

Análisis multitemporal de la expansión urbana y cambios en la cobertura del suelo - Valle de San Nicolás, Antioquia

Wendy Dayana Barraza Martínez

Juan David Guarín González

Verónica Osorio Gómez

Informe final de trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de Titulación del Programa Académico

Director (a):

Ph.D. Alberto Boada

Territorios Inteligentes y Sostenibles

Grupo de Investigación y Desarrollo en Informática y Telecomunicaciones

Universidad de Manizales

Facultad de Ciencias e Ingeniería Especialización en sistemas de información geográfica

Manizales, 2024

Resumen

La expansión urbana es una actividad que ha transformado drásticamente el paisaje en múltiples regiones del mundo. La transformación del uso del suelo ha generado implicaciones significativas para el medio ambiente y la sostenibilidad urbana.

El Valle de San Nicolás, ubicado en Antioquía, se ha convertido en una de las regiones más importantes del departamento. Debido a las altas expectativas de crecimiento y desarrollo de Medellín, esta región del oriente ha experimentado expansión urbana.

El presente trabajo tiene como objetivo realizar un análisis multitemporal de la expansión urbana y su relación con los cambios en la cobertura del suelo en el Valle de San Nicolás, Antioquia entre los años 2018 y 2024, mediante la ejecución de clasificación supervisada a partir de imágenes satelitales de alta resolución, el análisis de cambios en la cobertura del suelo, haciendo uso de una matriz de tabulación cruzada y la cuantificación de la expansión urbana en la zona de estudio.

Los resultados mostraron un claro aumento de la categoría descrita en la Leyenda Nacional propuesta por el Ideam (2010) cómo territorios artificializados en la zona de estudio, así como disminución significativa de las zonas boscosas. Se observó que la zona urbana ocupa actualmente un 10,29% del área de estudio, indicando un crecimiento del 5,65% en los últimos seis años. Estos datos proporcionan una base sólida para entender la dinámica de uso del suelo en la región y son cruciales para futuras decisiones de planificación territorial.

Palabras clave: (Expansión urbana, Análisis multitemporal, usos del suelo, planificación territorial).

Abstract

Urban expansion is an activity that has drastically transformed landscapes in multiple regions around the world. Land-use transformation has generated significant implications for the environment and urban sustainability.

The San Nicolás Valley, located in Antioquia, has become one of the most important regions in the department. Due to high expectations for growth and development in Medellín, this eastern region has experienced urban expansion.

This study aims to conduct a multitemporal analysis of urban expansion and its relationship with land cover changes in the San Nicolás Valley, Antioquia, between 2018 and 2024. The analysis was performed through supervised classification using high-resolution satellite imagery, land cover change analysis via a cross-tabulation matrix, and the quantification of urban expansion in the study area.

The results showed a clear increase in artificialized territories within the study area, as well as a significant decrease in forested zones. It was observed that the urban area currently occupies 10.29% of the study area, indicating a 5.65% growth over the past six years. These findings provide a solid foundation for understanding land-use dynamics in the region and are crucial for future territorial planning decisions.

Keywords: Urban expansion, Multitemporal analysis, Land use, Territorial planning.

Contenido

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN Y SU JUSTIFICACIÓN	7
1.1 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA PROBLEMÁTICA	9
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	14
1.3 JUSTIFICACIÓN	14
2. OBJETIVOS.....	16
2.1 OBJETIVO GENERAL	16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
3. ANTECEDENTES.....	17
4. REFERENTE NORMATIVO Y LEGAL.....	29
5. REFERENTE TEÓRICO	31
6. METODOLOGÍA	38
6.1 ENFOQUE METODOLÓGICO.....	38
6.2 TIPO DE ESTUDIO.....	39
6.3 PROCEDIMIENTO	40
6.3.1. <i>Diseño de metodología para el análisis multitemporal de cambios en la cobertura terrestre y expansión urbana.....</i>	<i>40</i>
6.3.1.1. Búsqueda y descarga de imágenes satelitales	40
6.3.1.2. Procesamiento de imágenes.....	42
6.3.1.3. Análisis de firmas espectrales.....	42
6.3.1.4. Integración de índices espectrales al conjunto de bandas	44
6.3.1.5. Clasificación supervisada de las imágenes	45
6.3.1.6. Suavizado de clasificación mediante Majority/Minority	48
6.3.1.7. Validación de la clasificación supervisada	48
6.3.1.8. Integración de capas adicionales	53
6.3.2. <i>Cuantificación de la expansión urbana</i>	<i>53</i>
6.3.2.1. Cálculo de áreas.....	53
6.3.3. <i>Análisis de cambios en la cobertura del suelo.....</i>	<i>55</i>
6.3.3.1. Visualización y análisis de los resultados.....	56
7. RESULTADOS	57
7.1 ANÁLISIS DE CAMBIO EN LA COBERTURA TERRESTRE	57
7.1.1 <i>Clasificación supervisada.....</i>	<i>57</i>
7.1.2 <i>Matriz de tabulación cruzada.....</i>	<i>62</i>
7.2 CUANTIFICACIÓN DE LA EXPANSIÓN URBANA.....	65
8. CONCLUSIONES	69
9. RECOMENDACIONES.....	71
10. REFERENCIAS.....	73

Lista de figuras

Figura 1. Localización espacial Valle de San Nicolás – Antioquia.	13
Figura 2. Localización de los municipios que conforman el Valle de San Nicolás – Antioquia.	13
Figura 3. Flujograma metodológico.....	40
Figura 4. Separabilidad espectral, ROIs, año 2018.....	47
Figura 5. Separabilidad espectral, ROIs, año 2021.....	47
Figura 6. Separabilidad espectral, ROIs, año 2024.....	48
Figura 7. Creación de ROIs de Validación, año 2018.	49
Figura 8. Creación de ROIs de Validación, año 2021.	49
Figura 9. Creación de ROIs de Validación, año 2024.	50
Figura 10. Matriz de confusión, clasificación supervisada, año 2018.	51
Figura 11. Matriz de confusión, clasificación supervisada, año 2021.	52
Figura 12. Matriz de confusión, clasificación supervisada, año 2024.	52
Figura 13. Tabla de atributos de la clasificación, año 2018. Donde 1, corresponde a bosques; 2, corresponde a territorios agrícolas; 3, areas abiertas, sin o con poca vegetación; 4, territorios artificializados; 5, nubes y 6, aguas continentales.	54
Figura 14. Tabla de atributos de la clasificación, año 2021. Donde 1, corresponde a bosques; 2, corresponde a territorios agrícolas; 3, areas abiertas, sin o con poca vegetación; 4, territorios artificializados; 5, nubes y 6, aguas continentales.	54
Figura 15. Tabla de atributos de la clasificación, año 2024. Donde 1, corresponde a bosques; 2, corresponde a territorios agrícolas; 3, areas abiertas, sin o con poca vegetación; 4, territorios artificializados; 5, nubes y 6, aguas continentales.	54
Figura 16. Clasificación realizada para el año 2018.	58
Figura 17. Clasificación realizada para el año 2021.	58
Figura 18. Clasificación realizada para el año 2024.	59
Figura 19. Expansión urbana en el Valle de San Nicolás, 2018 – 2021 – 2024	66

Lista de tablas

Tabla 1. Referente normativo y legal del presente trabajo.....	29
Tabla 2. Clasificación de coberturas	43
Tabla 3. Matriz general de tabulación cruzada. Tomada de Pontius et al (2004)	56
Tabla 4. Áreas de cobertura terrestre años 2018, 2021 y 2024	60
Tabla 5. Matriz de tabulación cruzada, años 2018 – 2024.....	62
Tabla 6. Cambio neto y cambio total de la cobertura del suelo entre 2018 - 2024.....	63
Tabla 7. Área ocupada por las zonas urbanizadas en el Valle de San Nicolás	67
Tabla 8. Aumento de los predios urbanos. Fuente: Elaboración propia con base en datos de Catastro Antioquia (2019, 2021, 2024).	68

1. Planteamiento del problema de investigación y su justificación

El fenómeno de expansión urbana es una actividad global que ha transformado drásticamente el paisaje en varias regiones del mundo, muchos proyectos urbanísticos se han desarrollado planificadamente y mientras que otros no, lo que ha llevado a la informalidad de las urbes y a la mala distribución de recursos y servicios públicos básicos, con implicaciones significativas para el medio ambiente y la sostenibilidad urbana.

La expansión urbana transforma el uso del suelo y tiene un impacto en el medio ambiente a escala global. Este proceso continuo de cambio en el uso del suelo se ha mantenido desde el surgimiento de las ciudades y se caracteriza por una rápida expansión de tierras, con consecuencias ambientales, sociales y económicas. Estas incluyen la pérdida de hábitat y la extinción de especies, la presión sobre los recursos y el espacio natural circundante, la degradación de los servicios ecosistémicos, la disminución de tierras agrícolas de alta productividad y la migración de la población rural a las ciudades debido a la pérdida de tierras y el desempleo, lo que a su vez contribuye a la formación de asentamientos urbanos marginales (Bernal, 2022).

En el Departamento de Antioquia, dentro de la subregión del Oriente, se encuentra el Altiplano de Oriente, también llamado Valle de San Nicolás, según CORNARE, para el 2015 esta zona contaba con un área de 176.600 Ha., de las cuales 31.400 Ha. correspondían a suelos urbanos y 145.200 Ha. a suelos rurales. En esta subregión se ubican los municipios de El Carmen de Viboral, El Retiro, El Santuario, Guarne, La Ceja, La Unión, Marinilla, Rionegro y San Vicente Ferrer. El Altiplano es la zona que se encuentra más relacionada con las dinámicas de

expansión del Valle de Aburrá, toda vez que le sucede a esta última en importancia para el departamento.

La dinámica entre Medellín y el Oriente de Antioquia ha estado vinculada a las demandas del nodo central (Medellín) y a sus expectativas de crecimiento y expansión económica (Gómez, et al, 2024).

Igualmente, la edificación del Aeropuerto Internacional José María Córdova y su zona franca, junto con la construcción de la autopista Medellín-Bogotá, han afectado en la concentración y estructuración de las poblaciones, generando un crecimiento desordenado y acelerado de la región (Salazar et al, 2020).

Así mismo, se han generado cambios drásticos en el paisaje y el entorno natural, desencadenando efectos significativos en la biodiversidad y la calidad ambiental de la región (López et al., 2023). Este proceso rápido de transformación ha resultado en la pérdida irreparable de hábitats naturales y en la fragmentación del paisaje, generando una mayor vulnerabilidad de los ecosistemas locales frente a fenómenos naturales extremos como inundaciones y deslizamientos de tierra (González et al., 2022).

En este sentido, es crucial comprender en detalle cómo la expansión urbana está afectando el uso y la cobertura del suelo en el Valle de San Nicolás. La investigación busca abordar estas cuestiones analizando los impactos actuales y potenciales de la expansión urbana en el Valle de San Nicolás, para contribuir a políticas y estrategias de planificación urbana que promuevan la sostenibilidad y la equidad en el desarrollo urbano de la región.

Para abordar estos desafíos, es fundamental adoptar enfoques de planificación urbana que integren de manera holística el equilibrio entre el desarrollo urbano y la conservación del entorno

natural. Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) emergen como herramientas cruciales en este proceso, al permitir la identificación de áreas críticas, la evaluación de la disponibilidad de recursos naturales y la simulación de escenarios de desarrollo urbano sostenible. Mediante el análisis espacial y la visualización de datos geospaciales, los SIG facilitan la toma de decisiones informadas en la planificación urbana, promoviendo una gestión más eficiente y equitativa del territorio en el Valle de San Nicolás, generando una articulación efectiva con todos los municipios que lo componen y, haciendo de la información geoespacial un pilar fundamental en el ordenamiento territorial. Estas herramientas tecnológicas proporcionan una base sólida para diseñar estrategias de conservación y restauración del paisaje, así como para desarrollar políticas que fomenten la coexistencia armoniosa entre el desarrollo humano y la preservación del entorno natural en la región.

1.1 Descripción del área problemática

La expansión urbana es un fenómeno global que ha transformado tanto paisajes como economías en todo el mundo. El crecimiento de las áreas urbanas se debe al aumento de la población y a la migración rural-urbana. A medida que las ciudades crecen, ocupan más territorio, lo que puede generar consecuencias tanto positivas como negativas en términos ambientales, sociales y económicos.

Una de las principales razones de la expansión urbana es el crecimiento poblacional. La población mundial ha aumentado significativamente, y con ello la necesidad de espacios urbanos. Según informe sobre los objetivos de desarrollo sostenible de las Naciones Unidas, se estima que el 68 % de la población mundial viva en áreas urbanas en 2050, frente al 55 % que

vive en estas zonas. (UN, 2018). Este incremento ha obligado a las ciudades a expandirse más allá de sus límites tradicionales, absorbiendo áreas rurales y naturales en su proceso.

A nivel de América Latina ha sido uno de los fenómenos más destacados en la región durante las últimas décadas, impulsado tanto por el crecimiento demográfico como por la migración del campo a la ciudad, ha transformado profundamente la estructura social, económica y espacial de los países latinoamericanos. A pesar de que ha generado oportunidades para muchos, también ha planteado desafíos significativos, como la segregación social, la informalidad y los problemas ambientales.

Entre otros factores, la migración del campo a la ciudad es una razón por la que en América Latina crecieron tanto las ciudades. Durante la segunda mitad del siglo XX, millones de personas abandonaron los campos esperando poder encontrar mejores oportunidades en las ciudades. Este éxodo se presentó de forma más relevante e intensa en países como Brasil, México y Argentina, Según la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), en la década de 1950, el 41% de la población latinoamericana vivía en áreas urbanas, mientras que para 2020 esta cifra aumentó al 81% (CEPAL, 2020), este crecimiento urbano acelerado ha dado lugar a una expansión periférica desordenada, caracterizada por la creación de asentamientos informales y barrios marginales.

A nivel local, la expansión urbana en Colombia ha sido un proceso clave en la transformación del país durante las últimas décadas. La migración interna y el desarrollo económico, impulsados por el crecimiento demográfico llevaron a que la urbanización en Colombia se desarrolle en muchos casos de manera rápida y desordenada. Aunque este

fenómeno ha contribuido al desarrollo económico y a la modernización de las ciudades, también ha traído retos significativos en cuanto a desigualdad, planificación y sostenibilidad.

En Colombia durante gran parte del siglo XX, especialmente en las décadas de 1970 y 1980, miles de colombianos abandonaron las áreas rurales, muchos de ellos huyendo del conflicto armado, en busca de seguridad y mejores oportunidades económicas en las ciudades (Departamento Nacional de Estadística DANE, 2018), esto aceleró el crecimiento urbano en ciudades como Bogotá, Medellín y Cali, que se expandieron rápidamente hacia sus periferias, según (Departamento Nacional de Estadística DANE, 2018), en 1951 solo el 39% de la población vivía en áreas urbanas, mientras que en 2018 esta cifra superaba el 76%.

Finalmente, a escala regional, la expansión urbana en el Valle de San Nicolás, Antioquia, es uno de los fenómenos más importantes en la transformación del paisaje urbano y rural del departamento en las últimas décadas. La región, en el altiplano del oriente antioqueño, ha crecido mucho por su cercanía con Medellín, la capital del departamento, y su atractivo para proyectos residenciales e industriales. Este proceso ha generado importantes oportunidades de desarrollo, pero también ha traído consigo desafíos relacionados con la sostenibilidad, la planificación urbana y la preservación del entorno natural (Restrepo et al., 2020).

Uno de los factores clave que ha impulsado la expansión urbana en el Valle de San Nicolás es la creciente demanda de vivienda y espacios industriales por parte de las clases medias y altas de Medellín. A medida que esta ciudad ha crecido y se ha densificado, muchos de sus habitantes han optado por trasladarse a la región de San Nicolás, región que ofrece un entorno más rural y tranquilo con fácil acceso a la capital del departamento de Antioquia (Gómez & Jaramillo, 2019). Este desplazamiento ha sido favorecido por la construcción y puesta en

funcionamiento del Túnel vehicular de Oriente, que ha mejorado significativamente la movilidad entre Medellín y el Valle de San Nicolás (Ministerio de Transporte de Colombia, 2019).

En conclusión, la expansión urbana en el Valle de San Nicolás ha transformado profundamente la región, convirtiéndola en uno de los principales polos de desarrollo económico y residencial de Antioquia. Sin embargo, este proceso ha generado importantes desafíos en términos de sostenibilidad ambiental, planificación urbana y cohesión social. A medida que la región sigue creciendo, será crucial implementar políticas más estrictas de planificación y conservación ambiental para garantizar un desarrollo equilibrado y sostenible. Para ello, se pretende analizar el crecimiento de las zonas urbanas en los diferentes municipios que conforman esta región (Martínez et al., 2021).

Geográficamente, el valle de san Nicolás está ubicado en la subregión del Oriente Antioqueño y comprende los municipios de Rionegro, Guarne, El Carmen de Viboral, El Retiro, La Ceja, Marinilla, Santuario y San Vicente Ferrer, 8 de los 23 municipios que conforman la región del oriente de Antioquia, este valle limita geográficamente al Norte: con los municipios de Bello, Copacabana, Girardota, Barbosa y concepción, por el Este: con los municipios de Peñol, Granada y Cocorná, por el Oeste: con el municipio de Medellín, la capital del departamento, y otros municipios del Área Metropolitana como Envigado y Sabaneta, y por el Sur: con municipios como Abejorral y Sonsón (Figura 1).

