

**ANÁLISIS DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO Y SU INCIDENCIA EN LA
FRAGMENTACIÓN Y CONECTIVIDAD ECOLÓGICA DEL PAISAJE EN LOS MUNICIPIOS
DE COTA, TENJO Y TABIO (2005–2020) MEDIANTE HERRAMIENTAS SIG**

JESSICA ANDREA TORRES CEBALLOS

Universidad Piloto de Colombia
Facultad de Ingeniería
Administración Ambiental

Bogotá, Colombia
Marzo, 2025.

**ANÁLISIS DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO Y SU INCIDENCIA EN LA
FRAGMENTACIÓN Y CONECTIVIDAD ECOLÓGICA DEL PAISAJE EN LOS MUNICIPIOS
DE COTA, TENJO Y TABIO (2005–2020) MEDIANTE HERRAMIENTAS SIG**

JESSICA ANDREA TORRES CEBALLOS

Trabajo de grado presentado para optar al título de
Administrador ambiental

Directora

ALEJANDRA RIVERA BASTO

Universidad Piloto de Colombia
Facultad de Ingeniería
Administración Ambiental

Bogotá, Colombia
Marzo, 2025.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	5
1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	6
2 JUSTIFICACIÓN.....	6
3 OBJETIVOS.....	9
GENERAL	9
ESPECÍFICOS	9
4 MARCO REFERENCIAL	10
CONCEPTUAL	10
TEÓRICO	13
5 METODOLOGÍA.....	18
5.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN	18
5.2 UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	19
5.3 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA:	20
5.4 SELECCIÓN Y RECOPILACIÓN DE DATOS:	21
5.5 SELECCIÓN DE UN SOFTWARE SIG:	22
5.6 PREPARACIÓN DE LOS DATOS:	23
5.7 PROCESAMIENTO DE DATOS:	23
5.7.1 <i>Combinaciones de Bandas (RGB)</i>	24
5.7.2 <i>Índices Espectrales</i>	24
5.7.3 <i>Preparación de Coberturas para Análisis de Fragmentación</i>	25
5.7.4 <i>Análisis de Fragmentación del Paisaje</i>	26
6. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	28
6.1 ANÁLISIS MEDIANTE COMBINACIONES RGB	28
6.1.1 <i>Infrarrojo</i>	28
6.1.2 <i>Falso color</i>	30
6.1.3 <i>Análisis de vegetación</i>	31
6.2 CAMBIOS EN LA COBERTURA DEL SUELO.....	32
6.3 FRAGMENTACIÓN DEL PAISAJE	34
6.4 MODELO DPSIR.....	38
6.5 ENFOQUE SETS (SOCIAL–ECOLOGICAL–TECHNOLOGICAL SYSTEMS)	40

LISTADO DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Mapa ubicación del área de estudio	20
Ilustración 2. Comparación multitemporal de la combinación infrarrojo cercano (RGB).....	29
Ilustración 3. Comparación multitemporal de la combinación falso color (RGB) para los años 2005 y 2020	30
Ilustración 4. Comparación multitemporal de la combinación falso color (RGB) para los años 2005 y 2020	31
Ilustración 5. Comparación del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) para 2005 y 2020.....	33
Ilustración 6. Tendencia temporal de las métricas de fragmentación del paisaje (2005–2020)	36
Ilustración 7. Modelo DPSIR aplicado al análisis de cambios en el uso del suelo en Cota, Tenjo y Tabio (2005–2020).....	39
Ilustración 8. Enfoque SETS aplicado al análisis de cambios en el uso del suelo en Cota, Tenjo y Tabio (2005–2020).....	41

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1 Recopilación de Datos.	21
Tabla 2. Equivalencias entre categorías Corine y grupos homogéneos.....	25
Tabla 3 Comparación espacial del NDVI de 2005 y 2020.....	33
Tabla 4. Métricas de fragmentación del paisaje para 2005 y 2020	35

INTRODUCCIÓN

El cambio de uso y cobertura del suelo es uno de los principales procesos de transformación territorial a nivel global, debido a sus efectos directos sobre la estructura y funcionalidad de los ecosistemas, la biodiversidad y la provisión de servicios ecosistémicos. En contextos periurbanos, como la Sabana de Bogotá, estas transformaciones se intensifican por la presión derivada de la expansión urbana, el crecimiento industrial y la dinámica del mercado inmobiliario, generando modificaciones significativas en la configuración del paisaje y en la conectividad ecológica.

Los municipios de Cota, Tenjo y Tabio, ubicados en el departamento de Cundinamarca, representan un caso de estudio relevante debido a su importancia ecosistémica, su vocación agrícola y su creciente presión antrópica. La transformación progresiva de coberturas naturales y agrícolas hacia usos urbanos e industriales ha generado procesos de fragmentación del paisaje, reducción de hábitats naturales y alteración de la conectividad ecológica, con implicaciones directas sobre servicios ecosistémicos clave como la regulación hídrica y la conservación de la biodiversidad.

Con esta problemática, el presente trabajo tiene como objetivo analizar los efectos del cambio de uso del suelo sobre la estructura y funcionalidad de los ecosistemas en estos municipios durante el periodo 2005–2020, mediante la integración de herramientas de teledetección, Sistemas de Información Geográfica (SIG) y métricas de paisaje. Para ello, se emplea un enfoque cuantitativo y espacial basado en el análisis multitemporal de imágenes satelitales Landsat, el cálculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y la aplicación de métricas de fragmentación como el tamaño medio de parche, la densidad de parches, la densidad de borde y la distancia al vecino más cercano, utilizando el entorno de programación R.

El estudio se apoya en marcos conceptuales como el modelo DPSIR (Drivers–Pressures–State–Impact–Response) y el enfoque de Sistemas Socio-Ecológico-Tecnológicos (SETS), los cuales permiten interpretar las transformaciones territoriales desde una perspectiva integral, articulando las dimensiones sociales, ecológicas y tecnológicas involucradas en la dinámica del territorio.

El desarrollo de esta investigación no solo permite comprender las dinámicas de cambio en la cobertura y estructura del paisaje en la Sabana de Bogotá, sino que también aporta insumos técnicos relevantes para la planificación ambiental y el ordenamiento territorial. Con los resultados obtenidos se busca contribuir al fortalecimiento de estrategias de conservación, gestión sostenible del territorio y toma de decisiones informadas por parte de las autoridades locales, en un contexto de creciente presión sobre los ecosistemas estratégicos de la región.

1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Pregunta problema: ¿Cómo han incidido los cambios de uso y cobertura del suelo entre 2005 y 2020 en la fragmentación y la conectividad ecológica del paisaje, y cuáles son sus implicaciones para la provisión de servicios ecosistémicos de regulación hídrica y biodiversidad en los municipios de Cota, Tenjo y Tabio, con el fin de contribuir al ordenamiento y la conservación del territorio mediante el uso de herramientas SIG y métricas de paisaje implementadas en R?

2 JUSTIFICACIÓN

Los municipios de Cota, Tenjo y Tabio, ubicados en la Sabana de Bogotá, presentan una alta importancia ecosistémica y socioeconómica debido a su localización estratégica y a la diversidad de servicios ecosistémicos que sostienen la dinámica regional. Estos territorios albergan ecosistemas de gran relevancia, como bosques altoandinos y relictos de humedales, los cuales cumplen funciones esenciales en la regulación hídrica, la conectividad ecológica y la conservación de la biodiversidad (CAR, 2020). Asimismo, poseen suelos de alta productividad agrícola, que han sostenido históricamente actividades campesinas vinculadas a la producción de hortalizas, tubérculos y flores, contribuyendo de manera significativa a la seguridad alimentaria de Bogotá y de la región (Alcaldía de Tabio y Tenjo, 2020). Sin embargo, su cercanía a la capital también los convierte en áreas de alta presión por la expansión urbana e industrial, especialmente en Cota, que ha experimentado un acelerado crecimiento poblacional y económico en los últimos años (Alcaldía de Cota, 2020). En este contexto, la importancia socioeconómica radica no solo en su papel como despensa agrícola y espacios de valor turístico y cultural, sino también en su función como territorios que soportan procesos de urbanización que transforman sus dinámicas ambientales y sociales.

Los municipios enfrentan una creciente problemática asociada al cambio de uso y cobertura del suelo, derivada principalmente de la expansión urbana, industrial y de servicios en la Sabana de Bogotá. En Cota, el desarrollo industrial y logístico ha transformado de manera significativa su vocación agrícola, generando pérdida de suelos fértiles y presión sobre áreas de importancia ambiental (Alcaldía de Cota, 2020). En Tenjo y Tabio, si bien persiste una importante tradición agrícola, se evidencia un incremento de parcelaciones rurales y proyectos residenciales, lo que ha ocasionado fragmentación del hábitat, reducción de áreas de producción (Alcaldía de Tenjo y Tabio, 2020). Estas transformaciones territoriales se suman a procesos de ocupación informal y cambios en la dinámica del uso del suelo que generan conflictos entre la conservación de ecosistemas estratégicos, la actividad agrícola y la urbanización acelerada (CAR, 2020). Adicionalmente, estudios de la CAR y el IDEAM han señalado que la presión

antrópica sobre la estructura ecológica principal de la Sabana está comprometiendo la provisión de servicios ecosistémicos clave, como la regulación hídrica y la calidad del aire (CAR, 2020; IDEAM, 2018). Esta situación plantea la necesidad urgente de integrar herramientas de planificación y gestión territorial que permitan armonizar el desarrollo económico con la sostenibilidad ambiental de los municipios.

El uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) constituye una herramienta fundamental para el análisis de los cambios de uso y cobertura del suelo en los municipios, ya que permite integrar información espacial, ambiental y socioeconómica con el fin de generar diagnósticos y proyecciones basadas en evidencia. A través de los SIG es posible identificar patrones de transformación territorial, evaluar los efectos de la expansión urbana e industrial y analizar la pérdida o fragmentación de ecosistemas estratégicos (Burrough & McDonnell, 1998). Asimismo, su aplicación facilita la elaboración de escenarios futuros que apoyan la planificación del ordenamiento territorial y la gestión ambiental a escala municipal y regional (Goodchild, 2007). En Colombia, entidades como el IDEAM han desarrollado metodologías estandarizadas, como el *CORINE Land Cover*, para la generación de coberturas de suelo mediante SIG, lo cual ha permitido monitorear las dinámicas de cambio en la Sabana de Bogotá y otras regiones del país (IDEAM, 2018). De esta manera, el empleo de los SIG no solo aporta un componente técnico indispensable para el análisis académico, sino que también fortalece la toma de decisiones por parte de autoridades locales y regionales, asegurando procesos de planificación más eficientes y sostenibles.

