municipio de Chocontá y Villapinzón y, los valores cercanos a 1 se clasificaron como cobertura vegetal como pastos y bosques, este último están asociado al Páramo de Guacheneque.
- El análisis multitemporal de coberturas del suelo en la Subcuenca Río Alto Bogotá entre 2016 y 2025 permitió identificar transformaciones territoriales significativas, destacándose la expansión de zonas urbanizadas (3.163,8 ha de ganancia) principalmente a expensas de pastos y bosques, que presentaron las mayores pérdidas netas (8.733,32 ha y 5.260,75 ha respectivamente). Estas tendencias evidencian una presión creciente sobre ecosistemas estratégicos, fragmentación de coberturas naturales y una reconfiguración del paisaje. La persistencia de coberturas como pastos (12.560,11 ha) y bosques (4.709,37 ha), aunque relevante, no contrarresta la magnitud del cambio, lo que sugiere un proceso continuo de sustitución del uso del suelo que debe ser monitoreado con mayor rigurosidad.

- La implementación de herramientas geomáticas como Raster Calculator, Combine y Tabulate Area en ArcGIS Pro permitió no solo cuantificar con precisión la pérdida, ganancia y persistencia de coberturas, sino también visualizar espacialmente los patrones de cambio, identificar áreas críticas y priorizar sectores con mayor transformación. Esta capacidad analítica facilitó la producción de información clave para la planificación territorial, como la identificación de la zona oriental de la subcuenca (Páramo de Guacheneque) como un sector de alta estabilidad ecológica y nula presión urbana. En conjunto, la metodología aplicada fortalece la base técnica para una toma de decisiones informada, orientada a la sostenibilidad, conservación y ordenamiento del territorio en áreas de alta sensibilidad ambiental.
- La integración de los resultados multitemporales permitió evidenciar con claridad los cambios en la cobertura del suelo en la subcuenca Río Alto Bogotá entre 2016 y 2025, revelando procesos significativos como la expansión urbana y la pérdida de coberturas naturales. A partir de estos hallazgos, se formularon propuestas de manejo territorial y conservación, basadas en el uso de herramientas SIG y análisis geoespacial.

La información obtenida respalda la importancia de delimitar zonas para el crecimiento urbano, promover la restauración de ecosistemas y proteger las fuentes hídricas, en conjunto con estrategias de educación ambiental y fortalecimiento de la gobernanza. Esta fase constituye un aporte clave para la toma de decisiones ambientales, con una visión integral y alineada con los objetivos de sostenibilidad regional y global.

15 Recomendaciones

Se sugiere realizar trabajo de campo con la intención de corroborar las clasificaciones de coberturas del suelo, lo que permite validar y mejorar la precisión de los resultados obtenidos mediante teledetección. Este proceso contribuye a una mejor caracterización de las coberturas reales presentes en el territorio.

Es fundamental implementar sistemas continuos de monitoreo del cambio de cobertura a través de imágenes satelitales actualizadas de alta resolución y el uso de herramientas SIG. Esto permitirá establecer una vigilancia sistemática, precisa y oportuna de las transformaciones territoriales, especialmente en áreas sensibles como zonas de recarga hídrica, coberturas forestales y márgenes de cuerpos de agua.

Además, se recomienda incorporar modelos predictivos de cambio de uso del suelo que integren variables socioeconómicas, ambientales y de presión antrópica. Estos modelos facilitarán la anticipación de escenarios futuros de transformación y la formulación de estrategias preventivas en sectores identificados como de alta vulnerabilidad ecológica o riesgo de expansión descontrolada.

Los municipios de Villapinzón y Chocontá, que comprenden parte del área de estudio, deberían considerar la integración de este tipo de análisis multitemporal en sus instrumentos de planificación territorial, tales como los Planes de Ordenamiento Territorial (POT) y los Planes de Ordenamiento y Manejo de Cuencas (POMCA). Esto les permitirá orientar su desarrollo urbano y rural de manera sostenible, minimizando los impactos negativos sobre los ecosistemas estratégicos de la subcuenca.