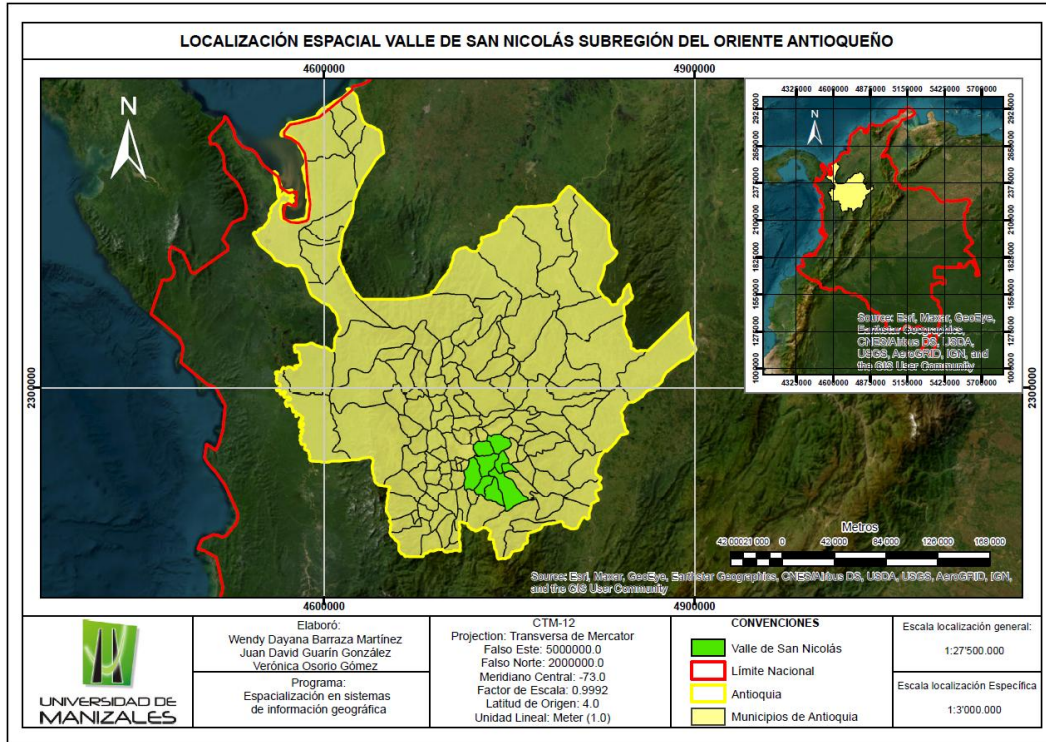


Figura 1. Localización espacial Valle de San Nicolás – Antioquia.

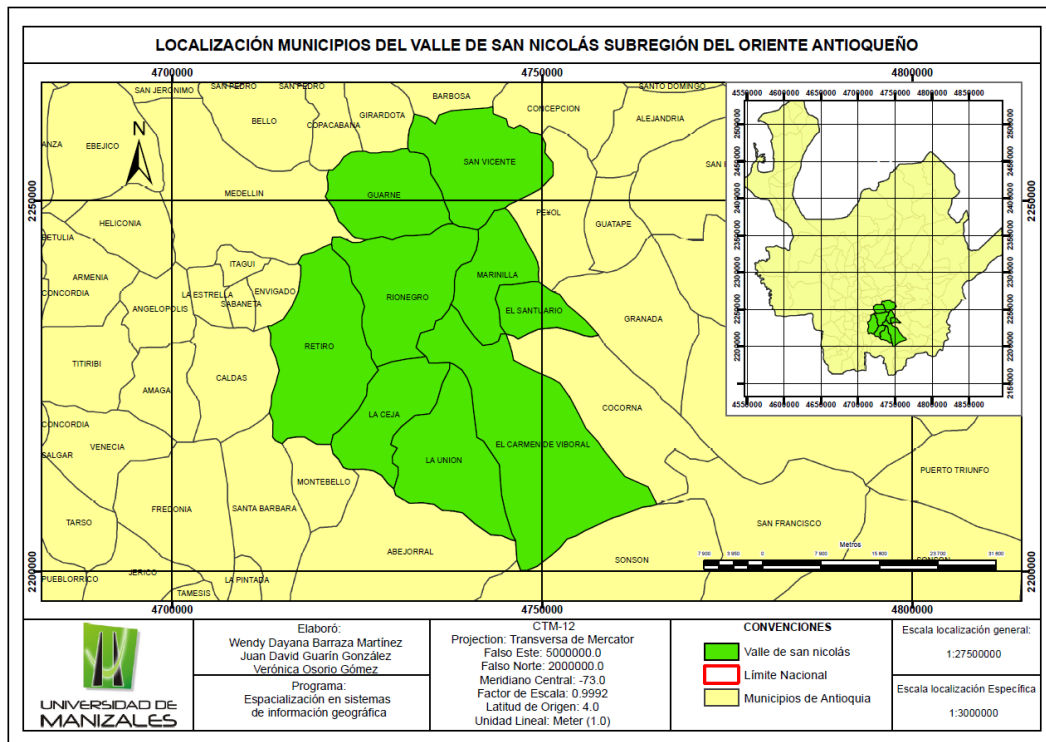


Figura 2. Localización de los municipios que conforman el Valle de San Nicolás – Antioquia.

1.2 Formulación del problema

¿Cómo afecta la expansión urbana al uso y cobertura del suelo en el Valle de San Nicolás, y de qué manera el procesamiento de imágenes satelitales puede ser utilizado para abordar estos efectos y contribuir a una planificación urbana sostenible en la región?

1.3 Justificación

Históricamente, los valles de San Nicolás (Oriente Antioqueño Cercano) y Aburrá (Área Metropolitana de Medellín) han estado vinculados por sus dinámicas comerciales, industriales, de recreación, entre otros. El Oriente ha sido receptor del movimiento industrial, con disponibilidad de terrenos económicamente accesibles para el asentamiento de fábricas, alta disponibilidad de recurso hídrico y un sistema vial y aeroportuario que lo configuran como un nuevo epicentro (Pineda Gómez, 2021). Así mismo, la rápida ocupación del territorio en el Oriente antioqueño, con la llegada de nuevos pobladores, ha evidenciado impactos ambientales (contaminación del suelo y corrientes de agua), impactos en la economía (incremento del valor del suelo), impactos sociales (segregación de la población campesina), impactos en la movilidad (desbordamiento de la capacidad vial existente), entre otros factores propios de una urbanización acelerada (Fernández et al., 2021)

Por otro lado, en Colombia se han identificado dificultades en la apropiación de software especializado en SIG para el desarrollo de los Planes de Ordenamiento Territorial (POT) en los diferentes municipios del país. Esto se debe a la escasez de información geográfica accesible para las administraciones públicas, lo que subraya la necesidad de utilizar herramientas tecnológicas para monitorear la organización geográfica de cada región (Gutiérrez Ossa & Rodríguez, 2022).

De acuerdo a lo anterior, se hace necesario analizar los efectos de la expansión urbana descontrolada en el uso del suelo y los recursos naturales en el Valle de San Nicolás y, gracias a los Sistemas de Información Geográfica (SIG), es posible abordar dicha problemática con el fin de brindar aportes para una planificación urbana sostenible, mejorando la calidad de vida de sus habitantes y conservando buenas condiciones en los ecosistemas de la zona.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Realizar un análisis multitemporal de la expansión urbana y cambios en la cobertura del suelo en el Valle de San Nicolás, Antioquia

2.2 Objetivos específicos

Establecer una metodología para el análisis multitemporal de cambios en la cobertura terrestre y expansión urbana.

Analizar los cambios en la cobertura del suelo asociados a la expansión urbana en el valle de San Nicolás durante el periodo 2018 – 2024.

Cuantificar la expansión urbana en el valle de San Nicolás durante el periodo 2018 – 2024.

3. Antecedentes

El fenómeno de expansión urbana no hace parte de un concepto nuevo, la Revolución Industrial fue un evento transformador en la historia que impulsó un fenómeno conocido como “la urbanización” a gran escala, el cual dio lugar a un crecimiento exponencial de las ciudades, acompañado de cambios profundos en la economía, la cultura y la estructura social (Lewis, 2022). La urbanización en América Latina genera un aumento en la demanda de recursos naturales, tales como agua, energía y alimentos. A medida que las ciudades crecen, se incrementa el uso de energía y la producción de residuos, lo que resulta en mayores emisiones de gases de efecto invernadero y contaminación ambiental. Esto es especialmente problemático en las ciudades en desarrollo, donde los procesos de expansión urbana suelen ser informales y poco planificados, exacerbando problemas de desigualdad social y deterioro ambiental (Campo & Alfonso, 2018).

De igual manera, los cambios en la cobertura del suelo debido a la urbanización pueden llevar a la pérdida de servicios ecosistémicos esenciales, como la regulación climática y la purificación del agua (Kondratyeva et al., 2020), lo que indirectamente eleva los costos de restauración y mantenimiento ambiental en áreas urbanas. Asimismo, el crecimiento desordenado de las ciudades que produce drásticos cambios en el paisaje genera la fragmentación de los ecosistemas y disminuye la conectividad entre hábitats, afectando la continuidad ecológica y la capacidad de las especies para moverse entre áreas de conservación (Cuevas, 2022). Por ello, se sugiere la necesidad de estrategias proactivas para equilibrar el crecimiento económico con la sostenibilidad ambiental y social. Esto incluye la implementación de políticas para mejorar la infraestructura urbana, reducir la contaminación y garantizar un acceso equitativo a los recursos en las áreas urbanas (Lewis, 2022).

El término ordenamiento territorial hace referencia a un proceso cuya finalidad es gestionar el uso del territorio, teniendo en cuenta las necesidades de la población, de tal manera que se logre un territorio organizado y sostenible (Coello, 2019). Es importante que este proceso se ejecute de manera correcta, realizando un diagnóstico adecuado de cada territorio en particular, teniendo en cuenta los conflictos territoriales y los agentes sociales implicados (Munévar, González y Henao, 2016). Asimismo, es esencial comprender que se debe hacer énfasis en la conservación de la naturaleza dentro de las políticas de ordenamiento territorial, así como incentivar a la publicación científica útil para la formulación de estas políticas públicas (Degele, 2023).

Los análisis de cobertura del suelo son ampliamente utilizados a nivel global para estudiar los cambios en los ecosistemas de un determinado territorio, por lo cual se consideran útiles en temas de planificación territorial (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, 2020). Para realizar estos estudios se hace uso de imágenes satelitales y aéreas (National Ocean Service, 2021), las cuales pueden ser analizadas haciendo uso de herramientas SIG (Sistemas de información geográfica). Se ha demostrado que los Sistemas de Información geográfica tienen diversas aplicaciones, y que su uso es de gran utilidad para la planificación territorial. Estas herramientas permiten ahorrar tiempo y dinero y son de gran ayuda para el análisis de problemas y la generación de soluciones (Jebur, 2021).

Un ejemplo del uso de herramientas SIG e interpretación de imágenes satelitales para la identificación de cambios en la cobertura terrestre es el trabajo de Giménez & García (2024), quienes realizaron un estudio de la expansión urbana de Murcia (España) comprendido entre 1990 y 2018, mediante el cual pudieron identificar la triplicación de la cobertura artificial del

territorio en un periodo de tan solo 30 años. Otro ejemplo que vale la pena mencionar es la investigación de Yuca (2021), quien a través de un análisis multitemporal demostró que la expansión de la zona de amortiguamiento de un refugio silvestre en Perú produce cambios en la cobertura terrestre, disminuyendo el área de ecosistemas naturales.

Cabe resaltar que estas herramientas también son de utilidad para realizar predicciones de los cambios de cobertura. Estas permiten una planificación territorial y gestión ambiental sostenible. El estudio de Maza, et al (2024), realizó la predicción de las coberturas del suelo en la Subcuenca del Casacay, Ecuador, el cual sugirió una disminución significativa de las áreas boscosas y un aumento de las áreas agropecuarias para el año 2040.

Por su parte, el territorio colombiano conocido como Valle de San Nicolás, en el Oriente antioqueño, ha experimentado un proceso de transformación territorial significativo desde la década de 1960 hasta el presente, pasando de ser una región agrícola y rural, a un complejo urbano e industrial. Esto lo ha convertido en uno de los centros urbanos de mayor crecimiento en Colombia, cuya transformación ha sido impulsada, en gran parte, por la expansión de Medellín hacia la región (Orozco, 2020).

En un análisis reciente sobre los cambios en el uso del suelo en el Valle de San Nicolás, se evidenció que la región ha enfrentado una acelerada urbanización en las últimas décadas. Este proceso ha generado una conversión significativa de terrenos rurales en áreas urbanas e industriales, impactando la sostenibilidad ambiental y la estructura social local. Factores como el crecimiento poblacional y la expansión de proyectos residenciales e industriales son los principales motores de este fenómeno (Zuluaga, 2020). Sin embargo, estudios más recientes señalan a la urbanización y cambios en el uso del suelo como una problemática que afecta actualmente varios factores importantes en la región.

La ciudad de Medellín es considerada núcleo urbano y económico clave para la región Antioqueña, actuando como un motor de crecimiento y modernización, no solo para la ciudad en sí, sino también para las áreas circundantes. La expansión del proyecto Medellín ha abarcado más allá de sus límites tradicionales, afectando regiones como el Valle de San Nicolás y el Cauca Medio. Este proceso ha estado impulsado por la necesidad de extender la infraestructura urbana, la actividad industrial y los servicios hacia áreas más rurales debido a la saturación de la ciudad y su área metropolitana. La expansión incluye la creación de nuevas zonas residenciales, industriales y comerciales, así como el desarrollo de infraestructura de transporte y servicios (Muñoz & Pineda, 2023).

Como consecuencia de la expansión del proyecto Medellín, se ha producido una transformación territorial significativa en el Valle de San Nicolás, donde tierras previamente agrícolas y rurales han sido urbanizadas para dar paso a proyectos residenciales, industriales y de infraestructura. Este cambio ha generado tensiones en cuanto a la sostenibilidad ambiental, ya que la urbanización ha puesto presión sobre los recursos naturales y el paisaje del valle. Además, se han afectado las dinámicas socioeconómicas de la región, impulsando el crecimiento económico y la modernización, pero al mismo tiempo, desplazando a comunidades rurales y afectando la tradición campesina. Esta transformación también ha provocado desafíos en la planificación territorial, con un desarrollo que, en ocasiones, ha sido percibido como desorganizado o excluyente para ciertos sectores de la población local (Muñoz & Pineda, 2023).

A pesar de los beneficios que este desarrollo ha traído, como mejoras en vivienda, educación, empleo y transporte, algunos actores locales han señalado que este proceso no ha considerado adecuadamente las necesidades y opiniones de las comunidades locales, señalando

que la expansión urbana ha pasado por alto el potencial agropecuario de la zona y la tradición campesina, generando la exclusión de los campesinos en los planes de desarrollo subregional (Orozco, 2020).

El Valle de San Nicolás está viviendo una reconfiguración profunda donde lo rural se desvanece en favor de lo urbano, con la creación de una "ruralidad sin campesinos" en donde se observa la transformación del uso del suelo que responde más a intereses económicos y urbanos que a los tradicionales agrícolas al reducir las áreas dedicadas a la agricultura y aumentar las áreas urbanizadas (Orozco, 2020).

Por otro lado, López (2021) señaló cómo la transformación del paisaje y los cambios en la cobertura vegetal del Valle de San Nicolás, caracterizada por la reducción de áreas verdes y la expansión urbana, ha influido en la proliferación del mosquito *Aedes aegypti*, vector del dengue.

La disminución de la cobertura vegetal y el incremento de áreas urbanizadas podrían correlacionarse con el aumento de casos de dengue en los 9 municipios de la región, destacando la importancia de la cobertura vegetal como protector contra la propagación del virus. Es por ello que las dinámicas de cambio en el uso del suelo, vinculadas al desarrollo urbano, también tienen implicaciones directas en la salud pública, sugiriendo la necesidad de estrategias de planificación territorial que consideren la conservación del entorno natural como una medida preventiva para mitigar enfermedades como el dengue (López, 2021).

Investigaciones recientes han evidenciado que la expansión urbana descontrolada en el Valle de San Nicolás, Antioquia, ha provocado una fragmentación significativa de los ecosistemas locales, afectando la biodiversidad y aumentando la vulnerabilidad de los recursos naturales. Por ejemplo, un estudio realizado en 2020 analizó los cambios en el uso del suelo en el altiplano del Oriente antioqueño, incluyendo el Valle de San Nicolás, entre 1990 y 2015,

utilizando imágenes satelitales. Los resultados mostraron que la urbanización ha transformado áreas rurales en zonas urbanas, afectando zonas naturales y ocupando áreas de protección ambiental, lo que ha tenido un impacto negativo en la conservación de los recursos naturales y en la calidad de vida de las comunidades locales (Orozco, 2020). Este estudio es clave para comprender la relación entre el uso del suelo y los impactos ecológicos, una problemática que también se presenta en el Valle de San Nicolás.

Por otro lado, López (2018) investigó los efectos del crecimiento urbano en los cuerpos de agua del Valle de San Nicolás, revelando que las nuevas áreas urbanizadas habían incrementado la contaminación de las cuencas hidrográficas. La falta de infraestructuras adecuadas para el tratamiento de aguas residuales agravó este problema, afectando uno de los recursos naturales más importantes de la región. Este trabajo es fundamental para la investigación actual, ya que evidencia los impactos ambientales directos que la urbanización descontrolada tiene sobre el agua, un recurso vital en el Valle de San Nicolás.

Siguiendo una línea similar, Álvarez (2019) se centró en el municipio de El Carmen de Viboral, donde se ha observado una reducción significativa de las áreas agrícolas debido a la expansión urbana. Este estudio demuestra cómo la urbanización presiona tanto a los ecosistemas naturales como a las áreas rurales, afectando su sostenibilidad. La conexión con la presente investigación es clara, pues ambas analizan cómo el uso del suelo está siendo modificado en el Valle de San Nicolás por el desarrollo descontrolado de la infraestructura urbana.