De manera complementaria, el uso del lenguaje de programación R ha permitido ampliar el análisis espacial mediante la aplicación de métricas de paisaje, las cuales son herramientas ampliamente utilizadas en la ecología del paisaje para cuantificar la estructura espacial, la fragmentación y la conectividad ecológica de los ecosistemas. Estas métricas permiten transformar los patrones espaciales observados en indicadores cuantificables, facilitando el análisis comparativo de cambios en el tiempo y la evaluación de procesos de fragmentación del hábitat (McGarigal et al., 2012). En particular, indicadores como el tamaño medio de parches, la densidad de parches, la densidad de borde y la distancia al parche más cercano han sido reconocidos como métricas fundamentales para describir la configuración del paisaje y evaluar el grado de aislamiento entre fragmentos naturales (Turner et al., 2001; McGarigal et al., 2012).

Asimismo, para comprender de manera integral las transformaciones territoriales involucradas al cambio de uso y cobertura del suelo, este trabajo se apoya en marcos conceptuales utilizados en el análisis ambiental y la planificación territorial, como el modelo DPSIR (Drivers, Pressures, State, Impact, Response) y el enfoque de Sistemas Socio-Ecológicos-Tecnológicos (SETS). El modelo DPSIR permite estructurar las relaciones causales entre las fuerzas socioeconómicas que impulsan la expansión urbana y agrícola (drivers), las presiones ejercidas sobre el territorio mediante la transformación del uso del suelo (pressures), los cambios observados en el estado del ambiente, tales como la fragmentación del paisaje y la pérdida de conectividad ecológica (state), y sus impactos sobre la provisión de servicios ecosistémicos de regulación hídrica

y biodiversidad (impact), facilitando la identificación de posibles respuestas de gestión y ordenamiento territorial (Gabrielsen & Bosch, 2003; Tscherning et al., 2012).

De manera complementaria, el enfoque SETS reconoce que los territorios funcionan como sistemas complejos en los que interactúan de forma interdependiente las dimensiones sociales, ecológicas y tecnológicas, siendo estas últimas fundamentales para el análisis y la gestión del territorio en contextos de alta presión antrópica (Ahvenniemi et al., 2017; Markolf et al., 2018). Por lo que, las herramientas de teledetección y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son componentes tecnológicos clave que permiten analizar espacialmente los cambios de uso del suelo, evaluar la fragmentación y conectividad del paisaje y generar información técnica para apoyar la toma de decisiones en procesos de ordenamiento y conservación ambiental. La unión de estos marcos no corresponde a un ejercicio de modelación predictiva, es un soporte conceptual que orienta la interpretación de resultados espaciales y fortalece una articulación entre análisis técnico y planificación territorial en los municipios de Cota, Tenjo y Tabio.

En este contexto, un análisis integral de las dinámicas de cambio de uso, cobertura del suelo y su incidencia en la fragmentación del paisaje, la conectividad ecológica y la provisión de servicios ecosistémicos de regulación hídrica y biodiversidad no solo permite documentar las transformaciones territoriales ocurridas entre 2005 y 2020, sino que también genera información técnica relevante que puede ser utilizada como insumo para la actualización de los instrumentos de ordenamiento territorial municipal, tales como los Planes de Ordenamiento Territorial (POT), los Esquemas de Ordenamiento Territorial (EOT) y los Planes Básicos de Ordenamiento Territorial (PBOT). Esto resulta pertinente si se considera que dichos instrumentos presentan lapsos significativos en sus procesos de revisión y actualización, ya que en los municipios de estudio sus últimas adopciones o modificaciones datan de más de una década: Cota cuenta con un PBOT adoptado en el año 2000, Tabio con una modificación de su EOT en 2007 y Tenjo con una revisión general aprobada en 2014.

De esta manera, el aporte académico de la presente investigación se alinea con las necesidades de las autoridades locales y regionales de contar con información espacial actualizada, confiable y técnicamente sustentada, que respalde la toma de decisiones en materia de uso del suelo, conservación de ecosistemas estratégicos y adaptación al cambio climático, contribuyendo al fortalecimiento de procesos de planificación ambiental y ordenamiento sostenible del territorio en la Sabana de Bogotá.

3 OBJETIVOS

General

Analizar los efectos del cambio de uso del suelo sobre la estructura y funcionalidad de los ecosistemas en los municipios de Cota, Tenjo y Tabio entre 2005 y 2020, mediante el uso de herramientas SIG, con el fin de generar insumos para medidas de conservación y ordenamiento territorial.

Específicos

- Determinar la variación espaciotemporal de la cobertura vegetal en los municipios de estudio entre 2005 y 2020, a través del cálculo del índice NDVI y análisis de composiciones multiespectrales.
- Cuantificar los cambios en la estructura del paisaje mediante métricas de fragmentación (tamaño, número de parches y conectividad) para identificar la pérdida o ganancia de hábitat en el periodo establecido.
- Relacionar los patrones de intervención antrópica con la funcionalidad ecológica de los ecosistemas, con el fin de localizar áreas críticas de degradación y zonas con potencial de recuperación vegetal.

4 MARCO REFERENCIAL

Conceptual

La **expansión urbana** hace referencia al proceso mediante el cual las ciudades crecen más allá de sus límites originales, ocupando áreas rurales o periurbanas, generalmente con un patrón disperso y poco planificado. Este fenómeno se asocia a la presión demográfica, la industrialización y la necesidad de infraestructura y servicios (Angel, 2016). Implicando un crecimiento desbordado de las ciudades hacia territorios periféricos, caracterizado por un uso intensivo del suelo, la pérdida de ecosistemas y una alta demanda de servicios públicos, lo cual genera desafíos de sostenibilidad (CEPAL, 2012).

La **fragmentación de hábitat** se define como el proceso mediante el cual un hábitat continuo se divide en áreas más pequeñas y aisladas entre sí (Fahrig, 2003). Reduciendo del área total disponible, sino también la alteración en la estructura espacial de los ecosistemas, lo cual reduce la riqueza de especies y aumenta el riesgo de extinción local (Haddad, 2015). La fragmentación afecta negativamente la provisión de servicios ecosistémicos como la polinización, la regulación hídrica y la captura de carbono, debido a la pérdida de continuidad ecológica y funcional de los paisajes (Laurance et al., 2018).

La **conectividad ecológica** facilita o impide el movimiento de especies, genes y flujos ecológicos entre hábitats naturales, garantizando la funcionalidad de los ecosistemas (Taylor., 1993). Con corredores biológicos y mosaicos de hábitat que permiten mantener la diversidad genética y ecológica, reduciendo los efectos negativos de la fragmentación (Crooks & Sanjayan, 2006). También se reconoce como un componente clave para la conservación de la biodiversidad, ya que posibilita la adaptación de especies frente al cambio climático y a la presión del desarrollo urbano (Saura et al., 2014).

Los **servicios ecosistémicos (SE)** se definen como los componentes y procesos de los ecosistemas que son consumidos, disfrutados o que conducen a aumentar el bienestar humano tomando en cuenta la demanda de los beneficiarios, así como la dinámica de los ecosistemas (Daily 1997, Boyd y Banzhaf 2007, Quétier et al. 2007, Luck et al. 2009, Quijas et al. 2010). Abarcando todos los beneficios que las sociedades humanas obtienen de los ecosistemas (MEA 2003). Estos incluyen: i) los bienes o recursos naturales como el agua o los alimentos, ii) los procesos ecosistémicos que regulan las condiciones en los que los humanos habitan, como la regulación del clima o de la erosión, iii) la contribución de los ecosistemas a experiencias que benefician directa o indirectamente a las sociedades, como el sentido de pertenencia o la recreación, y iv) los procesos ecológicos básicos que permiten que se provean los anteriores. El concepto de SE además considera el beneficio que distintos actores o sectores de la sociedad reciben de los ecosistemas, así como las complejas interacciones tanto positivas como negativas entre

servicios y entre actores o sectores de la sociedad (MEA 2003, Maass et al. 2005, Rodríguez et al. 2006, Quétier et al. 2007).

En el libro *Sistemas de Información Geográfica* (Olaya, 2014), un **Sistema de Información Geográfica (SIG)** puede entenderse como un conjunto de herramientas conceptuales, tecnológicas y organizativas que permiten la captura, almacenamiento, gestión, análisis y visualización de información espacialmente referenciada. Su esencia radica en que los datos que maneja no son únicamente alfanuméricos, sino que están vinculados a una localización geográfica sobre la superficie terrestre, lo cual la diferencia de otros sistemas de información. En este sentido, los SIG se configuran como integradores de información (al reunir datos de distintas fuentes y formatos), integradores de tecnologías (pues combinan informática, cartografía, teledetección, estadística y bases de datos), integradores de personas (al requerir distintos perfiles profesionales para su diseño, implementación y uso) e integradores de teorías y fundamentos (ya que toman aportes de disciplinas como la geografía, las matemáticas, la informática y las ciencias sociales). Gracias a esta naturaleza interdisciplinaria, los SIG no solo facilitan la organización y representación de datos espaciales, sino que además posibilitan el análisis espacial avanzado y la toma de decisiones fundamentadas en el territorio, lo cual los convierte en herramientas indispensables en campos como la planificación ambiental, la gestión del riesgo, la ingeniería, la ordenación del territorio y las ciencias sociales.

El **LANDSAT 7 ETM+** fue lanzado con éxito el 15 de abril de 1999 desde el Campo de Pruebas Occidental de la Base de la Fuerza Aérea Vandenberg, California, a bordo de un cohete Delta II desechable. El instrumento de observación terrestre del Landsat 7, con un sensor de (ETM+), replica las capacidades de los exitosos instrumentos Thematic Mapper de los Landsat 4 y 5. Incluye características adicionales que lo convierten en un instrumento más versátil y eficiente para estudios del cambio global, monitoreo y evaluación de la cobertura terrestre y cartografía de grandes áreas a lo largo del tiempo que sus predecesores, tiene una longitud de onda : VIS (0,40 - 0,75 μm), NIR (0,75 - 1,30 μm), SWIR (1,3 - 3,0 μm), TIR (6,0 - 15,0 μm), con una altitud de 705 km, inclinación 98,2°, órbita polar, heliosíncrona y con cobertura repetida de 16 días (NASA, 2025).