Finalmente, se recomienda fomentar procesos de capacitación técnica en el uso de tecnologías geoespaciales para entidades ambientales y gobiernos locales, fortaleciendo sus capacidades para la toma de decisiones basadas en evidencia espacial. La articulación entre academia, comunidades locales y autoridades ambientales será clave para garantizar una gestión integral del territorio alineada con los principios del desarrollo sostenible y la conservación de los servicios ecosistémicos de la región.

16 Referencias

- Acevedo Moreno, C. C. (2024). *Identificación de coberturas mediante procesamiento de imágenes satelitales para monitoreo del paisaje ecológico*. Universidad de Antioquia.
- Agus, F., Prafanto, A., & Kamil, Z. A. (2023). Detecting land use land cover using supervised maximum likelihood algorithm on spatiotemporal imagery in Samarinda, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1266(1), 012085. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1266/1/012085>
- Arango Sánchez, J. F., Pacheco Figueroa, C. J., & Vargas, L. A. (2023). Valoración económica de los servicios ecosistémicos: Una revisión sistemática. *Revista Venezolana de Gerencia: RVG*, 28(103), 948-964. <https://doi.org/10.52080/rvgluz.28.103.3>
- Arellano Verdejo, J., Lazcano Hernández, H. E., & Callejas Jiménez, M. E. (2024). *Una breve introducción a la percepción remota* (El Colegio de la Frontera Sur). <https://www.ecosur.mx/libros/producto/una-breve-introduccion-a-la-percepcion-remota/>
- Arias-Muñoz, P., Escolano, S., & Saz, M. Á. (2024). Tendencias de cambio de usos y coberturas de suelo en la cuenca hidrográfica media-alta del río Mira en Ecuador. *Invest. geogr.*, Article ART-2024-137710. *Investigaciones Geograficas* (Spain). <https://doi.org/10.14198/INGEO.25248>
- Aslan, N., & Koc-San, D. (2021). The Use of Land Cover Indices for Rapid Surface Urban Heat Island Detection from Multi-Temporal Landsat Imageries. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(6), Article 6. <https://doi.org/10.3390/ijgi10060416>
- Atencia Vergara, V. A., Contreras Chavez, J. J., & Vergara Herrera, D. M. (2008). Estudio multitemporal de imágenes satelitales con fines de delimitación del complejo bajo San Jorge margen izquierdo (b13) y diagnóstico de zonas intervenidas antropicamente (agricultura y ganadería). [Universidad de Sucre]. <https://repositorio.unisucre.edu.co/server/api/core/bitstreams/9d61a985-9a6f-49c2-9c80-ddfb4d67b656/content>
- Autoridad Nacional de Licencias Ambientales - ANLA. (2020). Reporte de análisis regional de la Subzona Hidrográfica del Río Bogotá. Subdirección de Instrumentos, Permisos y Trámites

Ambientales. <https://www.anla.gov.co/documentos/biblioteca/07-01-2021-anla-rarsh-rio-bogota.pdf>

Barrios Amaya, J., & Ochoa Cáceres, L. F. (2021). *Análisis Multitemporal De Cambios Del Uso Del Suelo Y Cobertura En La Cuenca Media Del Río Bogotá Desde 2013 A 2020*. <http://hdl.handle.net/20.500.12558/3786>

Burbano Girón, J., Molina Berbeo, M. A., Gutiérrez, C., Benítez, A., Cruz-Rodríguez, C., & Ochoa Quintero, J. M. (2020). Estado de conservación de los páramos en Colombia. Instituto Humboldt. <https://reporte.humboldt.org.co/biodiversidad/2020/cap1/101/> CAR. (2006). *Elaboración del diagnóstico, prospectiva y formulación de la Cuenca Hidrográfica del Río Bogotá: Subcuenca río Alto Bogotá*. Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. <https://www.car.gov.co/vercontenido/63>