Rodríguez (2020) utilizó herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para evaluar los efectos del crecimiento urbano en Rionegro, un municipio clave en la región. Este trabajo destacó la falta de planificación en el desarrollo de infraestructura vial, lo que ha

provocado un aumento de la congestión y problemas en la movilidad. Este análisis subraya la importancia de utilizar SIG para entender las dinámicas territoriales y está alineado con el enfoque de la investigación actual, donde los SIG serán fundamentales para monitorear los impactos de la expansión urbana.

En otro estudio, Martínez (2020) investigó los impactos ambientales y sociales del desarrollo industrial en Guarne, otro municipio del Valle de San Nicolás. Su investigación mostró cómo la expansión industrial ha traído consigo problemas de contaminación del aire y desplazamiento de comunidades rurales. Este trabajo resalta cómo la urbanización desorganizada afecta tanto al medio ambiente como a las dinámicas sociales, aspectos que también serán explorados en la presente investigación.

Gutiérrez (2021), también empleando SIG, identificó patrones de crecimiento urbano en La Ceja y la relación de estos con la pérdida de áreas de bosque nativo. Este estudio concluyó que el uso de SIG fue esencial para identificar las zonas más afectadas y recomendó la implementación de medidas de conservación. La relación de este estudio con la investigación actual es directa, ya que se busca emplear tecnologías SIG para evaluar la transformación del paisaje y los recursos naturales en el Valle de San Nicolás.

Gómez (2021), por su parte, estudió el impacto del aumento del valor del suelo en la segregación social en el Valle de San Nicolás. Su investigación mostró cómo el acceso desigual al suelo ha afectado especialmente a las comunidades rurales, que se han visto desplazadas hacia áreas marginales. Esta investigación es relevante para comprender los impactos sociales que tiene la expansión urbana sobre las poblaciones locales, un aspecto que será central en el análisis de la investigación actual.

De igual manera, Pérez (2022) investigó los efectos de la expansión de infraestructura vial en la conectividad ecológica del Valle de San Nicolás, concluyendo que las nuevas carreteras han fragmentado importantes corredores biológicos, afectando la biodiversidad. Este estudio es crucial para comprender cómo el desarrollo urbano y las nuevas infraestructuras afectan los ecosistemas, un tema que también se abordará en el presente trabajo al analizar los efectos de la expansión urbana en los recursos naturales de la región.

Para desarrollar la propuesta de trabajo, se debe considerar la investigación de Montoya, S. R., Vargas, J. A. (2018), donde se analizan la expansión urbana en el Valle de Aburrá, vecino del Valle de San Nicolás, y su impacto en la cobertura vegetal entre 1990 y 2015, utilizando imágenes satelitales. Este trabajo proporciona una base metodológica importante para entender cómo la expansión urbana puede afectar la vegetación, algo que también ocurre en el Valle de San Nicolás.

Estudios recientes sobre cambios en el uso del suelo y urbanización en áreas de crecimiento rápido, como el Valle de San Nicolás, destacan cómo estas transformaciones impactan significativamente los ecosistemas y las dinámicas ambientales locales. Un trabajo relevante es el análisis de dinámicas de uso y cobertura del suelo mediante imágenes satelitales y herramientas SIG, el cual señala que las áreas urbanas en expansión están reemplazando territorios naturales y productivos, aumentando la fragmentación del paisaje y afectando la biodiversidad y los servicios ecosistémicos en regiones de alta presión demográfica y económica. (Márquez, C., & Poblete, A, 2022).

García, M. I., & Hernández, P. L. (2020), desarrollan una metodología para monitorear cambios en la cobertura del suelo en áreas rurales de Antioquia a través de imágenes satelitales, Los autores crearon un sistema eficiente para detectar la transformación de áreas rurales, como la deforestación o la expansión de terrenos agrícolas, la metodología utilizada es aplicable al análisis del Valle de San Nicolás, donde las áreas rurales están siendo transformadas por la urbanización.

Una investigación reciente sobre el desarrollo urbano en el Valle de San Nicolás, particularmente en municipios como Rionegro, La Ceja y El Carmen de Viboral, muestra un crecimiento acelerado en términos de urbanización, ligado a la alta demanda de vivienda y la expansión de infraestructura. Este desarrollo ha transformado áreas rurales en zonas urbanas, comprometiendo recursos naturales clave como los bosques y cuerpos de agua. Además, el crecimiento poblacional y económico ha generado desafíos significativos relacionados con la sostenibilidad ambiental y la planificación territorial equilibrada.

Por ejemplo, entre 2010 y 2019, la región experimentó un aumento notable en la construcción de viviendas, alcanzando más de 10,000 unidades anuales en algunos períodos, concentrándose en su mayoría en Rionegro. Esto ha llevado a la ocupación de suelos agrícolas y la presión sobre los recursos hídricos locales, esenciales para la sostenibilidad de la región y la provisión de agua al Valle de Aburrá, se resalta de igual manera la necesidad de la delimitación clara de la frontera agrícola, la cual se ha visto estresada por la acelerada expansión urbana (GGGI, 2019).

Hay una investigación macro regional realizada por Quintero, A. M., & Gómez, J. H. (2016), en la cual se estudian los cambios en la cobertura del suelo en el altiplano de Oriente

antioqueño, que incluye al Valle de San Nicolás, entre 1990 y 2015, usando imágenes satelitales, en esta región de Antioquia la urbanización descontrolada plantea serios desafíos para la sostenibilidad ambiental de la región porque hay áreas de gran valor ecológico, y se analiza que puede llevar a un nivel más específico.

Con respecto a la referencia anterior y en contraste del análisis a nivel macro regional, es importante prestar atención a los estudios realizados por Mejía, C. A., & Uribe, M. S. (2019) en donde se examina la expansión urbana en el municipio de Guarne, en el Valle de San Nicolás, entre 1995 y 2018 utilizando imágenes Landsat, y Gutiérrez, J. F., & López, L. P. (2021), quienes logran determinar los cambios en el uso del suelo y su relación con la urbanización en el municipio de Rionegro, en el Valle de San Nicolás, entre 2000 y 2020, estos dos antecedentes pueden ofrecer una metodología útil para realizar un análisis temporal en otras áreas del Valle de San Nicolás y análisis detallado de una de las principales ciudades del Valle de San Nicolás, siendo relevante para comprender cómo las dinámicas de crecimiento pueden replicarse en otras partes de la región de estudio, de igual manera se pueden llegar a evaluar patrones en todo el valle de San Nicolás, similares a los relacionados por Herrera, L. F., & Álvarez, S. G. (2020), en su estudio sobre la correlación directa entre la pérdida de áreas verdes y el aumento de áreas construidas y expansión urbana significativa en los municipios de La Ceja y El Retiro, siendo estos dos municipios parte de la sub región del valle de san Nicolás.

La expansión en áreas del Valle de San Nicolás enfrenta desafíos similares a los analizados por Valencia, R. J., & Torres, F. M. (2019), quienes evalúan cómo la expansión urbana ha afectado la cobertura vegetal en zonas montañosas del Oriente antioqueño mediante un análisis multitemporal con imágenes satelitales, este trabajo demostró una relación clara entre el

crecimiento urbano y la pérdida de cobertura vegetal en áreas montañosas, afectando el equilibrio ecológico.

4. Referente normativo y legal

Tabla 1. Referente normativo y legal del presente trabajo

Normativa o Ley	Descripción
Constitución Política de Colombia de 1991: Artículo 79 y 80	Establecen el derecho de todas las personas a gozar de un ambiente sano y la obligación del Estado de planificar el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales para garantizar su desarrollo sostenible, conservación y restauración.
Ley 99 de 1993 - Ley General Ambiental	Crea el Sistema Nacional Ambiental (SINA) y establece principios para la gestión ambiental, incluyendo la regulación del uso del suelo y la protección de los ecosistemas.
Ley 388 de 1997 - Ley de Ordenamiento Territorial	Establece los mecanismos para planificar el uso del suelo en Colombia, promoviendo un desarrollo urbano sostenible y ordenado, abordando la relación entre urbanización y protección ambiental.
Ley 1454 de 2011 - Ley Orgánica de Ordenamiento Territorial (LOOT)	Fomenta la cooperación intermunicipal en la planificación territorial, permitiendo un desarrollo más equilibrado y la preservación del medio ambiente.
Ley 1753 de 2015 - Plan Nacional de Desarrollo	Contempla la importancia del desarrollo sostenible y establece medidas para controlar la expansión urbana y proteger el medio ambiente, promoviendo la planificación con SIG.
Decreto 3600 de 2007	Regula el uso del suelo y establece directrices para la urbanización en áreas rurales, enfatizando la preservación de recursos naturales y el control del crecimiento urbano.
Decreto 1077 de 2015	Compila la normativa relacionada con el desarrollo territorial, resaltando la importancia de la planificación urbana sostenible y la gestión ambiental.
Resolución 0755 de 2009	Define las directrices para la planificación y gestión sostenible del territorio, enfocándose en la mitigación de impactos ambientales derivados de la expansión urbana.
Resolución 0662 de 2016 - Ministerio de Vivienda	Establece los criterios de sostenibilidad para el desarrollo de proyectos urbanos, incluyendo la evaluación de impactos ambientales y el uso de herramientas como SIG.

5. Referente teórico

El fenómeno de expansión urbana corresponde al crecimiento físico y demográfico de las áreas urbanas, lo que implica la expansión de la superficie urbanizada, invadiendo incluso más allá de las zonas de transición entre sectores urbanos y rurales (zonas de expansión) y el aumento de la población dentro de las ciudades y sus áreas metropolitanas. (González Meneses, V. ,2019)

Este fenómeno viene acompañado por otro de la misma naturaleza como es la expansión urbana descontrolada, referente al crecimiento sin planificación o regulación adecuada de las áreas urbanas y resultando en una serie de impactos negativos en el medio ambiente, la sociedad y la economía. Estos fenómenos se caracterizan y se pueden entender de mejor manera mediante los siguientes conceptos y elementos:

Expansión Urbana

Es el fenómeno de crecimiento físico y demográfico de las áreas urbanas, caracterizado por la extensión del desarrollo urbano hacia áreas rurales o poco desarrolladas. Este proceso está influenciado por diversos factores, como el crecimiento poblacional, la demanda de vivienda, la migración rural-urbana, la expansión económica y las políticas de planificación urbana (UN-Habitat, 2020)

En los últimos años, estudios como el de López et al. (2021) han demostrado que la expansión urbana no solo implica el crecimiento físico de las ciudades, sino que, cuando no está debidamente planificada, puede conducir a un fenómeno de "urbanización insostenible". Este concepto se refiere a un desarrollo urbano que agota los recursos naturales y genera efectos irreversibles en los ecosistemas circundantes. Los autores sostienen que, en áreas como el Valle de San Nicolás, la falta de regulación en la expansión urbana ha exacerbado problemas como la

contaminación del aire y la pérdida de biodiversidad, lo que subraya la urgencia de implementar medidas de control y sostenibilidad en los procesos de urbanización.

Crecimiento Demográfico

Junto con la expansión física (materialización de unidades constructivas), la expansión urbana está directamente relacionada con el aumento en la población residente en las áreas urbanas y principalmente con la densificación de las grandes metrópolis gracias al desarrollo en altura. Esto puede ser el resultado de un crecimiento natural (nacimientos superiores a defunciones) y/o migraciones desde áreas rurales o de otras ciudades (Yang Ye, 2023).

De acuerdo con Muñoz & García (2022), el crecimiento demográfico acelerado en áreas metropolitanas como Medellín y su expansión hacia valles cercanos ha generado una distribución desigual de los servicios urbanos, lo que incrementa la segregación socioeconómica. Estos autores destacan que las zonas periurbanas, que históricamente han sido agrícolas, han recibido una gran cantidad de población desplazada, sin la infraestructura necesaria para su integración plena al tejido urbano. La falta de políticas claras para la gestión de este crecimiento ha ampliado las brechas entre las áreas urbanas consolidadas y las nuevas zonas de expansión.

Transformación del Paisaje

La transformación del paisaje debido a la expansión urbana es un proceso complejo de 'desarrollo', que implica cambios significativos en la estructura y composición del entorno natural. Este fenómeno se manifiesta de diversas formas y puede tener impactos en los ecosistemas, la biodiversidad y la calidad de vida. Algunos de los efectos clave de la transformación del paisaje por la expansión urbana incluyen la pérdida de hábitats naturales, la impermeabilización del suelo por la pavimentación, lo que altera el ciclo hidrológico natural, la contaminación del aire y del agua, y la fragmentación del paisaje (Seto et al., 2020).

Investigaciones como la de Sánchez et al. (2023), han profundizado en los efectos de la transformación del paisaje debido a la expansión urbana descontrolada. Sánchez y su equipo proponen el concepto de "resiliencia ecológica urbana", que enfatiza la capacidad de los ecosistemas naturales de adaptarse y recuperarse de los impactos antropogénicos, como la urbanización. El estudio demostró que la implementación de corredores verdes en las ciudades en expansión puede mitigar los efectos negativos de la impermeabilización del suelo y la pérdida de hábitats naturales, lo cual es un enfoque importante para incorporar en la planificación urbana del Valle de San Nicolás.

Infraestructura y Servicios

El crecimiento urbano requiere infraestructuras y servicios adecuados para satisfacer las necesidades de la población, incluyendo servicios básicos como vivienda, transporte, agua, energía, saneamiento, educación y salud. La expansión urbana, si no se gestiona adecuadamente, puede generar presión sobre estos sistemas, lo que subraya la importancia de una planificación integral y sostenible para garantizar su funcionamiento óptimo (Banco Mundial, 2021).

Impactos Socioeconómicos y Ambientales

La expansión urbana puede traer consigo una serie de impactos positivos y negativos. Por un lado, puede generar empleo, oportunidades económicas y mejoras en la calidad de vida de los residentes urbanos. Por otro lado, puede contribuir al nacimiento de problemas que enfrentan a diario las grandes urbes como la congestión del tráfico vehicular, la contaminación del aire y del agua, la pérdida de biodiversidad, la segregación socioeconómica y la degradación del entorno natural, destacando la importancia de la planificación urbana sostenible. (Urban Transitions, 2021).

Gestión y Planificación Urbana

Es necesario llevar a cabo una gestión y planificación urbana adecuada, que implique la creación de políticas y estrategias orientadas a un crecimiento urbano planificado, sostenible, equitativo y resiliente, considerando las necesidades actuales y futuras de la población, así como la conservación del medio ambiente (McGranahan et al., 2021)

Estudios recientes como los de Silva et al. (2021) han subrayado la importancia de implementar estrategias de crecimiento urbano basadas en los principios de sostenibilidad y equidad social. Estos investigadores destacan la necesidad de integrar herramientas tecnológicas como los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para monitorear en tiempo real el crecimiento urbano y su impacto en el entorno natural y social. En el contexto del Valle de San Nicolás, la implementación de SIG permitiría gestionar de manera más eficiente el uso del suelo y prevenir el deterioro de los ecosistemas locales, facilitando un crecimiento más equilibrado y sostenible.

Segregación socioeconómica

La expansión urbana descontrolada puede generar segregación socioeconómica, marginando a los grupos más vulnerables en áreas periféricas con acceso limitado a servicios básicos y oportunidades. Estas zonas suelen caracterizarse por procesos informales de ocupación de tierras, donde los costos de vivienda o adquisición de terrenos son significativamente más bajos en comparación con las áreas centrales bien equipadas, pero presentan condiciones de habitabilidad precarias (UN-Habitat, 2020).

Presión Sobre los Recursos Naturales

La expansión urbana descontrolada ejerce una presión significativa sobre los recursos naturales, como la tierra, el agua y el aire. Esto puede resultar en la deforestación, la pérdida o fragmentación de hábitats naturales, un fenómeno que se presenta repetidamente con la

construcción de nuevas vías de transporte terrestre, así como la contaminación del agua y del aire, entre otros impactos ambientales (Seto et al., 2020).

Imágenes satelitales y teledetección

El monitoreo de la expansión urbana y sus efectos en la cobertura del suelo se ha visto fortalecido por el uso de imágenes satelitales y la teledetección. Estas tecnologías permiten obtener información detallada sobre la superficie terrestre mediante sensores remotos, proporcionando datos fundamentales para el análisis espacial. En particular, imágenes satelitales de alta resolución, como las de los programas Landsat y Sentinel, han sido ampliamente utilizadas para detectar y evaluar cambios en el paisaje urbano, facilitando la toma de decisiones basada en evidencia (Pérez et al., 2021).

Índices espectrales

Los índices espectrales han demostrado ser herramientas esenciales en el análisis de la cobertura del suelo, ya que permiten resaltar características específicas de la vegetación, el suelo y las áreas urbanizadas. Entre los más utilizados se encuentran el NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) y el NDBI (Índice de Construcción Normalizada), los cuales facilitan la identificación de zonas con vegetación densa, suelos expuestos y áreas en proceso de urbanización. Su aplicación en el Valle de San Nicolás ha permitido detectar la expansión urbana y evaluar la pérdida de vegetación en la región (López & Ramírez, 2023).

Clasificación supervisada de la cobertura del suelo

Para comprender mejor los cambios en la cobertura del suelo, se han desarrollado métodos de análisis basados en teledetección, entre los que destaca la clasificación supervisada. Esta técnica permite categorizar diferentes tipos de cobertura terrestre en función de firmas espectrales previamente identificadas, ofreciendo una representación precisa de la distribución

del suelo. En estudios recientes sobre la expansión urbana en Antioquia, esta metodología ha sido fundamental para monitorear la evolución de los usos del suelo y prever tendencias de crecimiento (González et al., 2022).