El **LANDSAT 8 OLI** fue lanzado el 11 de febrero de 2013 desde la Base de la Fuerza Aérea Vandenberg, California, La carga útil del satélite Landsat 8 consta de dos instrumentos científicos: el generador de imágenes operacionales terrestres (OLI) y el sensor infrarrojo térmico (TIRS). Estos dos sensores proporcionan cobertura estacional de la superficie terrestre global con una resolución espacial de 30 metros (visible, infrarrojo cercano, infrarrojo de onda corta); 100 metros (térmica); y 15 metros (pancromática). Landsat 8 representan un avance tecnológico significativo. OLI mejora los sensores Landsat anteriores mediante un enfoque técnico demostrado por un sensor a bordo del satélite experimental EO-1 de la NASA. OLI es un sensor de barrido lineal con un telescopio de cuatro espejos y cuantificación de 12 bits, se encuentra en una latitud de 705 km, con una inclinación 98,2°, órbita polar, heliosíncrona y con cobertura repetida de 16 días (NASA, 2025).

Las **combinaciones RGB** es una combinación de tres bandas, que recibe el nombre de *imagen de color compuesta*. Las imágenes de las distintas **bandas** se pueden combinar entre ellas para producir una imagen en *color real* o *falso color* en función de las **bandas** escogidas. Esto se hace aplicando cada uno de los tres colores primarios (*rojo, verde, azul*) a una **banda** distinta de la imagen. El máximo de **bandas** que podemos emplear por composición es de tres y la apariencia dependerá de las **bandas espectrales** que asignemos a los canales *rojo, verde y azul* del monitor. El proceso permite visualizar, simultáneamente, información de distintas regiones del *espectro*, lo que facilita la delimitación visual de algunas cubiertas. La elección de las **bandas** para realizar la composición, y el orden de los colores destinados a cada una, dependen del *sensor* sobre el que se trabaje y de la aplicación última del proyecto. La composición más habitual es la denominada *falso color* o *infrarrojo color*, fruto de aplicar los cañones de *rojo, verde y azul* sobre las **bandas** correspondientes al *infrarrojo cercano*, el *rojo* y el *verde* respectivamente (Diego Alonso, 2018)

En software **R STUDIO** se ha consolidado como un entorno robusto para el análisis estadístico y espacial, ampliamente utilizado en ciencias ambientales (R Core Team, 2023). Su naturaleza de código abierto facilita la reproducibilidad científica y la integración con sistemas de información geográfica. En particular, el paquete *landscapemetrics* implementa en R un conjunto estandarizado de métricas de paisaje compatibles con los lineamientos conceptuales desarrollados por FRAGSTATS, uno de los programas más utilizados en ecología del paisaje (Hesselbarth et al., 2019; McGarigal et al., 2012).

El paquete **LANDSCAPEMETRICS** permite calcular métricas a nivel de parche, clase y paisaje, facilitando el análisis multiescalar de la fragmentación y conectividad ecológica. Su integración con objetos espaciales provenientes de paquetes como *terra* o *raster* posibilita el procesamiento de datos derivados de teledetección y SIG, garantizando coherencia metodológica y precisión espacial (Hesselbarth et al., 2019). De esta manera, el uso de R no solo fortalece el rigor analítico del estudio, sino que también contribuye a la transparencia y replicabilidad del análisis espacial aplicado al ordenamiento territorial.

El **modelo DPSIR (Drivers, Pressures, State, Impact, Response)** es un marco conceptual desarrollado por la Agencia Europea de Medio Ambiente con el propósito de estructurar y analizar las relaciones causales entre las actividades humanas y los cambios observados en el ambiente (Gabrielsen & Bosch, 2003). Este modelo ha sido ampliamente utilizado en estudios ambientales y de ordenamiento territorial debido a su capacidad para integrar dimensiones socioeconómicas, biofísicas y de gestión en un esquema analítico coherente.

En el modelo DPSIR, los **drivers** (fuerzas motrices) corresponden a los procesos socioeconómicos que impulsan las transformaciones territoriales. Estos drivers generan **pressures** (presiones) directas sobre el ambiente, como consecuencia de estas presiones, se producen modificaciones en el **state** (estado) del ambiente, reflejadas en las alteraciones. Las alteraciones en el estado ambiental derivan en **impacts** (impactos)

sobre los ecosistemas y las sociedades humanas. Finalmente, el componente **response** (respuesta) hace referencia a las acciones institucionales, normativas y de gestión orientadas a mitigar los impactos identificados (Tscherning et al., 2012).

El enfoque de **Sistemas Socio-Ecológicos-Tecnológicos (SETS)** surge como una evolución de los estudios de sistemas socioecológicos, incorporando de manera explícita la dimensión tecnológica como un componente fundamental en la dinámica y gestión de los territorios contemporáneos (Markolf et al., 2018). Este enfoque reconoce que los sistemas territoriales funcionan como redes complejas en las que interactúan de forma interdependiente las dimensiones sociales, ecológicas y tecnológicas, y que los cambios en cualquiera de estas dimensiones pueden generar efectos en cascada sobre las demás.

Desde la perspectiva SETS, la dimensión **social** incluye a los actores, las dinámicas poblacionales, las actividades productivas y los marcos institucionales que influyen en la ocupación y uso del territorio. La dimensión **ecológica** comprende los ecosistemas, la biodiversidad, la estructura del paisaje y la provisión de servicios ecosistémicos que sustentan el bienestar humano. Por su parte, la dimensión **tecnológica** abarca tanto la infraestructura física como las herramientas y sistemas de información que permiten analizar, monitorear y gestionar el territorio (Ahvenniemi et al., 2017).

Teórico

El cambio de uso y cobertura del suelo constituye uno de los principales motores de transformación ambiental a nivel global, debido a que afecta directamente la biodiversidad, la provisión de servicios ecosistémicos y la sostenibilidad del territorio (Foley, 2005). Este fenómeno se entiende como la modificación en la cobertura y función del territorio, generalmente derivada de actividades humanas como la urbanización, la expansión agrícola y el desarrollo de infraestructura, aunque también puede estar influido por procesos naturales (Lambin, 2001).

La consolidación de la *Land Change Science* ha permitido comprender este fenómeno desde un enfoque interdisciplinario, al integrar componentes biofísicos y socioeconómicos para explicar cómo los cambios territoriales impactan en los sistemas ambientales y sociales (Turner, 2007). De esta manera, se reconoce que el cambio de uso del suelo no solo implica la transformación física de un espacio, sino también la reconfiguración de su estructura ecológica y funcionalidad, lo que repercute en la resiliencia de los ecosistemas.

A nivel global, la principal causa de la transformación de los paisajes ha sido la conversión de áreas naturales en zonas agrícolas o urbanas, en un proceso asociado a las demandas de crecimiento poblacional, seguridad alimentaria y desarrollo económico (FAO, 2016). Sin embargo, estas modificaciones conllevan costos ambientales significativos como la deforestación, la fragmentación de hábitats y la pérdida de servicios ecosistémicos.

Verburg, Neumann y Nol (2011), establecen que los estudios sobre cambio de uso del suelo también han identificado desafíos metodológicos, especialmente en la recopilación, comparación y uso de datos espaciales multitemporales destacando la necesidad de integrar distintas fuentes de información y de mejorar la resolución temporal y espacial de los análisis, con el fin de proporcionar resultados más precisos y útiles para la toma de decisiones en materia de gestión ambiental y ordenamiento territorial. El cambio de uso del suelo no solo transforma el paisaje de manera física, sino que también altera profundamente la estructura y funcionalidad de los ecosistemas. Entre los impactos más relevantes se encuentran la fragmentación de hábitats, la pérdida de biodiversidad, la alteración de ciclos hidrológicos y la degradación de los servicios ecosistémicos que sostienen la vida humana (Foley, 2005).

En términos ecológicos, la fragmentación constituye una de las consecuencias más visibles del cambio de uso del suelo, ya que divide los ecosistemas en parches más pequeños y aislados, reduciendo la conectividad ecológica. De acuerdo con Richard T. T. Forman, este proceso implica la pérdida de continuidad del paisaje, afectando su estructura y funcionalidad ecológica.

Por su parte, la conectividad ecológica se ve comprometida debido al aislamiento entre fragmentos, lo que limita la movilidad de especies y el flujo de procesos ecológicos. Según Simon A. Levin, la conectividad es un elemento fundamental para la resiliencia de los ecosistemas, ya que permite la continuidad de funciones ecológicas esenciales.

Asimismo, la funcionalidad ecosistémica se ve comprometida. La transformación de áreas naturales hacia usos urbanos o agrícolas intensivos provoca una disminución en la capacidad de los ecosistemas para regular el clima, mantener la fertilidad de los suelos, garantizar la calidad del agua y controlar procesos erosivos (Verburg, 2011). En estudios aplicados a la Sabana de Bogotá, se ha evidenciado que la urbanización ha modificado la dinámica hídrica y la recarga de acuíferos, poniendo en riesgo tanto la biodiversidad como la seguridad hídrica de la población (Memoria Justificativa, 2021).

La valoración de los servicios ecosistémicos ha ganado relevancia como marco conceptual y operativo para comprender las consecuencias de los cambios en la cobertura. En este sentido, Humacata (2017) aplicó un modelo espacial para mostrar cómo la pérdida de coberturas afecta directamente los servicios de regulación hídrica y la provisión de alimentos. De forma complementaria, el estudio de Molina (2016) analizó el mapeo y la valoración marginal de servicios ecosistémicos, evidenciando que los cambios de uso del suelo reducen de manera significativa los servicios de provisión en regiones agrícolas.

La Sabana de Bogotá constituye una de las regiones más estratégicas y a la vez más presionadas de Colombia, tanto por su valor ecológico como por su importancia socioeconómica. Este territorio, ubicado en el altiplano cundiboyacense a más de 2.500 m s. n. m., alberga ecosistemas de humedales, bosques altoandinos y páramos, los

cuales cumplen funciones vitales para la regulación hídrica, la captura de carbono y la conservación de la biodiversidad (IDEAM, 2018).

No obstante, la región ha experimentado una transformación acelerada en sus coberturas debido a la expansión urbana del Distrito Capital y de los municipios circundantes, el desarrollo de infraestructura vial, la intensificación agrícola y la presión industrial. Estas dinámicas han generado un patrón de fragmentación y reducción de áreas naturales, que compromete la conectividad ecológica y la integridad de la Estructura Ecológica Principal (CAR, 2021).

Asimismo, enfoques recientes sobre restauración, como los señalados por Vargas (2019), subrayan la necesidad de integrar la restauración ecológica con la planificación del uso del suelo para recuperar servicios ecosistémicos críticos, entre ellos la regulación climática y la conectividad ecológica.