Basheer, S., Wang, X., Ali Nawaz, R., Pang, T., Adekanmbi, T., & Qasim Mahmood, M. (2024). A comparative analysis of PlanetScope 4-band and 8-band imageries for land use land cover classification. *Geomatica*, 76(2), 100023. <https://doi.org/10.1016/j.geomat.2024.100023>

Bill Donatien, L. M., Biona Clobite, B., & Meris Midel, M. L. (2024). Land use land cover change detection using multi-temporal Landsat imagery in the North of Congo Republic: A case study in Sangha region. *Geocarto International*. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10106049.2024.2425184>

CAR. (2006). *Elaboración del diagnóstico, prospectiva y formulación de la Cuenca Hidrográfica del Río Bogotá: Subcuenca río Alto Bogotá*. Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. <https://www.car.gov.co/vercontenido/63>

CAR. (2019a). *Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del Río Bogotá*. Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. <https://www.car.gov.co/vercontenido/3691>

CAR. (2019b). *Zonas A Restaurar en la Cuenca del Río Bogotá*. Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. <https://datosgeograficos.car.gov.co/maps/5e7a31ccd86b49babbbf681e38d26d93/about>

- Chomani, K., & Pshdari, S. (2024). Evaluation of Different Classification Algorithms for Land Use Land Cover Mapping. *Kurdistan Journal of Applied Research*, 9(2), Article 2.
- Contreras Contreras, J. L., & Contreras Contreras, Y. K. (2021). *Determinación De Zonas Susceptibles A Inundación En El Municipio De Villapinzón – Cundinamarca, Mediante El Uso Del Sistema De Información Geográfica (SIG)*. <http://hdl.handle.net/20.500.12558/3791>
- Escobar-López, A., Castillo-Santiago, M. Á., Mas, J. F., Hernández-Stefanoni, J. L., & López-Martínez, J. O. (2024). Identification of coffee agroforestry systems using remote sensing data: A review of methods and sensor data. *Geocarto International*. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10106049.2023.2297555>
- Espitia Falla, M. M. (2020). *Ficha para la inclusión del cambio climático y la variabilidad climática en el ordenamiento territorial* (1ra ed.). Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. <https://www.conservation.org.co/media/Villapinzon%CC%81n.pdf>
- Ezaidi, S., Aydda, A., Kabbachi, B., Althuwaynee, O. F., Ezaidi, A., Ait Haddou, M., Idoumskine, I., Thorpe, J., Park, H.-J., & Kim, S.-W. (2022). Multi-temporal Landsat-derived NDVI for vegetation cover degradation for the period 1984-2018 in part of the Arganeraie Biosphere Reserve (Morocco). *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 27, 100800. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100800>
- FAO. (2020). *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2020—Principales resultados* (p. 16). FAO. <https://doi.org/10.4060/ca8753es>
- FAO. (2022). *El estado de los bosques del mundo 2022*. FAO. <https://doi.org/10.4060/cb9360es>
- Florez Alcalá, J. C. (2023). *Potencialidad de las imágenes PlanetScope para diferenciar vegetación en ecosistemas cenagosos tropicales* [Universidad de Córdoba]. <https://repositorio.unicordoba.edu.co/server/api/core/bitstreams/ea39c29d-283e-4c31-97d6-239b75ce58c1/content>
- García Culqui, C. L., & Hachi Pazmiño, M. X. (2022). Análisis multitemporal de la dinámica de uso de suelo y cobertura vegetal en la microcuenca del Río Illangama. *Revista de Investigación TALENTOS*, 9(2), 101-116.