Matriz de tabulación cruzada

Una herramienta clave para evaluar la magnitud y dirección de los cambios en la cobertura del suelo es la matriz de tabulación cruzada. Esta técnica permite cuantificar y comparar las transiciones entre distintas categorías de uso del suelo en diferentes periodos de tiempo, facilitando la detección de patrones de expansión urbana. La aplicación de esta metodología en estudios recientes ha permitido evaluar la conversión de áreas rurales en urbanizadas y el impacto de estos cambios en los ecosistemas locales (Rodríguez & Fernández, 2023).

Análisis multitemporal de la cobertura del suelo

El análisis multitemporal es una estrategia indispensable para evaluar la evolución de la expansión urbana y sus efectos a largo plazo. A través de la comparación de imágenes satelitales captadas en distintos años, es posible determinar tendencias y patrones de crecimiento urbano. Estudios como el de Muñoz & Vargas (2021) han aplicado esta metodología en el Valle de Aburrá, obteniendo resultados significativos sobre la transformación del paisaje y la pérdida de áreas naturales, información crucial para la planificación territorial sostenible.

Planificación territorial basada en SIG

La planificación territorial enfrenta el desafío de equilibrar el crecimiento urbano con la conservación ambiental, y en este contexto, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) han emergido como herramientas clave. La integración de datos espaciales a través de SIG permite optimizar la gestión del territorio y mejorar la toma de decisiones en términos de urbanización

sostenible. La combinación de SIG con teledetección ha resultado fundamental para diseñar estrategias de ordenamiento territorial que minimicen los impactos negativos del crecimiento urbano, asegurando una planificación eficiente y sostenible en regiones de expansión acelerada como el Valle de San Nicolás (Silva et al., 2022).

6. Metodología

6.1 Enfoque metodológico

La investigación se realizó mediante un enfoque cuantitativo centrado en el análisis espacial de datos satelitales, con el objetivo de evaluar la expansión urbana y los cambios en la cobertura del suelo. Este enfoque permitió comprender el fenómeno en cuestión a través de tecnologías avanzadas y métodos estadísticos.

Para la recolección de datos, se emplearon imágenes satelitales históricas que fueron procesadas con el fin de garantizar la precisión necesaria en el análisis. El proceso de procesamiento incluyó correcciones para optimizar los datos y prepararlos adecuadamente para su posterior análisis. El análisis se basó en técnicas de clasificación de imágenes y métodos estadísticos, los cuales facilitaron la interpretación de los cambios en la cobertura del suelo. Este proceso permitió identificar patrones y evaluar la evolución de las áreas urbanas, así como su impacto ambiental.

Los resultados obtenidos fueron presentados a través de mapas, lo que facilitó la interpretación y comprensión de los cambios detectados, contribuyendo así a la evaluación del impacto de la expansión urbana en el área de estudio.

6.2 Tipo de estudio

Este trabajo de investigación se enmarca en un estudio descriptivo, considerando que el objetivo principal es describir y analizar la relación entre la expansión urbana y su impacto ambiental en el Valle de San Nicolás, mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG) en el contexto de la planificación urbana sostenible. De esta manera, se centra en observar y documentar los cambios en la cobertura del suelo y la expansión urbana en el área de estudio, utilizando imágenes satelitales y técnicas de clasificación. El objetivo es proporcionar una descripción detallada y precisa de los fenómenos observados. Al emplear metodologías como el análisis de firmas espectrales y la clasificación supervisada, el estudio permite identificar patrones y tendencias en el uso del suelo a lo largo del tiempo, ofreciendo una visión clara y completa del estado actual de la zona.

6.3 Procedimiento

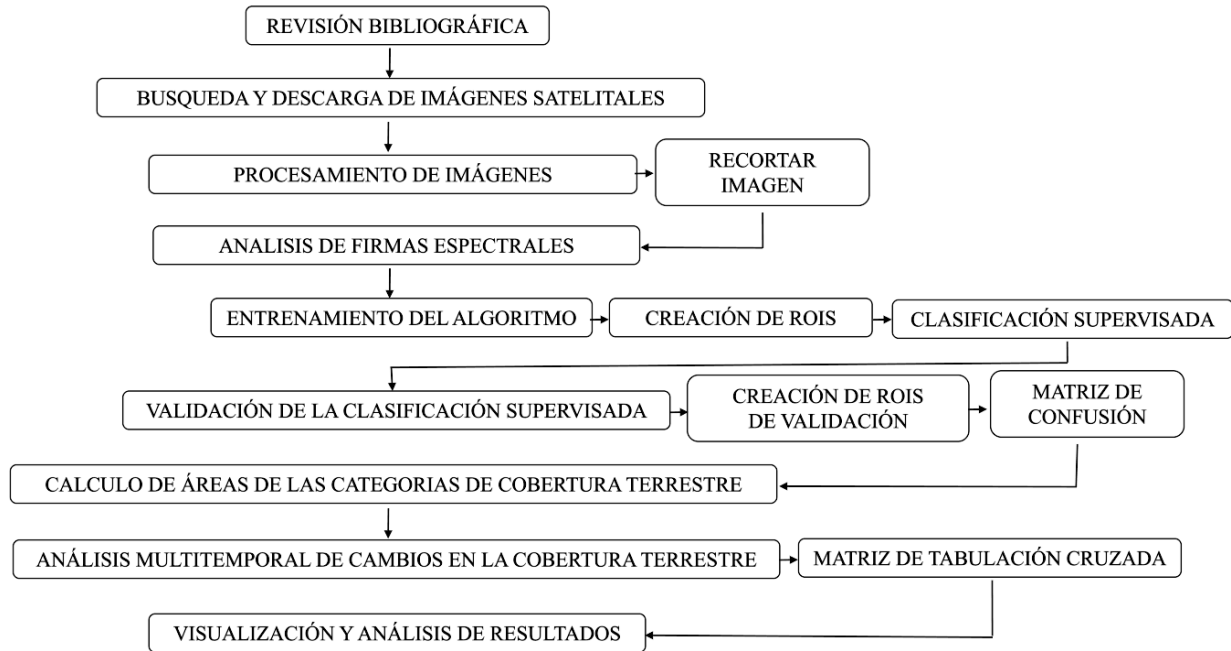


Figura 3. Flujograma metodológico

6.3.1. Diseño de metodología para el análisis multitemporal de cambios en la cobertura terrestre y expansión urbana

6.3.1.1. Búsqueda y descarga de imágenes satelitales

Se realizó la búsqueda y descarga de imágenes satelitales a través del sitio web <https://www.planet.com/>, mediante el servicio de Planet Scope, en donde se pueden descargar imágenes satelitales de alta resolución desde el año 2016 con cobertura mundial. Para la descarga de la información, se seleccionaron imágenes con un 100% de cobertura en la zona de estudio y con baja nubosidad.

Se seleccionó un intervalo de tiempo de 3 años para el análisis. De esta manera, se analizaron imágenes satelitales de los años 2018, 2021, 2024, esta decisión fue totalmente basada

en la disponibilidad de imágenes satelitales con la cobertura y condiciones óptimas para un análisis de cobertura terrestre. Las imágenes seleccionadas cumplen con una nubosidad menor de 20% y una cobertura del área de estudio de 100%. La configuración de la descarga de estas imágenes incluyó la realización de un composite que abarca toda la zona, y la armonización de los segmentos con el fin de asegurar la consistencia de las imágenes desde el punto de vista radiométrico y espectral. Las imágenes descargadas cuentan con una resolución espacial de 3 metros por píxel y su resolución espectral comprende 4 bandas espectrales: azul (entre 455 y 515 nm), verde (entre 500 y 590 nm), roja (entre 590 y 670 nm) e infrarrojo cercano (entre 780 y 860 nm).

6.3.1.2. Procesamiento de imágenes






Una vez descargadas las imágenes satelitales para los años 2018, 2021 y 2024, se procedió a realizar el recorte del mosaico a partir del shapefile que contiene el área de estudio recortada, excluyendo las zonas con densidad de nubes muy alta, mediante la herramienta “Cortar raster por extensión” de QGis. No fue necesaria la ejecución de un mosaico ya que se seleccionó la opción “composite” al momento de la descarga, lo que permite descargar una sola imagen del área completa.


Debido a que las imágenes de Planet Scope son previamente procesadas, no fue necesario realizar correcciones radiométricas, atmosféricas ni eliminación de los efectos de la topografía, además, durante la configuración de la descarga se activó la opción “Harmonized”, un proceso de calibración que ajusta los datos de las imágenes satelitales para mejorar su coherencia.

6.3.1.3. Análisis de firmas espectrales

Se realizó el análisis de firmas espectrales e interpretación de las imágenes satelitales mediante las diferentes combinaciones de bandas con el fin de establecer e identificar las categorías de usos y coberturas del suelo predominantes en la zona de estudio, con el fin de tener una base para la ejecución de la clasificación supervisada. Para realizar la categorización se utilizó la Leyenda Nacional de Coberturas de la tierra, metodología Corine Land Cover Adaptada para Colombia (Ideam, 2010). La clasificación realizada se presenta a continuación:

Tabla 2. Clasificación de coberturas

NOMBRE DE CATEGORÍA (Según Ideam, 2010)	VALOR DE PÍXEL	DESCRIPCIÓN (Según Ideam, 2010)	IMAGEN
3.1 Bosques	1	Áreas naturales o seminaturales dominadas por árboles nativos o exóticos, que son plantas perennes con tronco único y copa definida. Según la FAO (2001), abarca bosques naturales y plantaciones. En el caso de la clasificación de coberturas terrestres en Colombia, también integra otras formas biológicas naturales como la palma y la guadua.	
2. Territorios Agrícolas (2.1 Cultivos transitorios, 2.2 Cultivos permanentes, 2.3 Pastos, 2.4 Áreas agrícolas heterogéneas)	2	Comprende terrenos destinados principalmente a la producción agrícola, incluyendo alimentos, fibras y materias primas industriales. Abarca áreas con cultivos permanentes o transitorios, pastos, rotación, descanso o barbecho, y zonas agrícolas heterogéneas. Además, estas áreas pueden incluir actividades pecuarias junto a las agrícolas.	
3.3 Áreas abiertas, sin o con poca vegetación	3	Incluye áreas con vegetación mínima o inexistente, como suelos desnudos, quemados, arenosos y afloramientos rocosos.	
1. Territorios Artificializados (1.1 Zonas urbanizadas, 1.2 Zonas industriales o comerciales y redes de comunicación, 1.3 Zonas de extracción minera y escombreras, zonas verdes artificializadas, no agrícolas)	4	Incluye las áreas urbanas consolidadas, como ciudades y poblaciones, junto con sus zonas periféricas en proceso de urbanización. Estas áreas están experimentando un cambio gradual en el uso del suelo hacia actividades comerciales, industriales, recreativas y de servicios.	
Nubes	5	Se utiliza como una clase especial en los análisis de clasificación de cobertura terrestre, aunque no representa un tipo de cobertura del suelo. Su función principal es evitar que las áreas cubiertas por nubes interfieran con la interpretación y el análisis de otras clases de cobertura terrestre.	

NOMBRE DE CATEGORÍA (Según Ideam, 2010)	VALOR DE PÍXEL	DESCRIPCIÓN (Según Ideam, 2010)	IMAGEN
5.1 Aguas continentales	6	Incluyen cuerpos de agua que pueden ser permanentes, intermitentes o estacionales. Estos abarcan lagos, lagunas, ciénagas, estanques y depósitos naturales o artificiales de agua dulce, así como embalses y cursos de agua en movimiento como ríos y canales con un ancho mayor a 50 metros.	

6.3.1.4. Integración de índices espectrales al conjunto de bandas

6.3.1.4.1 Cálculo de índice NDVI

Se realizó el cálculo del índice NDVI mediante la herramienta “Indices” - “NDVI”, en la cinta “Imagery” de Arcgis Pro. El NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) fue introducido por Rouse et al. en 1974 como una herramienta para monitorear la vegetación utilizando datos satelitales. Este índice se calcula utilizando las bandas del infrarrojo cercano (NIR) y del rojo visible (RED) de las imágenes satelitales, mediante la ecuación (1):

$$NDVI = (NIR - RED)/(NIR + RED) \quad (1)$$

Donde:

NIR: Reflectancia en el infrarrojo cercano.

RED: Reflectancia en el espectro rojo visible.

El NDVI proporciona valores entre -1 y 1, donde valores cercanos a 1 indican una vegetación densa y saludable, valores cercanos a 0 indican suelos desnudos o vegetación escasa, y valores negativos indican características no vegetales como agua o nieve (Rouse et al, 1974).

6.3.1.4.2. Cálculo de índice BAEI

Se realizó el cálculo del índice BAEI mediante la calculadora raster de Arcgis Pro. El **BAEI** (Bare-Soil Adjusted Vegetation Index) fue introducido por **Serrano et al. (2000)** como una mejora al NDVI para mejorar la discriminación entre vegetación y suelo desnudo. El BAEI ajusta el NDVI incorporando un componente que compensa los efectos del suelo desnudo. Este índice se calculó mediante la ecuación (2).

$$BAEI = \frac{(RED - BLUE)}{(RED + BLUE)} \quad (2)$$

Donde:

BLUE: Reflectancia en el espectro azul.

RED: Reflectancia en el espectro rojo.

6.3.1.4.3. Integración de índices al conjunto de bandas

Una vez calculados los índices NDVI y BAEI en Arcgis Pro, estos rasters fueron importados al software ENVI, donde se añadieron a un layer stack junto con las bandas 1, 2, 3 y 4 de Planet Scope. Este paso mejora la separabilidad espectral de las clases y ayuda en la diferenciación de categorías con firmas similares, como vegetación y suelo.

6.3.1.5. Clasificación supervisada de las imágenes

A partir del análisis de firmas espectrales y la clasificación obtenida se realizó el proceso de clasificación supervisada para las categorías: Bosques, Territorios agrícolas, Áreas abiertas, sin o con poca vegetación y Territorios artificializados. La clasificación supervisada de la cobertura del suelo con sensores remotos comienza seleccionando áreas de entrenamiento en la imagen que representen distintas categorías de cobertura.

Con estas áreas, se entrena el algoritmo de la herramienta a utilizar para que aprenda a identificar las firmas espectrales características de cada categoría. Para este trabajo se realizó una clasificación supervisada usando el criterio de máxima probabilidad, con la ayuda de la herramienta “Maximum Likelihood” de ENVI, la cual permite realizar la clasificación de la cobertura terrestre a partir de grupos de ROIs previamente dibujados y clasificados en diferentes categorías de cobertura. Se admitió un mínimo de 30 ROIs por cada categoría para asegurar la fiabilidad de la clasificación.

El criterio de clasificación supervisada se mantiene como uno de los métodos más efectivos y ampliamente utilizados en la teledetección debido a su capacidad para modelar la variabilidad de los datos y gestionar la incertidumbre en diferentes aplicaciones. Para una perspectiva más actualizada sobre los avances en este campo, estudios recientes han explorado la integración de algoritmos avanzados y enfoques híbridos que combinan métodos clásicos con redes neuronales profundas y aprendizaje automático, mejorando significativamente los resultados en tareas de clasificación de imágenes de alta resolución (Toolify, 2023).