La Memoria Justificativa para la Resolución de Ordenamiento Ambiental de la Sabana de Bogotá resalta que el crecimiento urbano en las últimas décadas ha sido el principal factor de presión, reduciendo significativamente los ecosistemas de humedal y las áreas agrícolas, y desplazando usos de suelo hacia la periferia (CAR, 2021). De igual forma, los escenarios de cambio climático proyectan un aumento de vulnerabilidad en la región, al intensificar fenómenos como la reducción de caudales y la pérdida de cobertura vegetal (IDEAM, 2018).

Por lo que, el Ministerio de Ambiente en el *Estudio Técnico De Soporte Lineamientos Para El Ordenamiento Ambiental De La Sabana De Bogotá, 2025* establece que

[...] los ecosistemas transformados incluyen tanto los ecosistemas urbanos como los agroecosistemas, estos últimos corresponden a las áreas donde las coberturas vegetales naturales han sido mayormente transformadas por actividades humanas y presentan diferentes arreglos espaciales de vegetación sembrada y manejada de manera antrópica. Además, pertenecen a esta categoría los cultivos anuales o transitorios, cultivos semipermanentes y permanentes, pastos para ganado y las áreas agrícolas heterogéneas.

Y la ocupación humana del territorio y el desarrollo del mercado inmobiliario de la Sabana de Bogotá, responden tanto a las dinámicas propias de la demanda del suelo, como a las disposiciones emanadas de los Planes de Ordenamiento Territorial de los municipios, particularmente aquellas derivadas de la clasificación del suelo (urbano, de expansión, rural y de protección) y de las categorías de desarrollo restringido en suelo rural como vivienda campestre y suburbano. La ocupación de la Sabana que tiene como origen a la ciudad de Bogotá, presenta una dinámica acelerada que se caracteriza por su forma expandida sobre suelos rurales y que configura un modelo conurbado entre los municipios cercanos y el núcleo urbano de Bogotá.

Por otro lado, vale la pena mencionar que la intensidad de las dinámicas económicas, poblacionales y del mercado inmobiliario tienen influencia en el patrón de ocupación del suelo de los municipios de la Sabana de Bogotá, ya que de la localización de la actividad se deriva la distribución y subdivisión predial. En el ámbito rural, los municipios que presentan mayor densidad predial son Cajicá, Chía y Cota, los cuales se caracterizan por un alto desarrollo de vivienda campestre y la consolidación de corredores de comercio y servicios sobre el troncal vial Chía-Siberia. Un segundo grupo de municipios se puede conformar por los municipios de **Tabio**, Tocancipá, Ubaque, Zipaquirá, Gachancipá, **Tenjo** y Chipaque, los cuales se caracterizan por mantener condiciones de baja intensidad en términos de subdivisión predial rural. Según el estudio de IDOM realizado en el 2016 se puede concluir que la dinámica territorial de la huella urbana de Bogotá desde 1997 se acercó hasta los bordes del Río Bogotá, y aunque es parte de la estructura ecológica de la región, no logró detener el crecimiento de la huella lo que resultó en un proceso de conurbación entre Bogotá D.C y municipios como Chía, Cota, Cajicá, Funza y Mosquera, caracterizándose Chía y Cota principalmente en usos de vivienda, mientras que Funza, Mosquera y Cajicá se caracterizan por desarrollar principalmente usos industriales. Este tipo de suelo que para 1997 era libre, a 2016 se transforma en desarrollos inmobiliarios con tipologías edificatorias mixtas y estratos socioeconómicos diversos pero especializados según el municipio.

Que, de acuerdo con la información presentada por la secretaria de Hábitat, los municipios de la región han experimentado tasas superiores a las de Bogotá, especialmente entre los años 2005 y 2010, en tanto, esto refleja en un aumento del “tejido urbano” fuera de las cabeceras municipales, es decir, de las áreas determinadas para el crecimiento urbano. Indicando, por ejemplo, que el área ocupada por fuera de la cabecera municipal es casi 12 veces mayor que el área ocupada en la cabecera municipal para el caso de Cota y Tabio, 10 veces mayor en La Calera, y 8 veces mayor en Tenjo. (Secretaría de Hábitat, 2024)

En cuanto a los servicios ecosistémicos, se ha señalado que los cambios de uso del suelo comprometen la provisión de agua, la captura de carbono y la regulación climática, con impactos directos en las comunidades humanas (Costanza et al., 1997; Daily, 1997). Estudios aplicados en Colombia, como los de la CAR (2021) y el IDEAM (2018), han advertido que en la Sabana de Bogotá la urbanización ha reducido de manera crítica la capacidad de humedales y bosques altoandinos para sostener procesos hidrológicos claves, mientras que la expansión agrícola intensiva ha contribuido a la degradación de suelos y a la pérdida de biodiversidad.

La fragmentación del paisaje, otro de los efectos del cambio de uso del suelo, no solo genera la pérdida de hábitat, sino que altera la conectividad ecológica y los flujos de energía y nutrientes entre ecosistemas. Según Forman (1995), la pérdida de continuidad en los paisajes afecta especialmente a especies con requerimientos de hábitat extensos, reduciendo su viabilidad a largo plazo. Este efecto ya ha sido documentado en la Sabana,

donde corredores ecológicos estratégicos han sido interrumpidos por el crecimiento urbano y vial (CAR, 2021; Ministerio de Ambiente, 2025).

Estudios experimentales de largo plazo han demostrado que la subdivisión de ecosistemas en parches más pequeños y aislados reduce la diversidad biológica, altera procesos ecológicos y disminuye la conectividad funcional del paisaje (Haddad et al., 2015). Estos efectos no solo impactan las poblaciones de especies, sino que también modifican la provisión de servicios ecosistémicos asociados, como la regulación hídrica y el mantenimiento de la diversidad biológica.

En cuanto a los servicios ecosistémicos, se ha señalado que los cambios de uso del suelo comprometen la provisión de agua, la captura de carbono y la regulación climática, con impactos directos en las comunidades humanas (Costanza et al., 1997; Daily, 1997). Estudios aplicados en Colombia, como los de la CAR (2021) y el IDEAM (2018), han advertido que en la Sabana de Bogotá la urbanización ha reducido de manera crítica la capacidad de humedales y bosques altoandinos para sostener procesos hidrológicos claves, mientras que la expansión agrícola intensiva ha contribuido a la degradación de suelos y a la pérdida de biodiversidad.

Frente a estas dinámicas de transformación y fragmentación del territorio, surge la necesidad de apoyarse en marcos analíticos que permitan no solo describir los cambios observados, sino también comprender sus causas profundas y orientar posibles respuestas de gestión. En este sentido, el modelo **DPSIR** (Drivers, Pressures, State, Impact, Response) ha sido ampliamente aplicado en Europa y América Latina para vincular factores socioeconómicos con impactos ecológicos y proponer alternativas de manejo (Gabrielsen & Bosch, 2003; Tscherning et al., 2012). De manera complementaria, el enfoque **SETS** (Social-Ecological-Technological Systems) aporta una mirada integral al considerar de forma simultánea las dimensiones ecológicas, sociales y tecnológicas de los territorios, como lo evidencian aplicaciones recientes en el marco de ciudades sostenibles y resilientes (Ahvenniemi et al., 2017; Markolf et al., 2018). Ambos marcos teóricos se constituyen así en herramientas valiosas para fortalecer el análisis de los cambios de uso del suelo en la Sabana de Bogotá, aportando una visión integral que puede traducirse en estrategias de conservación y planificación territorial más efectivas.

Los enfoques teóricos abordados proporcionan la base conceptual para interpretar los cambios en la estructura del paisaje observados en el presente estudio. En particular, los aportes de Richard T. T. Forman y Lenore Fahrig permiten analizar la fragmentación a partir de métricas como el tamaño de parche y la densidad, mientras que el concepto de conectividad ecológica desarrollado por Simon A. Levin resulta fundamental para comprender los efectos del aislamiento entre fragmentos. En este sentido, estos fundamentos teóricos orientan la interpretación de los resultados obtenidos mediante herramientas SIG, permitiendo relacionar los cambios en el uso del suelo con la pérdida de conectividad, la reorganización del paisaje y sus implicaciones sobre la funcionalidad ecológica del territorio.

5 METODOLOGÍA

5.1 Tipo de Investigación

Este trabajo corresponde a una investigación cuantitativa, descriptiva y explicativa, basada en técnicas de teledetección, análisis espacial y métricas de paisaje. Se fundamenta en el uso de datos secundarios provenientes de imágenes satelitales Landsat y cartografía temática, con el propósito de analizar la incidencia de los cambios de uso del suelo sobre la fragmentación y conectividad ecológica en los municipios de Cota, Tenjo y Tabio entre los años 2005 y 2020.

El estudio posee un alcance interpretativo y aplicado, ya que los resultados obtenidos permiten orientar la planificación territorial y la conservación ambiental mediante herramientas técnicas de análisis espacial.

A continuación, se describe cada tipo de investigación:

- Investigación Descriptiva y explicativa:
 - Describir los cambios en el uso y cobertura del suelo en los municipios de Cota, Tenjo y Tabio durante los años 2005 y 2020, a partir de análisis multitemporal de imágenes satelitales.
 - Analizar la incidencia de dichos cambios en la fragmentación del paisaje y la conectividad ecológica, mediante el cálculo de métricas espaciales que permiten explicar transformaciones en la estructura del territorio.
- Investigación Retrospectiva:
 - El análisis será por medio de datos históricos (2005-2020), y los resultados obtenidos permiten inferir en la gestión territorial y orientar posibles escenarios de planificación y conservación.
- Enfoque cuantitativo y espacial:
 - Se adoptó un enfoque basado en técnicas de teledetección, Sistemas de Información Geográfica (QGIS) y análisis espacial en entorno RStudio. Se realizó un análisis multitemporal de imágenes satelitales Landsat 7 (2005) y Landsat 8 (2020), así como el cálculo de métricas de paisaje (tamaño medio de parche, densidad de parches, densidad de borde y distancia al parche más cercano) mediante el paquete *landscapemetrics*, con el fin de evaluar cambios en la estructura, fragmentación y conectividad ecológica del territorio.

5.2 Ubicación del Área de Estudio

El área de estudio se localiza en la Sabana de Bogotá, en el departamento de Cundinamarca, al noroccidente de la capital del país, conformado por los municipios de Cota, Tenjo y Tabio. Estos municipios hacen parte de la provincia de Sabana Centro.