- García, M., Acuña, C., Valero, E., & Álvarez, X. (2024). *Detección de cambios en el uso del suelo en el Corredor Ecológico Río Tea (NO España)*. Teledetección y Cambio Global: Retos y Oportunidades para un Crecimiento Azul. XX Congreso de la Asociación Española de Teledetección. http://eo.csic.es/images/yootheme/aet24/Libro%20ACTAS%20XX_AET.pdf
- Güiza-Suarez, L., Rojas Moreno, Y. C., & Morales Rozo, D. (2020). Tecnologías de la información y las comunicaciones aplicadas a la gestión del agua: El caso del río Bogotá. *Revista de Ciencias Ambientales*, 54(1), 76-94. <https://doi.org/10.15359/rca.54-1.5>
- Gutiérrez Mora, Y. E. (2022). *Implementación de la metodología Corine Land Cover para generación de la capa geográfica de coberturas de la tierra del año 2019, escala 1:25000, a partir de imágenes satelitales Planet Scope para la jurisdicción de Corpochivor* [Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. <http://hdl.handle.net/11349/28855>
- Gutiérrez Villalobos, S., & Tarqui Delgado, M. (2021). Evaluación multitemporal en plantaciones de eucalipto (*Eucalyptus globulus* L.), con el uso de teledetección y S.I.G. en el municipio de Inquisivi, La Paz. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, 8(3), 113-124. <https://doi.org/10.53287/izej8253pc54w>
- IDEAM, IGAC Y CORMAGADLENA. (2008). *Mapa de Cobertura de la Tierra Cuenca Magdalena-Cauca: Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia a escala 1:100.000*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Instituto Geográfico Agustín Codazzi y Corporación Autónoma Regional del río Grande de La Magdalena. https://www.researchgate.net/publication/363762843_Mapa_de_Cobertura_de_la_Tierra_Cuenca_Magdalena-Cauca
- IGAC. (2021). *Elaboración del Mapa de Cobertura de la Tierra Escala 1:10.000* (No. 1; p. 37). Instituto Geográfico Agustín Codazzi. https://www.igac.gov.co/sites/default/files/listadomaestro/in-gag-pc07-03_elaboracion_del_mapa_de_cobertura_de_la_tierra_escala_110.000.pdf
- IGAC. (2023). *Gestión de Información de Ordenamiento Territorial* (No. 2; p. 10). Instituto Geográfico Agustín Codazzi. https://www.igac.gov.co/sites/default/files/listadomaestro/pc-geg-02_v2_gestion_de_informacion_de_ordenamiento_territorial.pdf

- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM, & Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible - MADS. (2024). *Monitoreo de la superficie de bosque y la deforestación en Colombia -2023 (Resumen de resultados)* (p. 14). IDEAM. <https://insightcrime.org/wp-content/uploads/2024/07/monitoreo-de-la-superficie-de-bosque-y-la-deforestacion-en-colombia-2023-resumen-de-resultados.pdf>
- Ivanova, Y., Huertas Lugo, V. D., & Pulgarín Herrera, M. F. (2025). Incidencia del Cambio de Coberturas Vegetales sobre la Capacidad de Regulación Hídrica en la Cuenca del Río Cuja, Colombia. *Revista EIA*, 22(43), Article 43. <https://doi.org/10.24050/reia.v22i43.1793>
- Jarro, E. (2004). *Guía técnica para la restauración de áreas de ronda y nacederos del distrito capital*. DAMA. https://oab.ambientebogota.gov.co/wp-content/uploads/dlm_uploads/2020/09/Guia-Restauracion-areas-de-ronda-y-nacederos-del-DC.pdf
- Jensen, J. R. (2005). *Introductory digital image processing: A remote sensing perspective* (3rd ed.). Prentice Hall.
- Kumar, P., & Mina, U. (2021). *Fundamentals of Ecology and Environment* (3ra ed.). Pathfinder Publication. https://www.researchgate.net/publication/355381814_Fundamentals_of_Ecology_and_Environment_3e
- Lázaro, A., & Tur, C. (2018). Los cambios de uso del suelo como responsables del declive de polinizadores: *Ecosistemas*, 27(2), 23-33. <https://doi.org/10.7818/ECOS.1378>
- León León, J., Medina, R. J., & Ovalle, D. M. (2021). Mapa de coberturas del suelo utilizando imágenes satelitales Sentinel-2 y Landsat-8 del municipio de Covarachía – Colombia. *Hashtag*, 2(19), Article 19. <https://doi.org/10.52143/2346139X.930>
- Liang, F., Zhang, X., Li, H., Yu, H., Lin, Q., Jiang, M., & Zhang, J. (2022). Land Use Classification Based on Maximum Likelihood Method. En *Advances in Intelligent Data Analysis and Applications* (pp. 133-139). Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-5036-9_15