Para garantizar la fiabilidad de los ROIs generados, se realizó un análisis de separabilidad espectral en ENVI, en donde solo se admitieron valores mayores a 1,95. Una vez obtenidos dichos valores de separabilidad espectral mediante el ajuste de los ROIs (Figuras 4, 5 y 6), se procedió con la ejecución del algoritmo de clasificación.

```

Input File: LAYER_STAKC
ROI Name: (Jeffries-Matusita, Transformed Divergence)

BOSQUES_2:
  PASTOS_2: (1.99850289 1.99999997)
  SUELOS_2: (1.99999056 2.00000000)
  ZONAS_URBANAS_2: (1.99980728 2.00000000)

PASTOS_2:
  BOSQUES_2: (1.99850289 1.99999997)
  SUELOS_2: (1.99466592 2.00000000)
  ZONAS_URBANAS_2: (1.98386987 2.00000000)

SUELOS_2:
  BOSQUES_2: (1.99999056 2.00000000)
  PASTOS_2: (1.99466592 2.00000000)
  ZONAS_URBANAS_2: (1.95171885 2.00000000)

ZONAS_URBANAS_2:
  BOSQUES_2: (1.99980728 2.00000000)
  PASTOS_2: (1.98386987 2.00000000)
  SUELOS_2: (1.95171885 2.00000000)

Pair Separation (least to most):
SUELOS_2 and ZONAS_URBANAS_2 - 1.95171885
PASTOS_2 and ZONAS_URBANAS_2 - 1.98386987
PASTOS_2 and SUELOS_2 - 1.99466592
BOSQUES_2 and PASTOS_2 - 1.99850289
BOSQUES_2 and ZONAS_URBANAS_2 - 1.99980728
BOSQUES_2 and SUELOS_2 - 1.99999056
    
```

Figura 4. Separabilidad espectral, ROIs, año 2018

```

Input File: 2021_NDVI_BAEI
ROI Name: (Jeffries-Matusita, Transformed Divergence)

Bosque:
  Pasto: (1.99968657 2.00000000)
  Suelo: (1.99999965 2.00000000)
  ZU: (1.99997064 2.00000000)

Pasto:
  Bosque: (1.99968657 2.00000000)
  Suelo: (1.99957510 2.00000000)
  ZU: (1.99905193 2.00000000)

Suelo:
  Bosque: (1.99999965 2.00000000)
  Pasto: (1.99957510 2.00000000)
  ZU: (1.97888496 2.00000000)

ZU:
  Bosque: (1.99997064 2.00000000)
  Pasto: (1.99905193 2.00000000)
  Suelo: (1.97888496 2.00000000)

Pair Separation (least to most):
Suelo and ZU - 1.97888496
Pasto and ZU - 1.99905193
Pasto and Suelo - 1.99957510
Bosque and Pasto - 1.99968657
Bosque and ZU - 1.99997064
Bosque and Suelo - 1.99999965
    
```

Figura 5. Separabilidad espectral, ROIs, año 2021

```

Input File: LYS_B1-4+NDVI+B&EI
ROI Name: (Jeffries-Matusita, Transformed Divergence)

Bosques (ROIS_4_CLASSES):
Pastos (ROIS_4_CLASSES): (1.98816255 2.00000000)
Suelo (ROIS_4_CLASSES): (1.99994759 2.00000000)
Zona Urbana (ROIS_4_CLASSES): (1.99992971 2.00000000)

Pastos (ROIS_4_CLASSES):
Bosques (ROIS_4_CLASSES): (1.98816255 2.00000000)
Suelo (ROIS_4_CLASSES): (1.99085911 2.00000000)
Zona Urbana (ROIS_4_CLASSES): (1.99662658 2.00000000)

Suelo (ROIS_4_CLASSES):
Bosques (ROIS_4_CLASSES): (1.99994759 2.00000000)
Pastos (ROIS_4_CLASSES): (1.99085911 2.00000000)
Zona Urbana (ROIS_4_CLASSES): (1.99763506 2.00000000)

Zona Urbana (ROIS_4_CLASSES):
Bosques (ROIS_4_CLASSES): (1.99992971 2.00000000)
Pastos (ROIS_4_CLASSES): (1.99662658 2.00000000)
Suelo (ROIS_4_CLASSES): (1.99763506 2.00000000)

Pair Separation (least to most):
Bosques (ROIS_4_CLASSES) and Pastos (ROIS_4_CLASSES) - 1.98816255
Pastos (ROIS_4_CLASSES) and Suelo (ROIS_4_CLASSES) - 1.99085911
Pastos (ROIS_4_CLASSES) and Zona Urbana (ROIS_4_CLASSES) - 1.99662658
Suelo (ROIS_4_CLASSES) and Zona Urbana (ROIS_4_CLASSES) - 1.99763506
Bosques (ROIS_4_CLASSES) and Zona Urbana (ROIS_4_CLASSES) - 1.99992971
Bosques (ROIS_4_CLASSES) and Suelo (ROIS_4_CLASSES) - 1.99994759

```

Figura 6. Separabilidad espectral, ROIs, año 2024

6.3.1.6. Suavizado de clasificación mediante Majority/Minority

Luego de realizar la clasificación de la imagen, se ejecutó la función Majority/Minority del software ENVI. Esta función se emplea para mejorar la consistencia espacial en imágenes satelitales clasificadas. Su función principal es reducir los efectos de ruido o pequeños fragmentos erróneos en la clasificación, asignando la clase más frecuente a los píxeles según sus vecinos. Este proceso permite suavizar la imagen y corregir errores de clasificación causados por variaciones o irregularidades en la imagen, lo que resulta en mapas de mayor precisión y más fáciles de interpretar (Harris Geospatial Solutions, 2021).

6.3.1.7. Validación de la clasificación supervisada

6.3.1.7.1. Creación de ROIs de validación

Para la validación de la clasificación, se crearon nuevas Regiones de Interés (ROIs) aleatorias, distintos de los utilizados en el proceso de entrenamiento. Estos ROIs se seleccionaron aleatoriamente dentro de la imagen satelital sin procesar para asegurar que las áreas seleccionadas fueran diversas y sin sesgos.

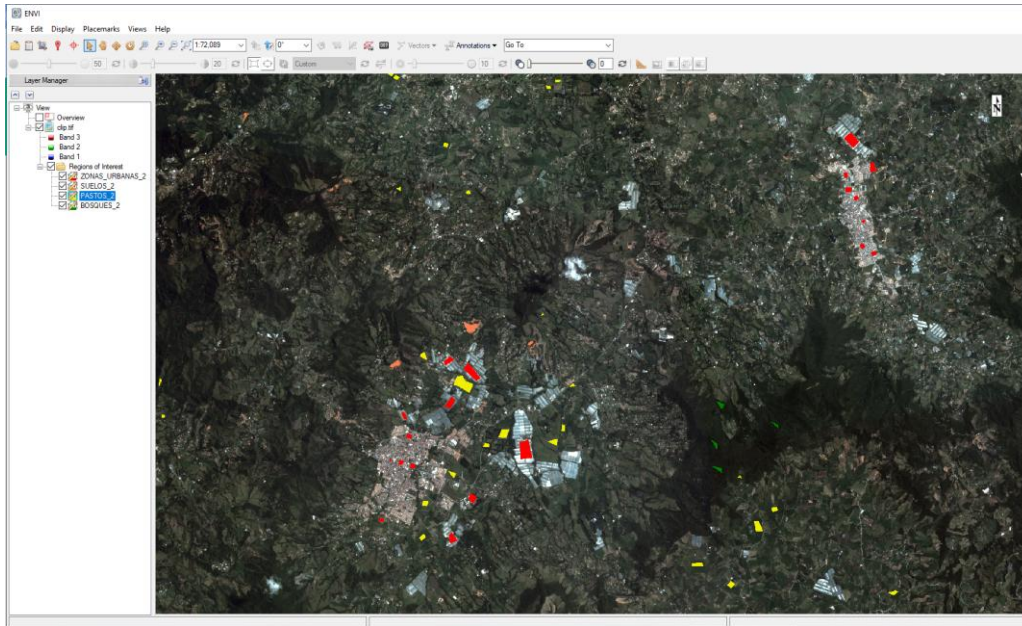


Figura 7. Creación de ROIs de Validación, año 2018.

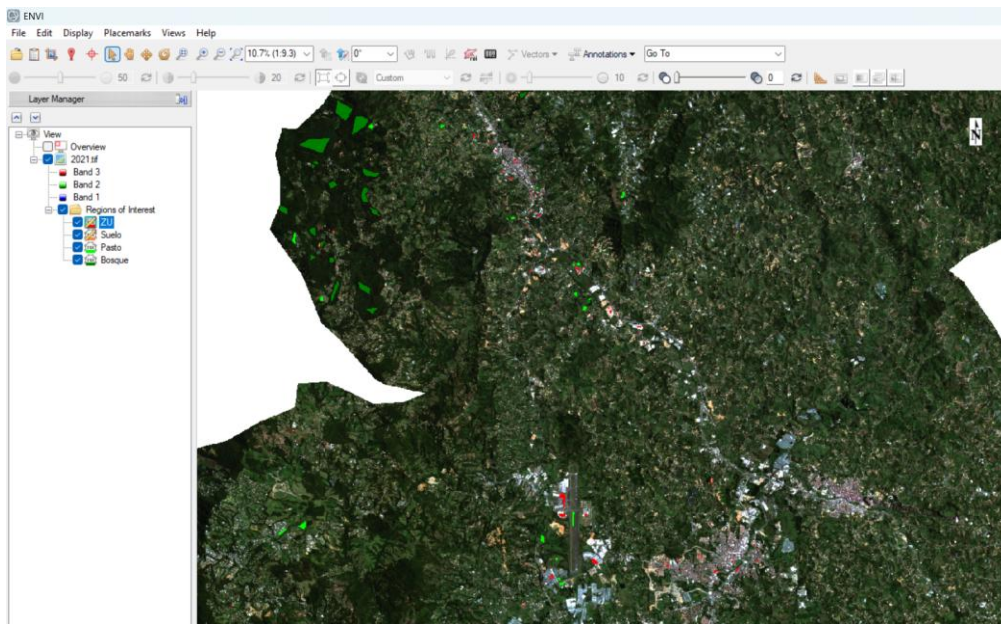


Figura 8. Creación de ROIs de Validación, año 2021.

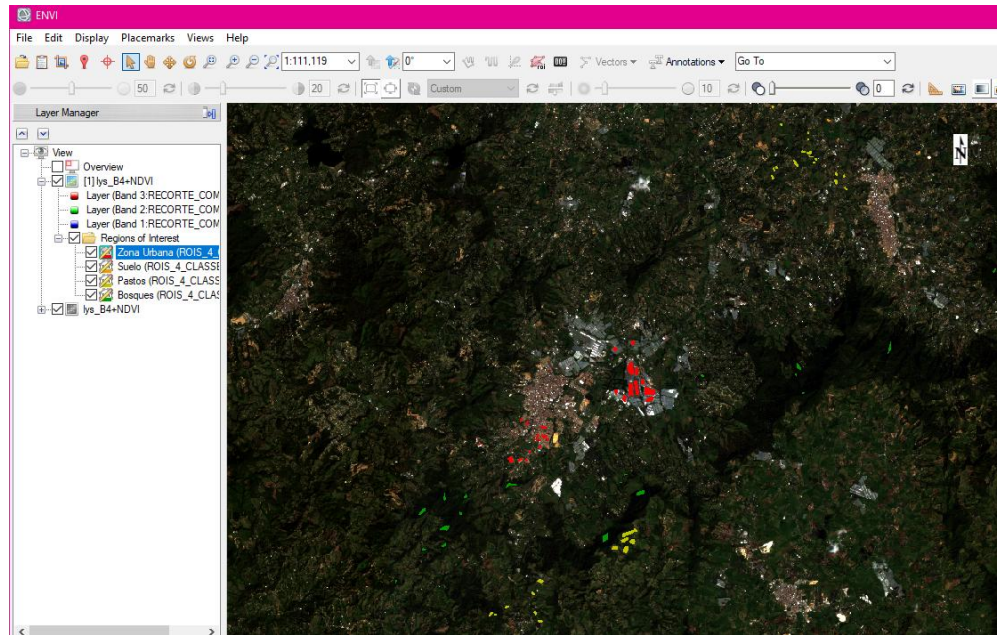


Figura 9. Creación de ROIs de Validación, año 2024.

6.3.1.7.2. Matriz de confusión

Posteriormente, se empleó la matriz de confusión de ENVI para evaluar la precisión de la clasificación. La matriz de confusión permitió comparar las clases asignadas en la imagen clasificada con las clases observadas en los nuevos ROIs, proporcionando una evaluación cuantitativa de la exactitud de la clasificación. A partir de este análisis, se calcularon métricas clave, como el índice Kappa, lo que facilitó la determinación de la efectividad de la clasificación en comparación con un modelo aleatorio (Figura 10, 11 y 12). El índice Kappa es una métrica estadística que se utiliza para medir el grado de acuerdo entre la clasificación realizada por un modelo y la clasificación real. El valor del índice Kappa oscila entre -1 y 1, donde:

- 1 indica un acuerdo perfecto entre el modelo de clasificación y los datos de referencia
- 0 indica que el acuerdo es el mismo que se esperaría por azar.
- Valores negativos indican que el acuerdo es peor que el que se esperaría por azar.

Como se puede observar en las imágenes (Figura 10, 11 y 12), el resultado del índice Kappa para las tres clasificaciones realizadas fue muy cercano a 1 (ver resultados completos en el paso a paso de la matriz de confusión), lo que indica que la clasificación realizada es altamente precisa y confiable.

Confusion Matrix: D:\UNIVERSIDAD DE MANIZALES\TESIS3.0\CLASIFICACION\MAJORITY					
Overall Accuracy = (575597/594016) 96.8992%					
Kappa Coefficient = 0.9555					
	Ground Truth (Pixels)				
Class	BOSQUES_2	PASTOS_2	SUELOS_2ZONAS_URBANAS	Total	
Unclassified	0	0	0	0	0
BOSQUES_2	210583	99	41	422	211145
PASTOS_2	1273	126744	594	5119	133730
SUELOS_2	0	371	37851	9441	47663
ZONAS_URBANAS	40	612	407	200419	201478
Total	211896	127826	38893	215401	594016
	Ground Truth (Percent)				
Class	BOSQUES_2	PASTOS_2	SUELOS_2ZONAS_URBANAS	Total	
Unclassified	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
BOSQUES_2	99.38	0.08	0.11	0.20	35.55
PASTOS_2	0.60	99.15	1.53	2.38	22.51
SUELOS_2	0.00	0.29	97.32	4.38	8.02
ZONAS_URBANAS	0.02	0.48	1.05	93.04	33.92
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
	Commission	Omission	Commission	Omission	
Class	(Percent)	(Percent)	(Pixels)	(Pixels)	
BOSQUES_2	0.27	0.62	562/211145	1313/211896	
PASTOS_2	5.22	0.85	6986/133730	1082/127826	
SUELOS_2	20.59	2.68	9812/47663	1042/38893	
ZONAS_URBANAS	0.53	6.96	1059/201478	14982/215401	
	Prod. Acc.	User Acc.	Prod. Acc.	User Acc.	
Class	(Percent)	(Percent)	(Pixels)	(Pixels)	
BOSQUES_2	99.38	99.73	210583/211896	210583/211145	
PASTOS_2	99.15	94.78	126744/127826	126744/133730	
SUELOS_2	97.32	79.41	37851/38893	37851/47663	
ZONAS_URBANAS	93.04	99.47	200419/215401	200419/201478	

Figura 10. Matriz de confusión, clasificación supervisada, año 2018.

Overall Accuracy = (402027/403296) 99.6853%
Kappa Coefficient = 0.9910

Class	Ground Truth (Pixels)		Suelo	ZU	Total
	Bosque	Pasto			
Unclassified	0	0	0	0	0
Bosque	319747	0	0	3	319750
Pasto	255	50016	0	14	50285
Suelo	10	73	6102	712	6897
ZU	122	26	54	26162	26364
Total	320134	50115	6156	26891	403296

Class	Ground Truth (Percent)		Suelo	ZU	Total
	Bosque	Pasto			
Unclassified	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Bosque	99.88	0.00	0.00	0.01	79.28
Pasto	0.08	99.80	0.00	0.05	12.47
Suelo	0.00	0.15	99.12	2.65	1.71
ZU	0.04	0.05	0.88	97.29	6.54
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Class	Commission (Percent)	Omission (Percent)	Commission (Pixels)	Omission (Pixels)
Pasto	0.53	0.20	269/50285	99/50115
Suelo	11.53	0.88	795/6897	54/6156
ZU	0.77	2.71	202/26364	729/26891

Class	Prod. Acc. (Percent)	User Acc. (Percent)	Prod. Acc. (Pixels)	User Acc. (Pixels)
Pasto	99.80	99.47	50016/50115	50016/50285
Suelo	99.12	88.47	6102/6156	6102/6897
ZU	97.29	99.23	26162/26891	26162/26364

Figura 11. Matriz de confusión, clasificación supervisada, año 2021.

Confusion Matrix: C:\Users\wendy\Desktop\Esp SIG\TDG SIG\INTENTO 2\Majority-Minori
Overall Accuracy = (14292/14345) 99.6305%
Kappa Coefficient = 0.9944

Class	Ground Truth (Pixels)		Suelo	Zona Urbana	Total
	Bosques	Pastos			
Unclassified	0	0	0	0	0
Bosques (ROIS)	5030	0	0	0	5030
Pastos (ROIS_4)	19	1738	0	0	1757
Suelo (ROIS_4)	0	0	1308	8	1316
Zona Urbana (	0	0	26	6216	6242
Total	5049	1738	1334	6224	14345

Class	Ground Truth (Percent)		Suelo	Zona Urbana	Total
	Bosques	Pastos			
Unclassified	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Bosques (ROIS)	99.62	0.00	0.00	0.00	35.06
Pastos (ROIS_4)	0.38	100.00	0.00	0.00	12.25
Suelo (ROIS_4)	0.00	0.00	98.05	0.13	9.17
Zona Urbana (	0.00	0.00	1.95	99.87	43.51
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Class	Commission (Percent)	Omission (Percent)	Commission (Pixels)	Omission (Pixels)
Pastos (ROIS_4)	1.08	0.00	19/1757	0/1738
Suelo (ROIS_4)	0.61	1.95	8/1316	26/1334
Zona Urbana (	0.42	0.13	26/6242	8/6224

Class	Prod. Acc. (Percent)	User Acc. (Percent)	Prod. Acc. (Pixels)	User Acc. (Pixels)
Pastos (ROIS_4)	100.00	98.92	1738/1738	1738/1757
Suelo (ROIS_4)	98.05	99.39	1308/1334	1308/1316
Zona Urbana (	99.87	99.58	6216/6242	6216/6242

Figura 12. Matriz de confusión, clasificación supervisada, año 2024.

6.3.1.8. Integración de capas adicionales

Después de realizar la clasificación supervisada, en la que se categorizaron áreas de pastos, bosques, suelo y zona urbana, se añadió información relevante de otras capas, como la capa de nubes y la capa de Hidrografía, donde se excluyeron los ríos ya que ninguno es cartografiable según la metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia (2010), donde los ríos deben tener un ancho mínimo de 50 m. Esto permitió incluir las categorías de "nubes" y "agua" en el ráster clasificado. Este proceso se llevó a cabo utilizando la herramienta "Condicional" que permitió asignar las clases correspondientes a los píxeles afectados por estas nuevas capas. Los resultados de la clasificación se presentan en las figuras 13, 14 y 15.

6.3.2. Cuantificación de la expansión urbana

6.3.2.1. Cálculo de áreas

Para proceder con el análisis de los datos se utilizó la tabla de atributos de la clasificación final (Figura 10, 11 y 12). A partir de la cual se realizaron los cálculos de áreas urbanas y el análisis multitemporal, con el fin de cuantificar la expansión urbana en el área y periodo de estudio. Asimismo, se calculó el área total de todas las coberturas clasificadas, mediante la ecuación (3).

$$\text{Área Total}(ha) = \left\{ \frac{\text{Conteo de píxeles} \times \text{Resolución}_x \times \text{Resolución}_y}{10,000} \right\} \quad (3)$$

Donde:

Resolución x: Resolución del píxel en X en metros

Resolución y: Resolución del píxel en Y en metros.