Municipio de Cota

- Coordenadas del casco urbano:
Latitud: 4°48'36" N, Longitud: 74°06'05" O
- Altitud de la cabecera municipal: 2 566 msnm
- Superficie total: 55 km² (Conformado por zona urbana 1,3 km² y rural 53,7 km²)

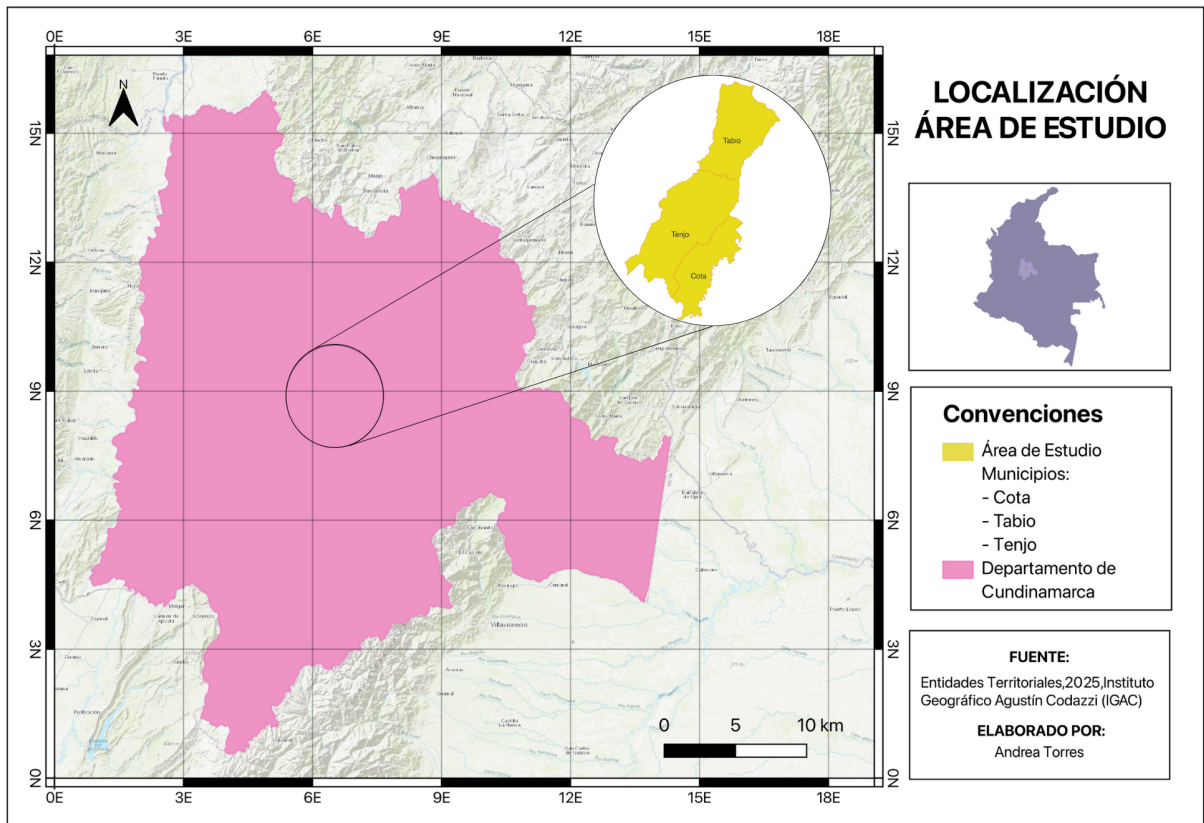
Municipio de Tenjo

- Coordenadas del casco urbano:
Latitud: 4° 35' 46".32 N, Longitud: 74° 04'39".02 O
- Altitud de la cabecera municipal: 2 580 msnm
- Superficie total: 117 km² (Conformado por zona urbana 8,7 km² y rural 108,3 km²)

Municipio de Tabio

- Coordenadas del casco urbano:
Latitud: 4° 35' 46".32 N, Longitud: 74° 04'39".02 O
- Altitud de la cabecera municipal: 2 569 msnm
- Superficie total: 74.5 km² (Conformado por zona urbana 0.43 km² y rural 74.2 km²)

Ilustración 1. Mapa ubicación del área de estudio



Nota. Elaboración propia.

5.3 Revisión Bibliográfica:

Se realizó una revisión de información espacial y no espacial, incluyendo artículos académicos, libros especializados, trabajos de grado, páginas web oficiales, servicios WFS (Web Feature Service) y WMS (Web Map Service), imágenes satelitales Landsat 7 ETM+ y Landsat 8, OLI, Mapa de Cobertura de la Tierra. Adaptación Corine Land Cover en escala 1:100.000 de 2005 y 2020 así como instrumentos de planificación territorial (POT municipales y lineamientos de la CAR).

Adicionalmente, se consultó literatura científica relacionada con fragmentación del paisaje, conectividad ecológica, métricas espaciales y análisis multitemporal mediante Sistemas de Información Geográfica, con el fin de sustentar metodológicamente el cálculo e interpretación de indicadores como tamaño medio de parche, densidad de parches, densidad de borde y distancia al parche más cercano.

Asimismo, se revisaron marcos conceptuales aplicados al análisis ambiental y territorial, como el modelo DPSIR (Drivers–Pressures–State–Impact–Response) y el enfoque de

Sistemas Socio-Ecológico-Tecnológicos (SETS), los cuales orientaron la interpretación de los resultados en términos de relaciones causales y dinámicas territoriales complejas.

Esta revisión permitió contextualizar los cambios en el uso del suelo en los municipios de estudio y su relación con la estructura ecológica del paisaje y la provisión de servicios ecosistémicos de regulación hídrica y biodiversidad.

5.4 Selección y Recopilación de Datos:

Con el fin de garantizar la calidad y pertinencia de los datos para el presente estudio, se llevó a cabo un riguroso proceso de selección y recopilación de información. La metodología adoptada permitió identificar y recolectar datos relevantes provenientes de diversas fuentes, los cuales fueron posteriormente organizados y sistematizados para su análisis. Esta información se encuentra detallada en la **Tabla 1. Recopilación de datos**, proporcionando una visión general de los recursos utilizados y su procedencia. La cuidadosa selección de estos datos constituye un paso crucial en la ejecución de la investigación, asegurando la validez de los resultados obtenidos.

Tabla 1 Recopilación de Datos.

INFORMACIÓN	FUENTE
Landsat 8: imágenes satelitales del año 2020 en formato Geo TIFF Sensor OLI/TIRS Bandas utilizadas: B3, B4, B5, B6 y B7 Resolución Espacial: - Pancromática: 15 m - Multiespectral: 30 m	
Landsat 7: imágenes satelitales del año 2005 en formato Geo TIFF Sensor ETM+ Bandas utilizadas: B2, B3, B4, B5 y B7 Resolución Espacial: - Pancromática: 15 m - Multiespectral: 30 m - Infrarrojo lejano o termal: 60 m. Imágenes Landsat 7 (2005) seleccionadas sin afectación por SLC-off desde 2003 (sin franjas de datos faltantes).	Imágenes satelitales USGS EarthExplorer
Límites municipales Cota, Tenjo y Tabio	Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC IDER - Infraestructura de Datos Espaciales Regional
Cobertura de la Tierra Land Cover para los periodos 2005 y 2020	Colombia en Mapas - Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM	
Softwares utilizados:	
QGIS 3.36.3	Software Libre
RStudio 2024.12.1+563	
Paquete usado en R:	
Landscapemetrics	(Hesselbarth et al., 2019)
Literatura académica sobre SIG en cambios de usos del suelo	
Artículos académicos:	
- Modelando el turismo alternativo con SIG. Una propuesta para el desarrollo sostenible local con visión global - Diseño de modelos prospectivos de ordenamiento territorial, utilizando SIG. una propuesta metodológica - Desarrollo de un modelo integrado en un SIG para evaluar la idoneidad turística en función de las características ambientales del territorio - Estructura urbana y cambio en el uso del suelo en Bogotá entre 2007 y 2017	ResearchGate

Nota. Elaboración Propia.

5.5 Selección de un Software SIG:

Para el desarrollo del análisis espacial se emplearon herramientas de software libre y código abierto, garantizando la reproducibilidad metodológica del estudio.

En una primera fase, se utilizó **QGIS versión 3.36.3**, un Sistema de Información Geográfica (SIG) multiplataforma, para el procesamiento cartográfico de las imágenes satelitales Landsat 7 (2005) y Landsat 8 (2020). En donde se usó para:

- Visualización y procesamiento inicial de imágenes satelitales Landsat 7 (2005) y Landsat 8 (2020).
- Generación de combinaciones RGB en falso color.
- Cálculo de índices espectrales (NDVI).
- Recorte y organización preliminar de capas espaciales.
- Elaboración cartográfica del área de estudio.

Posteriormente, el análisis de fragmentación y conectividad ecológica se realizó en **RStudio (versión 2024.12.1+563)** mediante el lenguaje de programación R, utilizando el paquete **landscapemetrics**. El cual se realizó:

- Rasterización de coberturas naturales.
- Reclasificación binaria de fragmentos.
- Identificación de parches.
- Cálculo de métricas de paisaje a nivel de paisaje y parche:
 - Densidad de parches (PD)
 - Tamaño medio de parche (MPS)
 - Densidad de borde (ED)
 - Distancia euclidiana al parche más cercano (ENN)

5.6 Preparación de los Datos:

Se llevó a cabo un proceso de organización y estandarización de la información espacial. Las actividades desarrolladas incluyeron:

- Verificación de la calidad y consistencia de imágenes satelitales y capas vectoriales.
- Depuración de información proveniente de servicios WFS y WMS.
- Clasificación preliminar y revisión de coberturas de uso del suelo.
- Recorte de todas las capas espaciales de acuerdo con los límites municipales de Cota, Tenjo y Tabio.
- Reproyección de los insumos cartográficos al sistema de referencia oficial MAGNA-SIRGAS (EPSG:3116), garantizando uniformidad espacial entre imágenes, coberturas y límites administrativos.

Las coberturas de uso del suelo correspondientes a los años 2005 y 2020 fueron reclasificadas para permitir su comparación multitemporal, generando capas ráster con resolución espacial de 30 metros, las cuales sirvieron como base para el cálculo de métricas de fragmentación y conectividad en RStudio.