Liang, S., Cheng, J., & Zhang, J. (2020). Maximum Likelihood Classification of Soil Remote Sensing Image Based on Deep Learning. *Earth Sciences Research Journal*, 24(3), Article 3.

<https://doi.org/10.15446/esrj.v24n3.89750>

Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., & Chipman, J. W. (2015). *Remote Sensing and Image Interpretation* (7th ed.). John Wiley & Sons.

https://www.bkbcollege.in/upload/dpt_book/1669887716.pdf

Lozano Rodriguez, J. L. (2024). *Evaluación temporal de la cobertura vegetal mediante teledetección en la provincia de Huanta—Ayacucho, 2017-2021* [Universidad Continental].

https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/15746/1/IV_FIN_107_TE_Lo_zano_Rodriguez_2024.pdf

Martínez Ardila, N. J., & Murcia García, U. G. (2010). *Leyenda nacional de coberturas de la tierra: Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia: escala 1:100.00*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

Mieles-Giler, J. W., Guerrero-Calero, J. M., Moran-González, M. R., & Zapata-Velasco, M. L. (2024). Evaluación de la degradación ambiental en hábitats Naturales. *Journal of Economic and Social Science Research*, 4(3), Article 3.

<https://doi.org/10.55813/gaea/jessr/v4/n3/121>

Monroy Hernández, J. (2022). Transformación del paisaje y pérdida del servicio ecosistémico de regulación hídrica en cuencas urbanas. Casos microcuencas Tintal y Torca en la ciudad de Bogotá, Colombia. *Revista de geografía Norte Grande*, 82, 249-268.

<https://doi.org/10.4067/S0718-34022022000200249>

Montero, M. C., Bogino, B. M., Bettera, M. A., & Hildman, M. F. (2023). Análisis multitemporal de cambios en la cobertura y uso del suelo mediante clasificación supervisada. En *Territorialidad y perspectivas geográficas: I Jornada de divulgación académica-científica del Departamento de Geografía* (1.^a ed., p. 180). UniRío Editora.

<https://www.unirioeditora.com.ar/wp-content/uploads/2023/03/978-987-688-519-5.pdf#page=91>

Moran, M. (s. f.). La Agenda para el Desarrollo Sostenible. *Desarrollo Sostenible*. Recuperado 6 de julio de 2025, de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/development-agenda/>

Moya Ángel, G., & Párraga, S. M. (2014). *Recursos de apelación interpuestos contra las providencias de 25 de agosto y su complementaria de 16 de septiembre de 2004 proferidas por la sección cuarta, subsección "b", del tribunal administrativo de Cundinamarca actor: Gustavo Moya Ángel y otros.*

Niño Martínez, Y. M. (2020). *Análisis multitemporal mediante imágenes de sensores remotos para la determinación de los cambios de uso de suelo en el municipio de San Francisco de Sales, Cundinamarca (Colombia) entre los años 90's y 2018* [Magister en Geomática, Universidad Nacional de La Plata]. <https://doi.org/10.35537/10915/111198>

Olaya, V. (2014). *Sistemas de Información Geográfica.* <https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/LIB-199.pdf>

Olaya, V. (2020). *Sistemas de Información Geográfica.* Internet Archive. <https://archive.org/details/2020-sig>

Ozyavuz, M., Bilgili, B. C., & Salici, A. (2015). Determination of vegetation changes with NDVI method. *Journal of Environmental Protection and Ecology*, 16(1), 264-273.