Nota: La ecuación se dividió entre 10.000 para obtener el resultado en Hectáreas

	OBJECTID *	Value	Count
1	1	1	69603807
2	2	2	87719186
3	3	3	5654175
4	4	4	7967268
5	5	5	819287
6	6	6	140394

Figura 13. Tabla de atributos de la clasificación, año 2018. Donde 1, corresponde a bosques; 2, corresponde a territorios agrícolas; 3, áreas abiertas, sin o con poca vegetación; 4, territorios artificializados; 5, nubes y 6, aguas continentales.

	OID	Value	Count
1	1	1	67244075
2	2	2	84568349
3	3	3	9956499
4	4	4	8987856
5	5	5	1007654
6	6	6	138587

Figura 14. Tabla de atributos de la clasificación, año 2021. Donde 1, corresponde a bosques; 2, corresponde a territorios agrícolas; 3, áreas abiertas, sin o con poca vegetación; 4, territorios artificializados; 5, nubes y 6, aguas continentales.

	OBJECTID *	Value	Count
1	2	1	57847997
2	3	2	86027974
3	4	3	7215587
4	5	4	17537468
5	6	5	1717751
6	7	6	136479

Figura 15. Tabla de atributos de la clasificación, año 2024. Donde 1, corresponde a bosques; 2, corresponde a territorios agrícolas; 3, áreas abiertas, sin o con poca vegetación; 4, territorios artificializados; 5, nubes y 6, aguas continentales.

6.3.3. Análisis de cambios en la cobertura del suelo

Para realizar el análisis multitemporal y cuantificación de los cambios en la cobertura y usos del suelo, se utilizó la metodología planteada por Pontius et al. (2004), quienes proponen dividir el análisis del cambio en dos componentes principales: cambio en la cantidad y cambio en la ubicación.

En el análisis multitemporal se busca identificar la evolución y las variaciones entre diferentes clases, para analizar el cambio en la cantidad es necesario cuantificar el área que cada categoría ocupa en momentos distintos y obtener los valores de cambio neto, ganancias, pérdidas y persistencia que manifiesta cada categoría y finalmente el cambio total. Asimismo, para analizar el cambio en la ubicación, se deben identificar los intercambios (áreas que se transfieren de una categoría a otra y viceversa), y las transiciones entre diferentes clases (Gómez, 2018).

Para completar el análisis se realizó la matriz de tabulación cruzada propuesta por Pontius et al (2004), utilizada para comparar dos mapas de cobertura del suelo, de dos momentos diferentes en el tiempo. Esta matriz compara la clasificación de cada celda en un mapa de tiempo 1 con la clasificación de la misma celda en un mapa de tiempo 2 (ver Tabla 3).

La diagonal principal de la matriz representa las áreas donde la cobertura del suelo se ha mantenido constante entre dos momentos en el tiempo (persistencia), mientras que las celdas fuera de la diagonal indican los cambios ocurridos, especificando cuántos píxeles han cambiado de una clase a otra. La suma de los valores en cada fila, excluyendo la diagonal, refleja las pérdidas de cada clase, mientras que la suma de los valores en cada columna, también excluyendo la diagonal, muestra las ganancias. El cambio total en la cobertura se determina sumando todos los valores fuera de la diagonal principal, lo que proporciona una medida del volumen total de cambio. Además, la matriz facilita la identificación de intercambios entre

clases, es decir, situaciones en las que un área cambia de una clase a otra y, simultáneamente, un área de tamaño similar cambia en la dirección opuesta (Pontius et al, 2004).

Tabla 3. Matriz general de tabulación cruzada. Tomada de Pontius et al (2004)

	Categoría 1	Categoría 2	Categoría 3	Categoría 4	Tiempo total 1	Perdida
Categoría 1	P ₁₁	P ₁₂	P ₁₃	P ₁₄	P ₁₊	P ₁₊ - P ₁₁
Categoría 2	P ₂₁	P ₂₂	P ₂₃	P ₂₄	P ₂₊	P ₂₊ - P ₂₂
Categoría 3	P ₃₁	P ₃₂	P ₃₃	P ₃₄	P ₃₊	P ₃₊ - P ₃₃
Categoría 4	P ₄₁	P ₄₂	P ₄₃	P ₄₄	P ₄₊	P ₄₊ - P ₄₄
Tiempo total 2	P ₊₁	P ₊₂	P ₊₃	P ₊₄	1	-
Ganancia	P ₊₁ - P ₁₁	P ₊₂ - P ₂₂	P ₊₃ - P ₃₃	P ₊₄ - P ₄₄	-	-

6.3.3.1. Visualización y análisis de los resultados

Con los resultados obtenidos al ejecutar la metodología mencionada, se realizaron mapas que permiten visualizar la información de mejor manera, de tal forma que se alineen con los objetivos específicos del trabajo. Se generó un mapa de expansión urbana, en el que se visualiza el aumento de la zona urbana en el área de estudio a lo largo del tiempo, así como un mosaico en donde se visualiza el cambio en la cobertura del suelo para cada año analizado.

7. Resultados

7.1 Análisis de cambio en la cobertura terrestre

7.1.1 Clasificación supervisada

Los resultados obtenidos a partir de la clasificación supervisada realizada para los años 2018, 2021 y 2024 en el Valle de San Nicolás han permitido analizar los cambios en el uso y cobertura del suelo a lo largo del tiempo. En este estudio, se identificaron seis (6) categorías principales de cobertura terrestre: Bosques, Territorios Agrícolas, Áreas Abiertas con poca o ninguna vegetación, Territorios Artificializados, Nubes y Aguas Continentales, de acuerdo con la clasificación establecida anteriormente en la Tabla 2.

Las Figuras 16, 17 y 18 presentan la distribución espacial de estas coberturas en los años evaluados, donde cada categoría se representa con un color específico: los bosques en verde oscuro, los territorios agrícolas en verde claro, las áreas abiertas en amarillo, los territorios artificializados en rojo, las nubes en blanco y las aguas continentales en azul. Este esquema de colores facilita la identificación visual de los cambios en la cobertura terrestre y permite apreciar con claridad las tendencias de transformación del paisaje.

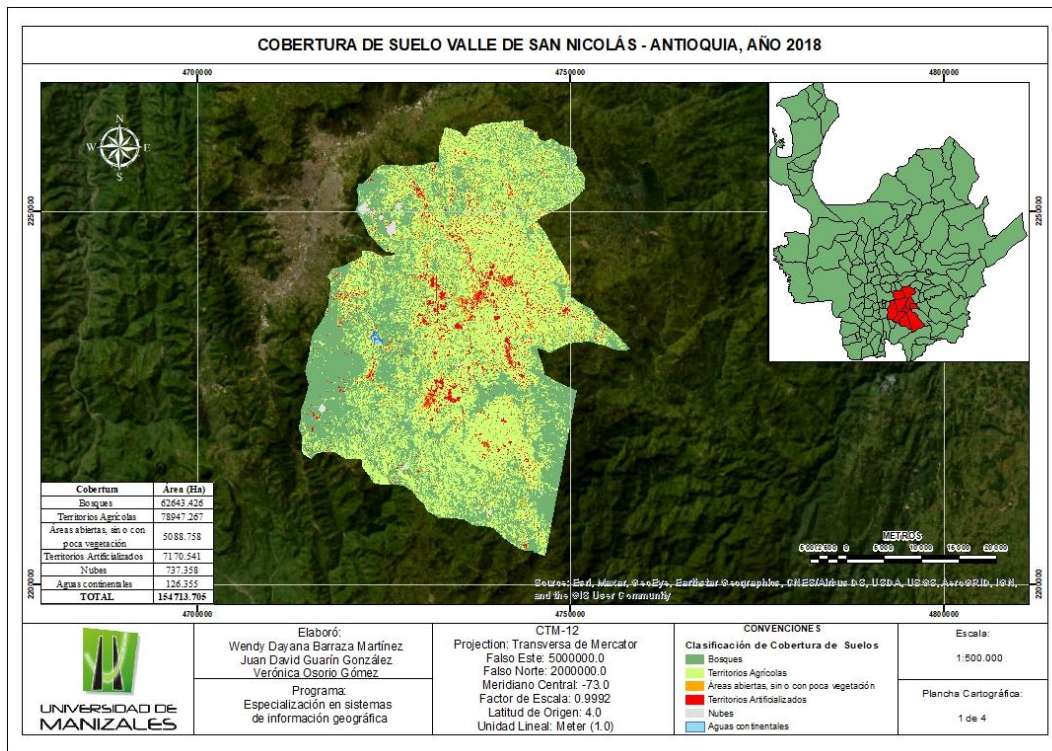


Figura 16. Clasificación realizada para el año 2018.

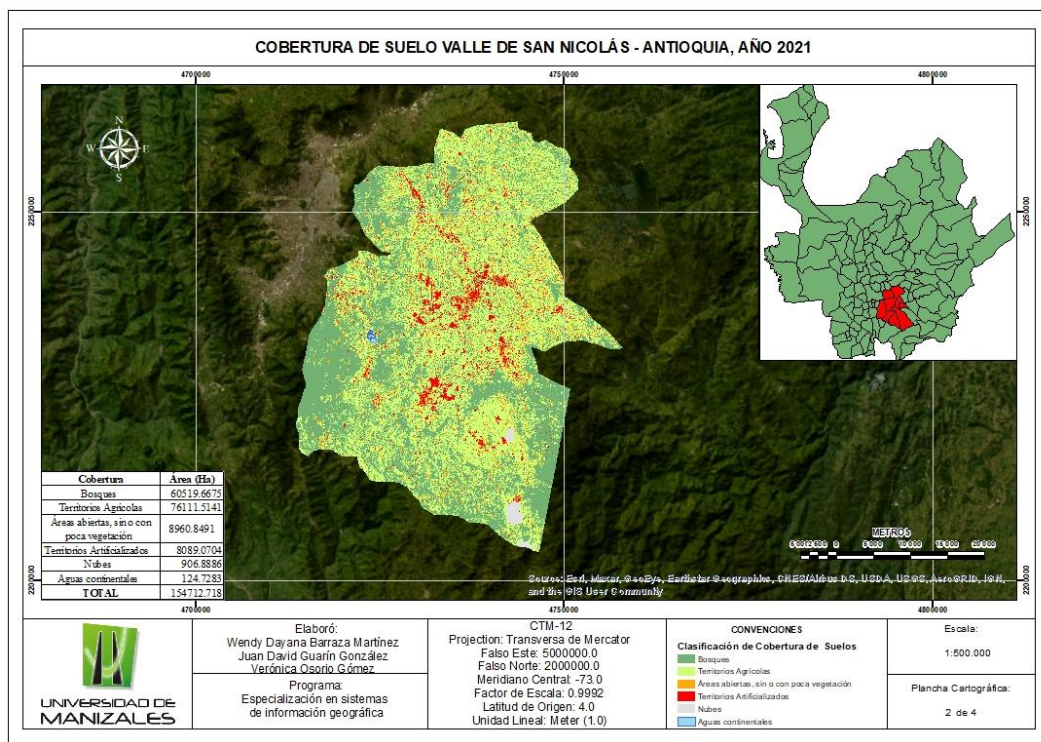


Figura 17. Clasificación realizada para el año 2021.

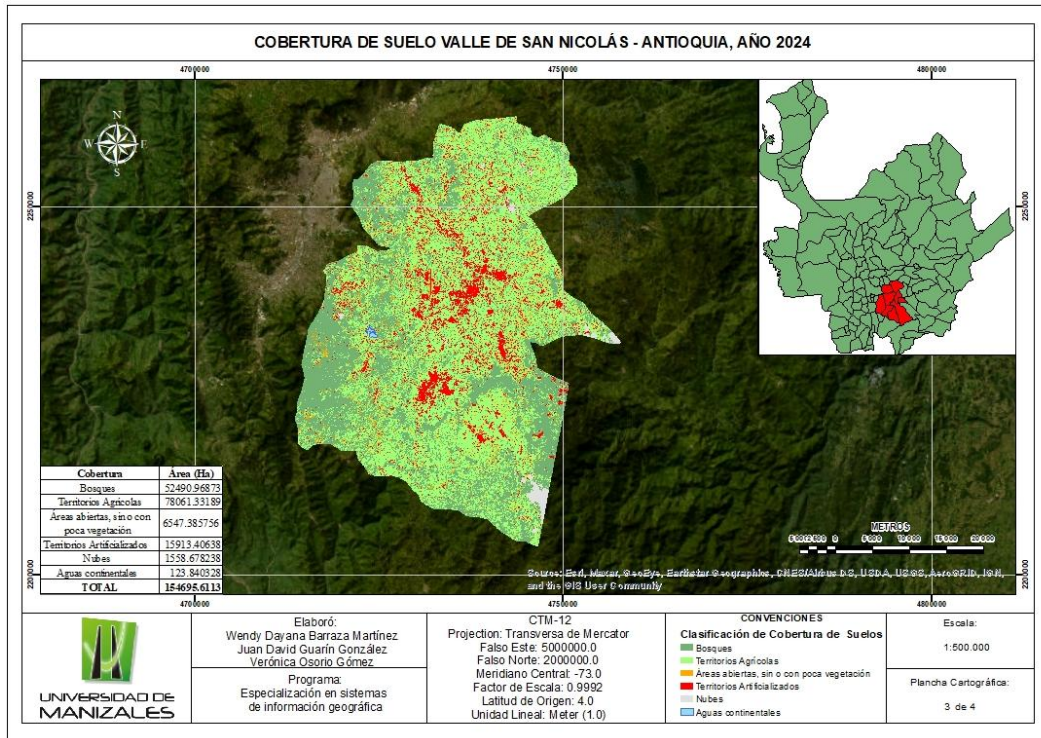


Figura 18. Clasificación realizada para el año 2024.

El análisis de los mapas evidencia que estos cambios han sido impulsados principalmente por la expansión urbana, dado que el crecimiento de los Territorios Artificializados es particularmente notable con el paso de los años. Este fenómeno sugiere una intensificación en el desarrollo de infraestructura y asentamientos humanos, lo que ha generado una redistribución de los ecosistemas naturales, afectando especialmente la cobertura boscosa y los territorios agrícolas.

Lo anterior se fundamenta en la evolución observada en los distintos años analizados. Para el 2018, la cobertura predominante estaba representada por áreas boscosas y territorios agrícolas, con un menor grado de urbanización concentrado en puntos específicos. Sin embargo, Para el año 2021, el avance de la urbanización es evidente, con una reducción progresiva de la cobertura boscosa y un incremento en los territorios artificializados. Finalmente, en 2024, esta

tendencia se acentúa aún más, consolidando un patrón de urbanización que ha modificado significativamente la distribución original de los ecosistemas en la región.

De acuerdo con el análisis cuantitativo evidenciado en la *Tabla 4. Áreas de cobertura terrestre años 2018, 2021 y 2024*, revela que los bosques han disminuido de 62,643.42 hectáreas en 2018 a 52,490.96 hectáreas en 2024, mientras que los Territorios Artificializados han aumentado de 7,170.54 hectáreas en 2018 a 15,913.41 hectáreas en 2024. Este proceso refleja la presión constante de la expansión urbana sobre los ecosistemas naturales, promoviendo la conversión de tierras boscosas y agrícolas en áreas urbanizadas.

Estos resultados enfatizan la necesidad de desarrollar estrategias de planificación y ordenamiento territorial que permitan un equilibrio entre el crecimiento urbano y la conservación de los ecosistemas. Comprender estas dinámicas a lo largo del tiempo es crucial para la toma de decisiones informadas que promuevan un desarrollo sostenible en la región.

Tabla 4. Áreas de cobertura terrestre años 2018, 2021 y 2024

Cobertura	Valor de píxel	Área (Ha) 2018	Área (Ha) 2021	Área (Ha) 2024
Bosques	1	62643,426	60519.6675	52490,9687
Territorios Agrícolas	2	78947,267	76111,514	78061,3318
Áreas abiertas, sin o con poca vegetación	3	5088,758	8960,849	6547,3857
Territorios Artificializados	4	7170,541	8089,070	15913,4063
Nubes	5	737,358	906,888	1558,678
Aguas continentales	6	126,355	124,728	124,728
Total		154713,70	154712,718	154695,611

Por su parte, los territorios agrícolas evidenciaron una leve disminución para el año 2021, seguido de un leve incremento para el año 2024, dando como resultado un área final menor pero

muy similar a la registrada en el año 2018. Aunque el cambio neto no fue significativo, esto no implica una estabilidad en el uso del suelo, sino que sugiere una reconfiguración espacial. La reducción inicial estuvo asociada a la conversión de tierras agrícolas en zonas urbanizadas; sin embargo, esta pérdida fue compensada mediante la incorporación de áreas previamente boscosas a la actividad agrícola, con el fin de satisfacer la demanda alimentaria de la población.

Este patrón de transformación indica que la expansión urbana no solo impacta directamente los territorios agrícolas, sino que también presiona sobre los bosques, que terminan siendo fragmentados y convertidos en suelos productivos para suplir la pérdida de áreas cultivables. En consecuencia, la urbanización se está llevando a cabo, en gran medida, a expensas de los ecosistemas forestales, lo que puede comprometer la estabilidad ecológica de la región. La conversión de bosques en suelos agrícolas y urbanos genera una degradación progresiva del paisaje y la pérdida de servicios ecosistémicos esenciales, como la regulación climática, la conservación de la biodiversidad y el mantenimiento de la calidad del agua (Kondratyeva et al., 2020).