5.7 Procesamiento de Datos:

El procesamiento de datos se desarrolló mediante un análisis multitemporal de las coberturas de uso del suelo correspondientes a los años 2005 y 2020, por un lado, las imágenes satelitales Landsat 7 (2005) y Landsat 8 (2020), descargadas desde el portal USGS EarthExplorer, fueron utilizadas para la generación de índices espectrales y combinaciones RGB con fines de interpretación visual y análisis comparativo de cambios en la cobertura vegetal y transformación del territorio.

Para el año 2005, considerando la problemática asociada al fallo del escáner (SLC-off) presente desde el año 2003, el cual generó una pérdida de información, para el presente estudio se seleccionaron escenas que no presentan afectaciones dentro del área de

estudio (sin franjas), permitiendo garantizar la integridad y continuidad de la información utilizada para el análisis.

Para el análisis de fragmentación y conectividad ecológica no se realizó directamente sobre las imágenes satelitales, sino sobre la cartografía oficial de Cobertura de la Tierra (adaptación nacional CORINE Land Cover), previamente clasificada por las entidades (IGAC – IDEAM). De esta manera, las imágenes Landsat apoyaron la interpretación espacial, mientras que las métricas del paisaje se calcularon a partir de la cartografía temática oficial.

5.7.1 Combinaciones de Bandas (RGB)

Se realizaron diferentes combinaciones de bandas para facilitar la interpretación de coberturas y cambios en el uso del suelo.

- **INFRARROJO:** (resalta vegetación y cambios de uso del suelo)
- **Landsat 7 ETM+:** B4, B2, B3
- **Landsat 8 OLI:** B5, B4, B3 Permite resaltar vegetación saludable y diferenciar áreas urbanas y cuerpos de agua.
- **FALSO COLOR:** (identificación general del paisaje)
- **Landsat 7 ETM+:** B7, B5, B3
- **Landsat 8 OLI:** B7, B6, B4 Distingue suelos desnudos, zonas urbanizadas, humedad del suelo y coberturas vegetales.
- **ANÁLISIS DE VEGETACIÓN**
- **Landsat 7 ETM+:** B5, B4, B3
- **Landsat 8 OLI:** B6, B5, B4 Diferenciación de tipos de cobertura vegetal y niveles de vigor.

5.7.2 Índices Espectrales

NDVI (Normalized Difference Vegetation Index): Este índice permite evaluar la densidad y el vigor de la vegetación. Se calcula a partir de las bandas del infrarrojo cercano (NIR) y el rojo (RED).

- **Landsat 7 ETM+ (2005):** $NDVI = (B4 - B3) / (B4 + B3)$
- **Landsat 8 OLI (2020):** $NDVI = (B5 - B4) / (B5 + B4)$

Para la interpretación de la cobertura vegetal, los valores continuos del índice NDVI fueron reclasificados en rangos categóricos que permiten diferenciar niveles de densidad y vigor de la vegetación. La clasificación se realizó con la herramienta de calculadora

ráster en QGIS, estableciendo intervalos basados en literatura académica, que van desde valores negativos hasta valores positivos cercanos a 1.

Se definieron las siguientes categorías:

- **Valores ≤ 0 :** Áreas sin vegetación (cuerpos de agua, zonas urbanas o superficies impermeables)
- **0 – 0.2:** Vegetación muy baja o áreas intervenidas
- **0.2 – 0.3:** Vegetación baja (pastos o cultivos)
- **0.3 – 0.4:** Vegetación media
- **0.4 – 0.5:** Vegetación media-alta
- **> 0.5:** Vegetación alta o densa

5.7.3 Preparación de Coberturas para Análisis de Fragmentación

Las coberturas de uso del suelo correspondientes a 2005 y 2020 fueron obtenidas en formato vectorial a partir de la adaptación nacional del CORINE Land Cover, previamente clasificada por el IDEAM. Para garantizar la comparabilidad multitemporal, se realizó un proceso de estandarización de leyendas, agrupando las categorías originales de nivel 3 en grupos homogéneos (Natural, Agrícola, Antrópico y Agua). Esto asegura que las clases analizadas en 2005 y 2020 correspondan exactamente a las mismas categorías, evitando sesgos por diferencias en el nivel de detalle de la clasificación.

Actividades realizadas:

- Reproyección al sistema **MAGNA-SIRGAS (EPSG:3116)**.
- Selección de coberturas asociadas a vegetación natural (arbustales, herbazales, vegetación secundaria, bosques y zonas pantanosas).
- Agrupación temática de categorías en grupos homogéneos mediante una función de reclasificación en R (mutate + case when).
- Conversión de formato vectorial a ráster con resolución espacial de 30 metros.

Tabla 2. Equivalencias entre categorías Corine y grupos homogéneos.

Categoría CLC 2005	Categoría CLC 2020	Código	Grupo homogéneo
3.2.2.1 Arbustal denso	3.2.2.1 Arbustal denso	3221	Natural
3.2.2.2 Arbustal abierto	3.2.2.2 Arbustal abierto	3222	Natural
3.2.1.1.1 Herbazal denso de tierra firme	3.2.1.1.1 Herbazal denso de tierra firme	321111	Natural

3.2.3 Vegetación secundaria o en transición	3.2.3.2 Vegetación secundaria baja	3232	Natural
3.1.4 Bosque de galería y ripario	3.1.4 Bosque de galería y ripario	314	Natural
4.1.1 Zonas pantanosas	4.1.1 Zonas pantanosas	411	Natural
2.3.1 Pastos limpios	2.3.1 Pastos limpios	231	Agrícola
2.4.1 Mosaico de cultivos	2.4.1 Mosaico de cultivos	241	Agrícola
1.1.1 Tejido urbano continuo	1.1.1 Tejido urbano continuo	111	Antrópico
1.2.1 Zonas industriales o comerciales	1.2.1 Zonas industriales o comerciales	121	Antrópico
5.1.1 Ríos	5.1.1 Ríos	511	Agua
5.1.2 Lagunas, lagos y ciénagas naturales	5.1.2 Lagunas, lagos y ciénagas naturales	512	Agua

Nota. Elaboración Propia.

5.7.4 Análisis de Fragmentación del Paisaje

El análisis se realizó en RStudio mediante el paquete *landscapemetrics*, especializado en el cálculo de métricas espaciales derivadas de ráster categóricos. Se generó un ráster binario donde:

- Valor 1 = coberturas naturales
- Valor 0 = matriz del paisaje (áreas transformadas)

El flujo en R incluyó:

1. Conversión de las coberturas naturales a objetos *SpatVector* (*terra:vect*).
2. Definición de un ráster base común de 30 m de resolución (*terra:rast*).
3. Rasterización de las coberturas naturales (*terra:rasterize*).
4. Cálculo de métricas de fragmentación con *landscapemetrics*:
Las métricas seleccionadas permiten evaluar distintos aspectos de la estructura y conectividad del paisaje:
 - **Tamaño medio de parche (MPS / AREA_MN):** cuantifica la dimensión promedio de los fragmentos de cobertura natural. Una disminución en MPS indica procesos de subdivisión del hábitat y pérdida de áreas continuas, lo que afecta la viabilidad de especies dependientes de grandes extensiones (Fahrig, 2003).
 - **Densidad de parches (PD):** mide el número de fragmentos por unidad de área. Un aumento en PD refleja mayor fragmentación y subdivisión de la cobertura natural, generalmente asociada a procesos de intervención antrópica como expansión agrícola o urbana (Turner, 2005).
 - **Densidad de borde (ED):** evalúa la proporción de áreas expuestas a efectos de borde. Los bordes generan cambios microclimáticos y alteran la dinámica ecológica, afectando la biodiversidad y la regeneración de los ecosistemas (Laurance et al., 2002).

- **Distancia euclidiana al vecino más cercano (ENN):** estima el grado de aislamiento entre parches. Valores altos de ENN indican menor conectividad estructural, lo que limita la movilidad de especies y compromete procesos ecológicos como dispersión y flujo génico (Taylor et al., 1993; Fahrig, 2003).

La combinación de estas métricas permite identificar patrones de **fragmentación, aislamiento y pérdida de conectividad** en el paisaje, proporcionando evidencia cuantitativa sobre los efectos de la transformación del territorio en la estructura ecológica.

En este estudio no se aplicaron procedimientos de validación de precisión basados en matrices de confusión ni en el cálculo del índice Kappa, debido a que el análisis se fundamenta en la reclasificación de coberturas previamente generadas por fuentes oficiales y en el uso de índices espectrales (NDVI), y no en una clasificación supervisada directa de imágenes satelitales.

No obstante, la confiabilidad de la información se sustenta en el uso de datos oficiales (CORINE Land Cover adaptado para Colombia), el procesamiento estandarizado de imágenes Landsat y la coherencia de los resultados con patrones ampliamente documentados en la literatura científica sobre fragmentación del paisaje.

6. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A continuación, se expone y analiza los resultados obtenidos a partir del análisis multitemporal de coberturas de uso del suelo para los años 2005 y 2020 en los municipios de Cota, Tenjo y Tabio. Se presentan los cambios espaciales identificados mediante interpretación de imágenes satelitales e índices espectrales, así como los resultados derivados del cálculo de métricas de fragmentación, conectividad ecológica y la implementación del modelo DPSIR con enfoque en SETS.