Perea-Ardila, M. A., Vaquiro, J. R., & Rodríguez-Valenzuela, J. (2022). Determinación de la cobertura y uso del suelo utilizando RapidEye en el Parque Nacional Natural los Nevados y su zona amortiguadora en Colombia. *Revista de Ciencias Ambientales*, 56(2), 148-176. <https://doi.org/10.15359/rca.56-2.8>

Planet. (2020). *Planet Imagery Product Specifications.* <https://earth.esa.int/eogateway/documents/20142/37627/Planet-combined-imagery-product-specs-2020.pdf>

Pumarejo Cabrera, D. H. (2024). *Análisis de los cambios en la cobertura vegetal en el Sistema Delta Estuarino del Río Magdalena Ciénaga Grande de Santa Marta por medio de imágenes satelitales* [Universidad de Antioquia]. <https://hdl.handle.net/10495/44518>

Rentería Cárdenas, M. (2024). *Análisis comparativo del rendimiento de clasificación supervisada en imágenes compuestas y modificadas por reducción en PNN los nevados y alrededores* [Universidad de Manizales]. <https://ridum.umanizales.edu.co/server/api/core/bitstreams/3ff33cbb-f408-4eb0-b7c5-0f520f822afc/content>

- Richards, J. A., & Jia, X. (2006). Remote sensing digital image analysis. Springer.
<https://pro.arcgis.com/en/pro-app/3.3/tool-reference/spatial-analyst/raster-calculator.htm>
- Ríos, S. C., Alfaro, S. Z., Ríos, E. R., & Párraga, V. M. (2014). Comparación de técnicas para determinar cobertura vegetal y usos de la tierra en áreas de interés ecológico, Manabí, Ecuador. *UD y la Geomática*, (9), 9-17.
- Severino Jiménez, J. (2024). *Análisis multitemporal del cambio en las unidades de uso del suelo del distrito de Corrales durante el periodo 2000 – 2024* [Universidad Nacional de Tumbes].
<https://repositorio.untumbes.edu.pe/handle/20.500.12874/65501>
- Shults, R., Farahat, A., Usman, M., & Rahman, M. M. (2025). Multi-Temporal Remote Sensing Satellite Data Analysis for the 2023 Devastating Flood in Derna, Northern Libya. *Remote Sensing*, 17(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/rs17040616>
- Suárez Londoño, A. S., Jiménez López, A. F., Castro Franco, M., & Cruz Roa, A. A. (2017). Clasificación y mapeo automático de coberturas del suelo en imágenes satelitales utilizando Redes Neuronales Convolucionales. *Orinoquia*, 21(1 Sup), 64-75.
<https://doi.org/10.22579/20112629.432>
- Suárez-Parra, K. V., Cély-Reyes, G. E., & Forero-Ulloa, F. E. (2016). Validación de la metodología Corine Land Cover (CLC) para determinación espacio-temporal de coberturas: Caso microcuenca de la quebrada Mecha (Cómbita, Boyacá), Colombia. *Biota Colombiana*, 17(1), 1-15.
- Toro Espinoza, A. A., & Artos Usuay, C. D. (2024). *Evaluación de la calidad ambiental ecosistémica mediante herramientas de teledetección en la cuenca del Río Lita* [bachelorThesis, Universidad Técnica del Norte].
<https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/16305>
- Tristán, P., Wainschenker, R., & Doorn, J. H. (2008). *Normalización de imágenes satelitales en el análisis multi-temporal*. 315-319. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/20582>
- Valencia, K., & Beltrán, S. (2025). Dinámica de la cobertura del suelo en Tabacundo (2014-2024): Expansión de la agricultura y los invernaderos. *CienciAmérica*, 14(1), 139-160.
<https://doi.org/10.33210/ca.v14i1.502>