En cuanto a las áreas abiertas sin o con poca vegetación su variabilidad a lo largo del tiempo sugiere una relación con las fluctuaciones en la actividad agrícola, especialmente debido a la naturaleza transitoria de ciertos cultivos. En contraste, la cobertura de aguas continentales se ha mantenido estable durante el periodo de análisis, lo que indica que, a pesar de la transformación del territorio, no se han registrado cambios significativos en los cuerpos de agua de la región.

7.1.2 Matriz de tabulación cruzada

La tabla 5 muestra los resultados de la implementación de la metodología para el análisis multitemporal de cambios en la cobertura del suelo planteada por Pontius et al. (2004), cuyo resultado corresponde a la matriz de tabulación cruzada que compara el cambio en la cobertura del suelo del Valle de San Nicolás desde el año 2018 hasta el 2024.

Esta metodología propuesta por Pontius (2004) permite cuantificar la magnitud y naturaleza de los cambios observados, ya que muestra las persistencias e intercambios entre las categorías, así como las ganancias y pérdidas totales.

Tabla 5. Matriz de tabulación cruzada, años 2018 – 2024

2018	2024					
	Bosques	Territorios Agrícolas	Áreas abiertas, sin o con poca vegetación	Territorios Artificializados	Territorios Artificializados	Perdida
Bosques	42870,99	15644,20	1408,51	1643,29	2,49	18698,49
Territorios Agrícolas	8771,24	58222,00	4136,71	7353,89	0,98	20262,82
Áreas abiertas, sin o con poca vegetación	98,28	2092,94	715,29	2159,22	0,01	4350,45
Territorios Artificializados	289,54	1888,31	251,42	4719,30	0,71	2429,98
Aguas continentales	3,60	2,39	0,31	0,40	119,66	6,70
Ganancia	9162,66	19627,84	5796,95	11156,80	4,18	-

La matriz se realizó para todas las categorías clasificadas, exceptuando la categoría de nubes, ya que cualquier cambio registrado en esta categoría no sería relevante para el análisis.

Sin embargo, esta matriz por si sola dificulta la diferenciación de los cambios reales en la

cobertura del suelo, ya que no distingue de forma inmediata entre pérdidas y ganancias netas. Por esta razón, la Tabla 6 presenta la matriz de cambio neto y cambio total de la cobertura del suelo en el Valle de San Nicolás entre 2018 - 2024. El cambio neto representa el balance final de una categoría, si el cambio neto es positivo, significa que el área de la categoría analizada ha aumentado (ganancia neta), mientras que, si es negativo, su extensión ha disminuido (pérdida neta). Por otro lado, el cambio total indica la cantidad total de transformación en una categoría, indicando que tan alta ha sido la movilidad de esta, hablando de la intensidad de la dinámica de cambio (Pontius, 2004).

De esta manera, se analizó un área total de 152.395,66 Ha, dentro de las cuales hubo un cambio total de 91.496,87 Ha entre los años 2018 y 2024 (Tabla 6).

Tabla 6. Cambio neto y cambio total de la cobertura del suelo entre 2018 - 2024

Categoría	Ganancia	Pérdida	Cambio Neto	Cambio Total
Bosques	9162,66	18698,49	-9535,83	27861,15
Territorios Agrícolas	19627,84	20262,82	-634,98	39890,66
Áreas abiertas, sin o con poca vegetación	5796,95	4350,45	1446,50	10147,40
Territorios Artificializados	11156,80	2429,98	8726,82	13586,78
Aguas continentales	4,18	6,70	-2,52	10,88
Total	-	-	0,00	91496,87

La categoría que presentó mayor ganancia corresponde a territorios agrícolas, sin embargo, se observa que el cambio neto para esta categoría fue negativo (pérdida neta); la mayor parte de su ganancia provino de las áreas boscosas, sin embargo, gran parte del área que ocupaba en 2018 fue transformada en territorios artificializados y áreas con poca vegetación, lo que conllevó a una pequeña disminución de la cobertura para el 2024.

En cuanto a ganancia, en segundo lugar, se encuentra la categoría correspondiente a territorios artificializados, en cuyo caso el cambio neto es positivo (ganancia neta), presentando un incremento de su área total de 8.726,82 Ha provenientes en su mayoría de territorios agrícolas y áreas abiertas sin o con poca vegetación. Cabe destacar que esta categoría presenta una pérdida de 2.429,98 Ha (valores señalados en color rojo, Tabla 5) repartidas entre las demás categorías, que se atribuyen a errores en la clasificación. Es importante tener en mente este tipo de errores, comunes en las estimaciones de cambios de cobertura terrestre, al momento de realizar los análisis e interpretaciones pertinentes.

Muñoz & Pineda (2023) mencionan que este incremento del territorio artificializado ha afectado las dinámicas socioeconómicas de la región, de tal forma que la población rural se ha sentido afectada, percibiendo como excluyente o desorganizada a la planificación territorial de la zona de estudio.

Por su parte, los bosques presentaron pérdidas significativas de 18.698.49 Ha, y una pérdida neta de 9.535,83 Ha, que se transformaron principalmente en territorios agrícolas. Con respecto a las áreas abiertas, sin o con poca vegetación, se observó una ganancia neta de 1.446,50 Ha, principalmente provenientes de territorios agrícolas, posiblemente debido a la transitoriedad de los cultivos o a la intervención de zonas agrícolas para la creación de futuras zonas artificializadas. De esta forma, la disminución de la cobertura forestal en el Valle de San Nicolás ejemplifica un fenómeno conocido, donde la urbanización y la expansión agrícola suelen desplazar los ecosistemas naturales, documentado en estudios de cambio de uso del suelo en América Latina (Mieles-Giler et al., 2024).

Finalmente, las aguas continentales no presentaron cambios significativos. Se observó que su área total se mantuvo muy similar entre el año 2018 y 2024.

En resumen, el análisis de cambio neto, permitió identificar los cambios reales en las coberturas analizadas, arrojando que los territorios artificializados aumentaron un 120% de su superficie con respecto a su extensión en 2018, es decir, ahora ocupan 2.2 veces más área; los bosques, sufrieron una disminución del 15% y las áreas abiertas sin o con poca vegetación mostraron un aumento del 20, mientras que los territorios agrícolas prácticamente se mantuvieron en su extensión con un 0.8% de pérdida, al igual que las aguas continentales, con un 2% de pérdida. De esta manera, se observa que el mayor cambio ocurrió en las zonas urbanas, quienes duplicaron su extensión en tan solo 6 años.

7.2 Cuantificación de la expansión urbana

Los resultados obtenidos evidencian una tendencia acelerada de crecimiento de las zonas urbanizadas en el Valle de San Nicolás entre los años 2018 y 2024. Esta transformación ha implicado la progresiva sustitución de coberturas naturales y agrícolas por áreas urbanizadas, lo que ha modificado significativamente la configuración territorial de la región.

Para comprender mejor el alcance y la magnitud de esta expansión, la Figura 19 ilustra la distribución espacial de la urbanización a lo largo de los años evaluados, mientras que la Tabla 7 presenta la cuantificación precisa de este fenómeno. En 2024, las áreas urbanizadas representaron el 10,29% del área total de estudio, lo que marca un incremento del 5,65% en tan solo seis años. Este crecimiento refleja la creciente demanda de suelo para infraestructura, viviendas y servicios, impulsada tanto por el aumento poblacional como por el desarrollo económico de la región.

El análisis espacial indica que la urbanización no ha ocurrido de manera homogénea, sino que ha seguido patrones específicos de crecimiento, concentrándose principalmente en sectores

estratégicos cercanos a las principales vías de comunicación y centros económicos. Esta expansión ha propiciado la transformación de suelos anteriormente ocupados por bosques y tierras agrícolas, generando impactos tanto ambientales como socioeconómicos.

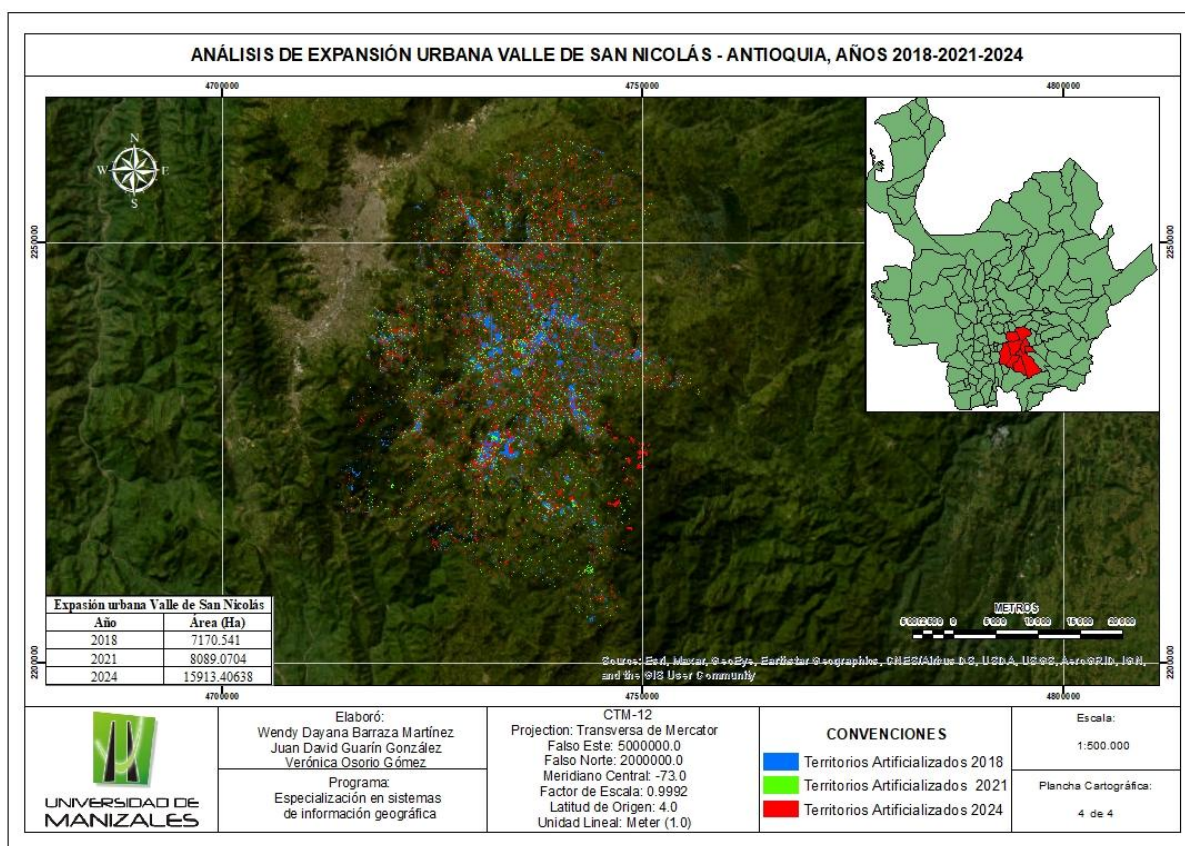


Figura 19. Expansión urbana en el Valle de San Nicolás, 2018 – 2021 – 2024

Un aspecto relevante por destacar es la variación en la velocidad de crecimiento urbano entre los periodos evaluados. Para el periodo 2018 – 2021, la expansión urbana fue relativamente baja, con una velocidad promedio de 306,18 hectáreas por año. Este ritmo más lento podría estar relacionado con el contexto global de la pandemia de COVID-19, que ralentizó el crecimiento económico del país y, posiblemente, impactó en el desarrollo urbano. En contraste, el periodo

2021 – 2024 evidenció un incremento notable en la velocidad de expansión, alcanzando una media de 2.608,11 hectáreas por año. Este cambio refleja una mayor demanda de infraestructura impulsada por el crecimiento poblacional, además de estar posiblemente vinculado al crecimiento económico de la región y la expansión de la ciudad de Medellín, que ha generado un efecto de urbanización hacia sus áreas periféricas. (Ver tabla 7).

Tabla 7. Área ocupada por las zonas urbanizadas en el Valle de San Nicolás

AÑO	AREA (Ha)	PORCENTAJE (%)
2018	7170,54	4,64
2021	8089,07	5,23
2024	15913,41	10,29

Estos resultados también se evidencian en el aumento del número de predios urbanos tomados de la base en datos de Catastro Antioquia (2019, 2021, 2024) para los municipios de Guarne, La Ceja y El Santuario (Ver Tabla 8). Si bien, aunque solo se pudieron recopilar datos para estos tres (3) municipios, estos datos muestran claramente el aumento significativo del número de predios, pasando de 37249 predios en 2019 a 48327 predios en 2024. Asimismo, se observa un aumento lento de este número entre los años 2019 y 2021, y un incremento acelerado para el periodo 2021 – 2024, que se evidencia especialmente en el municipio de La Ceja y al analizar los números totales.

Con base a lo expuesto, se observa que el proceso de urbanización en el Valle de San Nicolás, mencionado por Orozco (2020), Alvarez (2019) y Rodríguez (2020), continúa transformando áreas rurales en territorios artificializados, afectando los ecosistemas y zonas naturales de la región.

Tabla 8. Aumento de los predios urbanos. Fuente: Elaboración propia con base en datos de Catastro Antioquia (2019, 2021, 2024).

NÚMERO DE PREDIOS URBANOS			
	AÑO		
MUNICIPIO	2024	2021	2019
Guarne	8592	7491	6690
La Ceja	28050	23590	20978
El Santuario	11685	10029	9581
TOTAL	48327	41110	37249

8. Conclusiones

La metodología establecida para el análisis multitemporal de cambios en la cobertura terrestre y expansión urbana ha resultado efectiva en la identificación de patrones de crecimiento urbano en el Valle de San Nicolás. El uso de imágenes satelitales de alta resolución y técnicas de clasificación supervisada permitió un seguimiento detallado de las transformaciones del paisaje a lo largo del tiempo. Este enfoque ha proporcionado una visión clara de la dinámica de urbanización y sus efectos en las áreas naturales y agrícolas, lo que subraya la importancia de aplicar metodologías robustas y replicables para estudios de cambio de uso del suelo.

La resolución espectral y espacial de las imágenes satelitales es clave al momento de ejecutar metodologías de clasificación supervisada. Asimismo, se hace necesaria la incorporación de índices espectrales como el NDVI y el BAEI para mejorar la separabilidad espectral de las clases y asegurar una clasificación confiable.

El análisis multitemporal realizado en el Valle de San Nicolás reveló cambios significativos en la cobertura del suelo entre 2018 y 2024, destacando una considerable disminución de las áreas boscosas junto con un notable incremento en los territorios artificializados, incluyendo zonas urbanas. Utilizando técnicas de clasificación supervisada y análisis multitemporal, los resultados indican una tendencia hacia la urbanización, evidenciando una reducción progresiva de las áreas naturales y agrícolas en la región. Estas transformaciones suelen alterar el equilibrio ecológico, lo que podría tener efectos a largo plazo sobre la biodiversidad local y la capacidad de los ecosistemas para brindar servicios fundamentales.

Asimismo, a partir de la matriz de tabulación cruzada, se puede concluir que la reducción de la zona boscosa no ocurre directamente por la construcción de áreas urbanas. Son las zonas

agrícolas quienes se utilizan directamente para la urbanización. Esto genera una necesidad de suplir la demanda alimentaria debido a la disminución de tierras agrícolas, lo que a su vez impulsa la deforestación del bosque para convertir estas áreas en nuevas tierras de cultivo y ganadería.

Por otro lado, la cuantificación de la expansión urbana mostró un aumento significativo en las áreas urbanizadas del Valle de San Nicolás, pasando de 7,170.54 hectáreas en 2018 a 15,913.41 hectáreas en 2024. Estos datos reflejan un notable incremento en la urbanización durante el período analizado y la creciente presión sobre los recursos naturales, afectando principalmente a las zonas boscosas, cuya cobertura ha disminuido significativamente en los últimos años, pasando a ser áreas con intervención humana. Estos cambios en la cobertura del suelo proporcionan una base crucial para entender las dinámicas territoriales de la región y destacan la necesidad de decisiones de planificación territorial que prioricen la sostenibilidad y la conservación del entorno natural.

Además, se evidenció un cambio en el patrón de expansión urbana entre los periodos de tiempo analizados. Entre 2018 y 2021, la expansión urbana fue lenta, posiblemente debido a la pandemia, con un promedio de 306,18 hectáreas por año. Mientras que entre 2021 y 2024, la velocidad de expansión aumentó a 2608,11 hectáreas por año, impulsada por el crecimiento poblacional y económico, especialmente en Medellín. Estos cambios también se evidenciaron en los datos de números de predios urbanos por año, especialmente en el municipio de la Ceja.

9. Recomendaciones

Se recomienda aplicar esta metodología en estudios de planificación territorial, particularmente en regiones con alta presión de urbanización, para generar información más precisa y actualizada. Es esencial integrar estas herramientas en los procesos de toma de decisiones gubernamentales y municipales, promoviendo un enfoque de desarrollo urbano sostenible. Además, es crucial realizar actualizaciones periódicas de los datos y proporcionar capacitación continua en el uso de sistemas de información geográfica (SIG), lo cual facilitará una respuesta más efectiva a los cambios en el uso del suelo.

Asimismo, se propone la creación de políticas urbanas coordinadas que regulen la expansión en el Valle de San Nicolás, basadas en los datos obtenidos mediante análisis multitemporales y SIG. Esto garantizará un desarrollo más ordenado y sostenible, a la vez que se recomienda implementar programas de monitoreo continuo para seguir de cerca los cambios en la cobertura del suelo. Esta vigilancia constante permitirá una respuesta ágil ante las dinámicas urbanísticas y ayudará a conservar las áreas naturales.