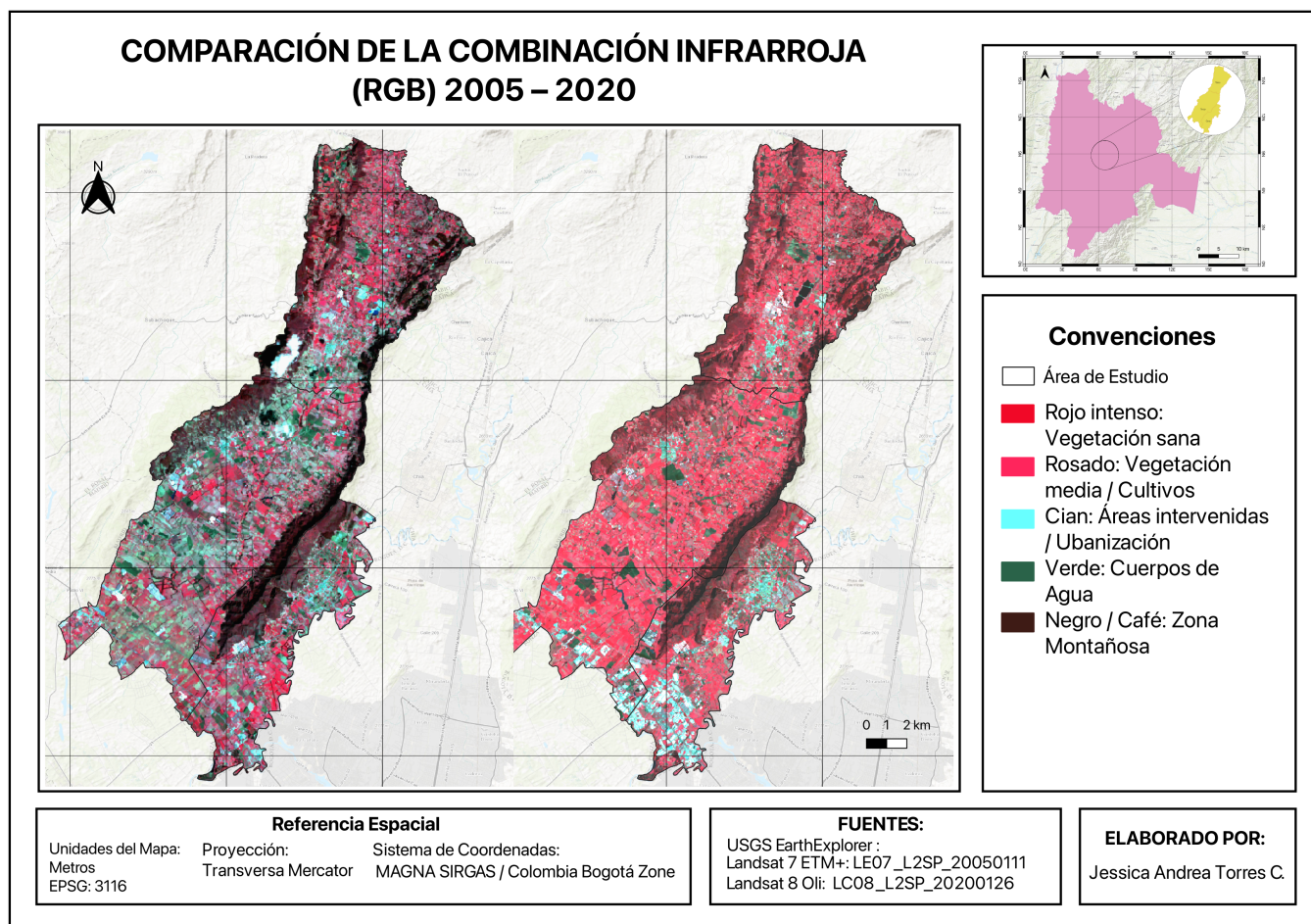
6.1 Análisis mediante combinaciones RGB

Con el fin de interpretación de los cambios en la cobertura del suelo entre los años 2005 y 2020, se realizaron composiciones que permitan resaltar características específicas del territorio, facilitando la identificación visual de coberturas como vegetación, áreas urbanizadas, cuerpos de agua y suelos desnudos. Las combinaciones RGB utilizadas fueron: infrarrojo cercano, falso color y análisis de vegetación, cada una orientada a destacar distintos elementos del paisaje. A través de la comparación multitemporal de estas composiciones, fue posible reconocer patrones de cambio en la cobertura vegetal y en las dinámicas de ocupación del territorio, como base de interpretación para el estudio de caso.

6.1.1 Infrarrojo

La siguiente comparación ***ilustración 2.*** de esta combinación espectral permite evidenciar cambios en la distribución y condición de la vegetación entre ambos periodos.

Ilustración 2. Comparación multitemporal de la combinación infrarrojo cercano (RGB)



Nota. Elaboración Propia.

La *ilustración 2* presenta la comparación multitemporal de la combinación en infrarrojo cercano (RGB), la cual permite resaltar la cobertura vegetal y diferenciarla de otras coberturas del suelo. En esta composición, la vegetación saludable se representa en tonos rojizos, mientras que las áreas urbanas o con baja cobertura vegetal se observan en tonalidades cian o aguamarina, los cuerpos de agua en tonos verdes oscuros.

Se muestra que para el año 2005 (lado izquierdo del mapa) la cobertura vegetal presenta una distribución heterogénea, con predominio de tonos rojizos dispersos en el territorio, lo que indica presencia de vegetación en diferentes estados de vigor. Sin embargo, también se identifican áreas con menor intensidad de color, asociadas a zonas intervenidas o con cobertura vegetal reducida.

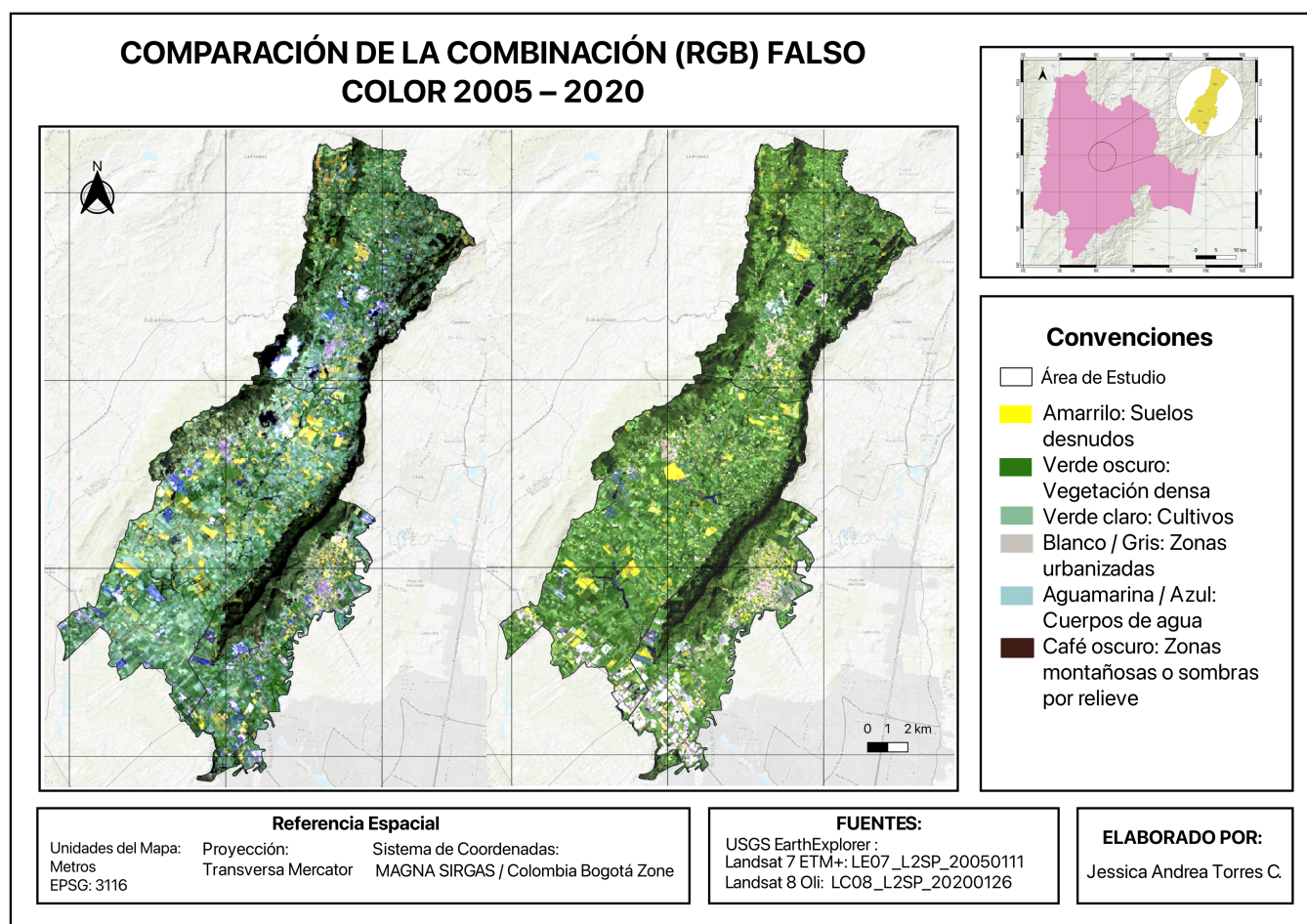
Para el año 2020 (lado derecho del mapa), se observa un incremento en la intensidad de los tonos rojizos en amplias zonas del área de estudio, lo que sugiere una mayor

presencia de vegetación. Esto puede estar relacionado con procesos de regeneración vegetal, cambios en prácticas de uso del suelo o consolidación de coberturas vegetales.

6.1.2 Falso color

La *ilustración 3* se identifica la comparación multitemporal de la combinación en falso color, en donde las coberturas del suelo mediante la asignación del infrarrojo cercano al canal rojo, el rojo al canal verde y el verde al canal azul.

Ilustración 3. Comparación multitemporal de la combinación falso color (RGB) para los años 2005 y 2020



Nota. Elaboración Propia.