Cabe resaltar la importancia de contar con datos actualizados de variables socioeconómicas, como crecimiento poblacional y proyecciones de demanda de infraestructura para realizar un correcto monitoreo y planificación urbana, teniendo en cuenta que el último censo publicado corresponde al año 2018.

Por otro lado, es fundamental involucrar a la comunidad en la planificación urbana sostenible, mediante campañas de educación y sensibilización sobre la importancia de preservar los espacios naturales y agrícolas. Se debe fomentar la participación de los ciudadanos en la toma de decisiones relacionadas con el uso del suelo, asegurando que sus opiniones sean consideradas en el diseño de políticas y proyectos que impacten el desarrollo urbano.

El análisis de la transformación del paisaje en el Valle de San Nicolás resalta la necesidad de implementar enfoques integrados que equilibren el crecimiento urbano con la conservación ambiental, tal como se ha sugerido en investigaciones previas. Este enfoque resulta fundamental para mitigar los impactos negativos asociados a la expansión urbana y promover un desarrollo territorial más sostenible.

Ante la reducción significativa de las áreas boscosas evidenciada en este estudio, se recomienda la ejecución de programas de reforestación y restauración ecológica en las zonas afectadas, con el fin de contrarrestar los efectos de la urbanización y contribuir a la preservación de la biodiversidad en la región. Además, es prioritario establecer medidas de protección legal que aseguren la conservación de los fragmentos de bosque remanentes. Para ello, es fundamental estimular la colaboración entre la academia, el sector privado y las autoridades locales.

10. Referencias

- Álvarez, S. (2019). Cambios en el uso del suelo debido a la expansión urbana en El Carmen de Viboral, Antioquia. *Revista de Estudios Rurales y Urbanos*, 16(1), 33-55.
- Banco Mundial. (2021). Informe sobre el desarrollo mundial 2021: Los datos al servicio de una vida mejor. Washington, DC: Banco Mundial. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1600-2>
- Catastro Antioquia. (2019). Estadísticas generales del departamento de Antioquia - enero 2019. Recuperado el 21 de enero de 2025, de <https://www.catastroantioquia.co/Catastro/home>
- Catastro Antioquia. (2021). Estadísticas generales del departamento de Antioquia - enero 2021. Recuperado el 21 de enero de 2025, de <https://www.catastroantioquia.co/Catastro/home>
- Catastro Antioquia. (2024). Estadísticas generales del departamento. Recuperado el 21 de enero de 2025, de <https://www.catastroantioquia.co/Catastro/home>
- Coello, P. (2019). Estudio de Ordenamiento Territorial para una adecuada expansion urbana, ciudad Riobamba, Ecuador [UNIGIS]. <http://docplayer.es/193350309-Master-thesis-%7C-tesis-de-maestria.html>
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (2020, February 18). Monitoreo de la cobertura de suelo. Biodiversidad Mexicana. <https://www.biodiversidad.gob.mx/monitoreo/cobertura-suelo>
- Bernal, y. O. (Julio de 2022). SCIELO. Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía. Obtenido de Reflexiones en torno a los factores que influyen en la expansión urbana: revisión de metodologías e instrumentos de investigación: <https://doi.org/10.15446/rcdg.v31n2.89742>
- Cáceres Herrera, J. D. M. (2020). Evaluación de la Calidad en Movilidad Urbana. Metodología Experimental para la Triple Frontera (Bachelor's thesis).

Campo, C. C., & Alfonso, W. H. (2018). Relación entre los procesos de urbanización, el comercio internacional y su incidencia en la sostenibilidad urbana. Cuadernos de vivienda y urbanismo, 11(22).

Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2020). La urbanización presenta oportunidades y desafíos para América Latina y el Caribe. Recuperado de <https://www.cepal.org/notas/73/Titulares2>

CORNARE. (2015). Análisis socioeconómico del Oriente Antioqueño. Anexo 1. Plan de Crecimiento Verde y Desarrollo Compatible con el Clima para el Oriente Antioqueño. <https://www.cornare.gov.co/Plan-crecimiento-verde/Anexo1.Analisis-Socioeconomico-Oriente-Antioqueno.pdf>

Cuevas, E. D. C. (2022). Expansión urbana o cómo el suelo urbanizado se dispersa por el paisaje: Implicaciones para la conservación de la biodiversidad. Ecosistemas, 31(1), 2165-2165.

Degele, P. E. (2023). La conservación de la naturaleza en las políticas de ordenamiento territorial: Estado del arte internacional y situación latinoamericana. *Collectivus, Revista de Ciencias Sociales*, 10(1), 253-288.

Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2018). Censo Nacional de Población y Vivienda 2018. Recuperado de <https://www.datos.gov.co/Estad-sticas-Nacionales/Censo-Nacional-de-Poblaci-n-y-Vivienda-CNPV-2018/qzc6-q9qw>

Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de las Naciones Unidas. (2018). Perspectivas de la urbanización mundial: la revisión de 2018. Naciones Unidas. Recuperado de <https://www.un.org/es/desa/2018-world-urbanization-prospects>

Fernández, P., Pérez, J., & Rodríguez, M. (2021). Urbanización acelerada y sus impactos en regiones periurbanas: El caso del Oriente antioqueño. *Revista de Geografía y Desarrollo Urbano*, 38(2), 43-58. <https://doi.org/10.1016/j.rgdu.2021.05.005>

García, M. I., & Hernández, P. L. (2020). Uso de imágenes satelitales para la detección de cambios en la cobertura del suelo en áreas rurales de Antioquia. *Geoespacios*, 15(2), 89-102.

García, R. G., & Marín, R. G. (2024). Expansión urbana de Murcia (España) entre los años 1990 y 2018. *Revista de Geografía Norte Grande*, (87).

Global Green Growth Institute (GGGI). (2019). Estrategia de Crecimiento Verde para Antioquia. <https://gggi.org/wp-content/uploads/2019/12/EPCVAntioquia.pdf>

Gómez, A. (2021). El impacto del aumento del valor del suelo en la segregación social en el Valle de San Nicolás. *Ciencia y Sociedad*, 29(4), 201-222.

Gómez, H. P., & Arboleda, M. V. (2024). 2. Pacificación, control territorial y desarrollo geográfico desigual en el Oriente antioqueño. *Ruralidad, conflictos socioambientales y construcción de paz en Colombia*, 5.

Gómez, L. F. (2018). Cambios de usos de suelo en Paso de los Libres, Corrientes, Argentina entre 1990 y 2016. Impacto del proceso de expansión urbana.

Gómez, L., & Jaramillo, P. (2019). "Crecimiento urbano y dinámicas poblacionales en el oriente antioqueño". *Revista de Estudios Regionales*, 35(2), 45-62.

González, J. A., & Martínez, A. (2022). Los impactos de la expansión urbana en la vulnerabilidad de los ecosistemas locales. *Revista de Ecología y Medio Ambiente*, 48(3), 45-63. <https://doi.org/10.1016/j.remea.2022.01.007>

González Meneses, V. (2019). Expansión urbana y cambio climático. Instituto de Investigaciones Jurídicas, Universidad Nacional Autónoma de México.

<https://archivos.juridicas.unam.mx/www/bjv/libros/12/5640/20.pdf>

González, J., Pérez, L., & Ramírez, C. (2022). Impacto de la expansión urbana en la cobertura del suelo en Antioquia. *Revista de Estudios Ambientales*, 18(2), 45-63.

Gutiérrez, J. F., & López, L. P. (2021). Cambios en el uso del suelo en Rionegro, Antioquia, y su relación con la urbanización. *Boletín de Investigación Geográfica*, 9(2), 75-90.

Gutiérrez Ossa, J. M., & Rodríguez, A. L. (2022). Retos y oportunidades en la implementación de SIG en los Planes de Ordenamiento Territorial de Colombia. *Revista de Geomática y Planificación Territorial*, 41(1), 72-89. <https://doi.org/10.1016/j.gtp.2022.03.007>

Gutiérrez, V. (2021). Uso de SIG para el análisis del crecimiento urbano y la pérdida de bosque nativo en La Ceja. *Geografía Aplicada y Medio Ambiente*, 19(2), 44-69.

Harris Geospatial Solutions. (2021). ENVI® 5 Hyperspectral Imaging Functional Summary. L3 Harris Technologies, Inc.

Herrera, L. F., & Álvarez, S. G. (2020). Análisis de la expansión urbana en La Ceja y El Retiro, Antioquia. *Revista de Estudios Urbanos y Regionales*, 14(1), 103-118.

IDEAM, 2010. Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia Escala 1:100.000. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Bogotá, D. C., 72p

Jebur, A. K. (2021). Uses and applications of geographic information systems. *Saudi J. Civ. Eng*, 5(2), 18-25.

Kondratyeva, A., Knapp, S., Durka, W., Kühn, I., Vallet, J., Machon, N., ... & Pavoine, S. (2020). Urbanization effects on biodiversity revealed by a two-scale analysis of species functional uniqueness vs. redundancy. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 8, 73.

Lewis, L. (2022). *The Industrial Revolution and Urbanization: Causes and Effects*. Cities and Globalization. Recuperado de citiesandglobalization.org

López Álvarez, D. V. (2021). Relación entre los cambios de la cobertura vegetal ocurridos en la región del Valle de San Nicolás y los casos de dengue en sus 9 municipios durante el periodo 2007-2019.

López, A., García, F. & Pérez, M. (2021). Urbanización insostenible y agotamiento de recursos en el Valle de San Nicolás. *Ecología y Desarrollo Urbano*, 18(2), 44-67.

López, A., Rodríguez, D., & Martínez, P. (2023). Impacto de la expansión urbana en la biodiversidad del Valle de San Nicolás. *Revista de Ecología Aplicada*, 35(2), 78-92.

López, M. (2018). Impacto del crecimiento urbano en el recurso hídrico de los municipios del Valle de San Nicolás. *Estudios Ambientales y Desarrollo Sostenible*, 22(5), 89-110.

López, M., & Ramírez, J. (2023). Índices espectrales aplicados al análisis de expansión urbana en el Valle de San Nicolás. *Revista de Geoinformación y Desarrollo*, 25(1), 78-92.

Márquez, C., & Poblete, A. (2022). Análisis de los cambios de uso del suelo en áreas de urbanización acelerada utilizando imágenes satelitales. *Journal of Land Use Studies*, 15(3), 45-60. Disponible en: RI CONICET

Martínez, F., & Gómez, P. (2022). *Expansión urbana y transformación del territorio: un enfoque multidisciplinario*. Editorial Universitaria.

Martínez, S., Pérez, R., & Vélez, J. (2021). "Políticas públicas para la sostenibilidad en regiones de rápido crecimiento". *Planeación Territorial y Ambiente*, 12(1), 10-27.

Martínez, R. (2020). Impactos ambientales y sociales del desarrollo industrial en Guarne, Antioquia. *Ambiente y Sociedad*, 27(3), 98-117.

Maza, J. E. M., Seminario, L. A. D., Fuentes, M. S. E., Cacao, R. F. R., & Cabrera, G. A. Z. (2024). Predicción de los Cambios en Coberturas y Uso del Suelo en la Subcuenca del Casacay. *Estudios y Perspectivas Revista Científica y Académica*, 4(3), 2568-2584.

McGranahan, G., Satterthwaite, D., & Tacoli, C. (2021). Urbanization and climate change: A critical review of the connections and implications. *Annual Review of Environment and Resources*, 46, 151-178. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102018-025227>.

Mejía, C. A., & Uribe, M. S. (2019). Impacto de la expansión urbana en la cobertura forestal en Guarne, Antioquia. *Revista de Geografía y Medio Ambiente*, 15(3), 87-105.

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), 65-88.

Ministerio de Transporte de Colombia. (2019). Informe de impacto del Túnel de Oriente en la movilidad regional. Bogotá: Ministerio de Transporte.

Montoya, S. R., & Vargas, J. A. (2018). Dinámicas de expansión urbana en el Valle de Aburrá y su impacto en la cobertura vegetal. *Revista de Geografía y Medio Ambiente*, 10(2), 45-67.

Munévar, C., González, L., y Henao, A. (2017). Conflictos socioambientales: entre la legitimidad normativa y las legitimidades sociales. caso mina La Colosa, Cajamarca (Tolima, Colombia). *Revista Luna Azul*, (44), 165-176. <http://doi.org/10.17151/luaz.2017.44.10>

Muñoz Arroyave, E., & Pineda Gómez, H. D. (2023). La expansión del proyecto Medellín: implicaciones territoriales para el Valle de San Nicolás y el Cauca Medio (Colombia).

Muñoz, A., & Vargas, R. (2021). Análisis multitemporal de cambios en el paisaje urbano del Valle de Aburrá. *Estudios de Geografía Aplicada*, 29(3), 112-128.

Muñoz, C. & García, J. (2022). Crecimiento demográfico y desigualdad en áreas periurbanas: El caso de Medellín y sus valles. *Estudios Urbanos y Regionales*, 27(3), 123-145.

National Ocean Service. (2021, February 26). What is the difference between land cover and land use? National Oceanic and Atmospheric Administration.

<https://oceanservice.noaa.gov/facts/lclu.html>

Orozco Bedoya, J. F. (2020). Transformación territorial en el Valle de San Nicolás— Oriente antioqueño: autonomía, estado y ruralidad sin campesinos. (Universidad de Antioquia UdeA)

Pérez, D. (2022). Efectos de la infraestructura vial en la conectividad ecológica del Valle de San Nicolás. *Biodiversidad y Desarrollo Urbano*, 30(1), 112-134.

Pérez, D., Torres, H., & Rodríguez, S. (2021). Teledetección y monitoreo urbano: aplicaciones en la planificación territorial. *Journal of Urban Planning*, 15(4), 34-49.

Pineda Gómez, H. D. (2021). Recortes espaciales que configuran el Oriente antioqueño: de la región a la superposición de territorialidades. *Territorios*, 45.

<https://doi.org/10.12804/revistas.urosario.edu.co/territorios/a.9946>

Pontius Jr, R. G., Shusas, E., & McEachern, M. (2004). Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. *Agriculture, ecosystems & environment*, 101(2-3), 251-268.

Quintero, A. M., & Gómez, J. H. (2016). Cambios en el paisaje y la cobertura del suelo en el altiplano de Oriente antioqueño (1990-2015). *Revista Antioqueña de Ciencias Ambientales*, 9(1), 34-50.

Restrepo, J., Cárdenas, F., & López, M. (2020). Transformación del paisaje urbano-rural en Antioquia: Análisis multitemporal del Valle de San Nicolás. Editorial Universidad de Antioquia.

Rodríguez, P. (2020). Evaluación de la expansión urbana y su impacto en la movilidad y los usos del suelo utilizando Sistemas de Información Geográfica en Rionegro, Antioquia. *Revista Colombiana de Geografía*, 32(2), 123-142.

Rodríguez, L., & Fernández, K. (2023). Evaluación del crecimiento urbano mediante matriz de tabulación cruzada. *Geospatial Analysis Journal*, 12(2), 58-75.

Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium*, 1, 309-317.

Salazar-Suaza, D., & Quijano-Abril, M. A. (2020). Análisis multitemporal y caracterización de la vegetación hidrófita y helófita de un cinturón de humedales urbanos en el altiplano del Oriente antioqueño. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 44(171), 639-651.

Sánchez, P., Gómez, R. & Ruiz, A. (2023). Resiliencia ecológica urbana: Propuestas para mitigar la transformación del paisaje. *Revista Internacional de Urbanismo Sostenible*, 34(1), 56-78.

Serrano, L., González-Hidalgo, J. C., & Martín, M. (2000). Use of the BAEI (Bare Soil Adjusted Vegetation Index) for estimating vegetation cover in semi-arid environments. *Remote Sensing of Environment*, 74(2), 301-313. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(00\)00156-X](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00156-X)

Seto, K. C., Deshmukh, S. S., & Satterthwaite, D. (2020). The urban transformation of landscapes and its implications for sustainability. *Annual Review of Environment and Resources*, 45, 359-382. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012220-043202>.

Silva, H., Ramos, L. & Castillo, V. (2021). Uso de herramientas SIG para la planificación urbana sostenible en áreas de expansión. *Tecnología y Medio Ambiente*, 22(5), 99-121.

Silva, R., Castro, V., & Almeida, T. (2022). SIG y su aplicación en la planificación territorial sostenible. *Revista Latinoamericana de Geografía*, 19(1), 99-115.

Toolify.ai. (2023). "Cuantificación de incertidumbre en imágenes médicas." Disponible en: Toolify AI.

UN-Habitat. (2020). *World cities report 2020: The value of sustainable urbanization*. Nairobi: United Nations Human Settlements Programme. <https://unhabitat.org/wcr/>

Urban Transitions. (2021). *Las ciudades mexicanas: tendencias de expansión y sus impactos*. https://urbantransitions.global/wp-content/uploads/2021/02/Las_ciudades_mexicanas_digital.pdf

Valencia, R. J., & Torres, F. M. (2019). Efectos de la expansión urbana en la pérdida de cobertura vegetal en zonas montañosas del Oriente antioqueño. *Investigaciones Ambientales*, 14(3), 78-92.

Yang, Y., & He, Y. (2023). A multidisciplinary perspective on the relationship between sustainable built environment and user perception: A bibliometric analysis. *Sustainable Cities and Society*, 84, 104473. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104473>

Yuca Bellido, L. A. (2021). *Cambio de cobertura del suelo por expansión urbana en la zona de amortiguamiento del Refugio de Vida Silvestre Pantanos de Villa*.

Zuluaga, D. (2020). Transformaciones del uso del suelo en el Valle de San Nicolás:
Urbanización y sostenibilidad. *Revista Colombiana de Geografía*, 29(1), 34