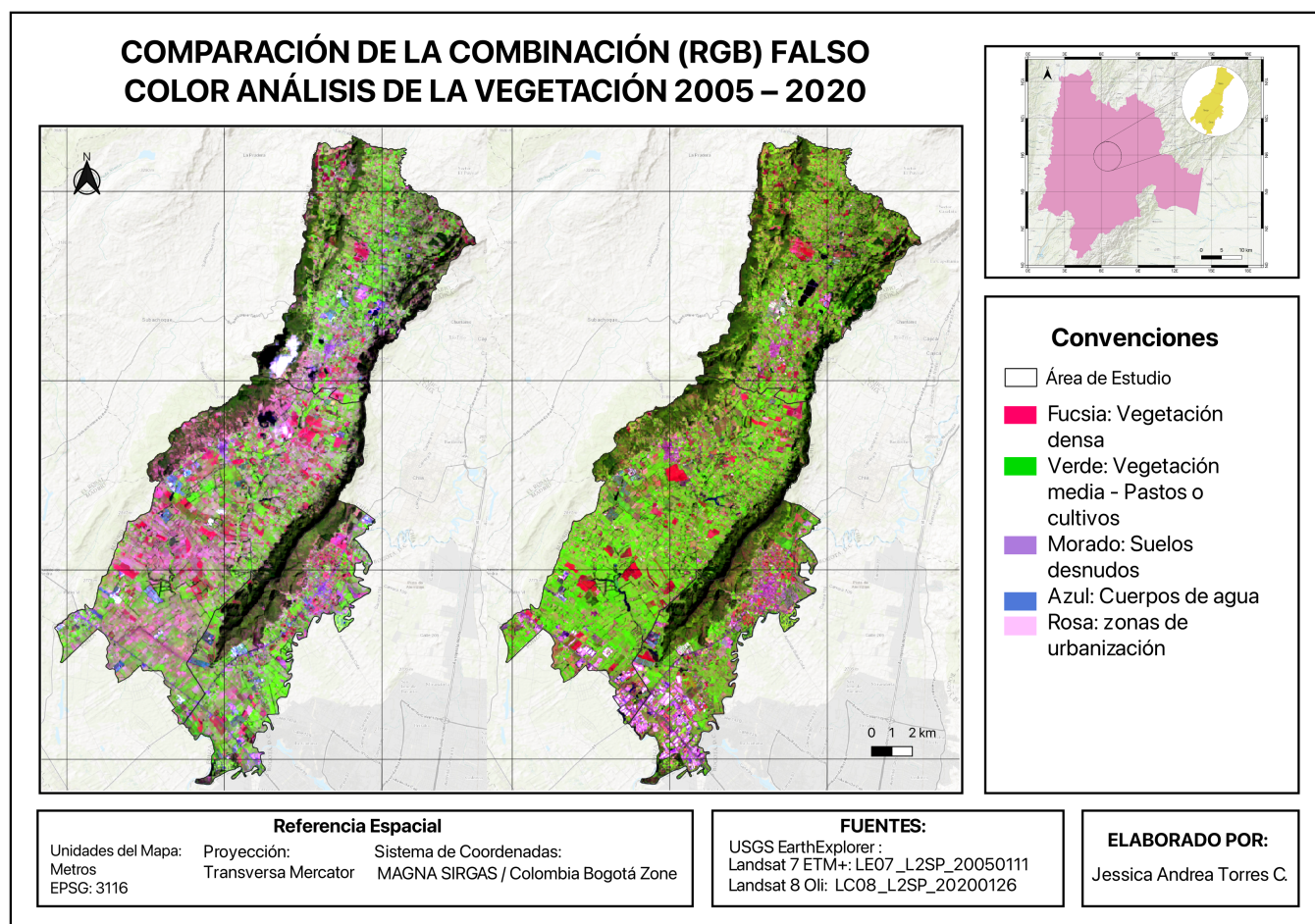
Para el año 2005, se observa una distribución con mayor cobertura en tonos verdes asociados a vegetación, aunque intercalados con áreas en tonalidades amarillas y grisáceas, que corresponden a suelos desnudos, zonas intervenidas y sectores

urbanizados; también se identifican cuerpos de agua en tonalidades azuladas y zonas oscuras relacionadas con sombras generadas por el relieve.

En contraste con el año 2020 se evidencia una mayor presencia de tonos verdes más homogéneos en gran parte del territorio, lo que sería un incremento en la cobertura vegetal o una mayor continuidad de estas áreas. Sin embargo, también se destacan zonas con tonalidades claras y grisáceas, especialmente en sectores específicos, indicando la persistencia y/o expansión de áreas urbanizadas o intervenidas; se mantienen tonalidades oscuras en áreas montañosas, asociadas a efectos de sombra por relieve.

6.1.3 Análisis de vegetación

Ilustración 4. Comparación multitemporal de la combinación falso color (RGB) para los años 2005 y 2020



Nota. Elaboración Propia.

La *ilustración 4* presenta la comparación multitemporal de la combinación RGB orientada al análisis de la vegetación; para el año 2005, se observa una distribución fragmentada de la vegetación densa, manchas dispersas en tonalidades fucsia, lo que sugiere una menor continuidad de coberturas vegetales con alto vigor. Predominan las tonalidades verdes claras y medias, asociadas a áreas agrícolas y pastizales, lo que indica un paisaje intervenido con mosaicos de uso del suelo. Se identifican zonas urbanizadas en color rosa y suelos desnudos en tonos morados, distribuidos por sectores.

Por otro lado, en el año 2020 se identifica un aumento en la presencia de tonalidades fucsia y verdes más intensos, lo que sugiere una mejora en el vigor de la vegetación y una mayor extensión de coberturas vegetales. Estas áreas se presentan de manera más continua en comparación con el año 2005, lo cual podría estar asociado a procesos de regeneración natural, cambios en prácticas agrícolas o recuperación de coberturas vegetales. No obstante, también se observa la persistencia e incluso expansión de zonas urbanizadas (tonos rosados) en sectores puntuales, lo que indica dinámicas simultáneas de transformación del suelo.

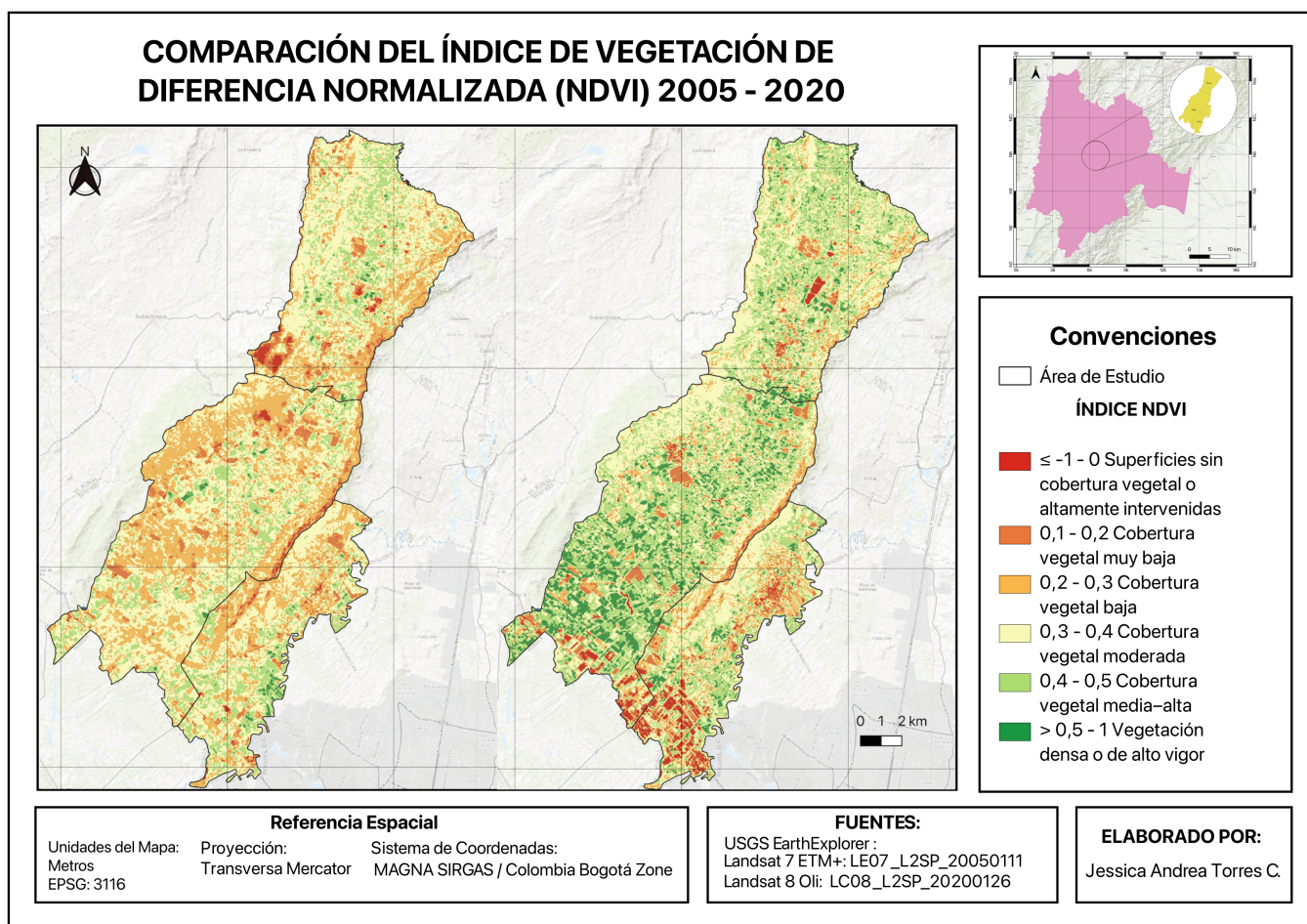
Las composiciones realizadas de las tres combinaciones RGB, permitieron identificar la distribución, densidad y estado de la cobertura vegetal en el área de estudio. La combinación infrarroja resaltó la presencia de vegetación, el falso color facilitó la diferenciación de coberturas del suelo y la combinación orientada al análisis de la vegetación permitió evaluar su vigor. De esta manera, se evidencian cambios en la dinámica del paisaje entre 2005 y 2020, caracterizados por variaciones en la continuidad y calidad de la cobertura vegetal, lo cual será analizado con mayor precisión mediante el índice NDVI y el análisis de fragmentación del paisaje.

6.2 Cambios en la cobertura del suelo

Con el fin de analizar los cambios en la cobertura vegetal del área de estudio, se realizó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) para los años 2005 y 2020. Este índice permitió identificar variaciones en la densidad y vigor de la vegetación, facilitando la interpretación de transformaciones en el uso del suelo.

En la *ilustración 5* se presenta la comparación espacial del NDVI para los dos años analizados, en la cual se evidencia un incremento en las coberturas correspondientes a vegetación densa y media-alta, así como en áreas de vegetación intervenida. De manera complementaria, en la Tabla 3 se expone la distribución porcentual de las coberturas según los rangos de clasificación establecidos.

Ilustración 5. Comparación del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) para 2005 y 2020



Nota. Elaboración Propia.

Tabla 3 Comparación espacial del NDVI de 2005 y 2020.

Clasificación	Rango NDVI	2005 (Píxeles)	2005 (%)	2020 (Píxeles)	2020 (%)	Cambio (%)
1	≤ 0	1,153	0.43%	1,564	0.58%	+0.15
2	$0 - 0.2$	42,196	15.59%	28,986	10.73%	-4.86
3	$0.2 - 0.3$	130,324	48.14%	59,232	21.93%	-26.21
4	$0.3 - 0.4$	80,135	29.60%	109,006	40.36%	+10.76
5	$0.4 - 0.5$	16,479	6.09%	66,187	24.51%	+18.42
6	> 0.5	419	0.15%	5,092	1.88%	+1.73

Nota. Elaboración Propia.

Los resultados en la reclasificación se identifica la cobertura vegetal del área de estudio entre los años 2005 y 2020. En el año 2005 predominaban los valores de NDVI entre 0.2

y 0.3, los cuales representaban el 48.14% del territorio, asociados principalmente a coberturas agrícolas y vegetación de baja densidad.

Para el año 2020, este rango presentó una reducción considerable hasta **21.93 %**, mientras que aumentaron las categorías de vegetación media (**0.3–0.4**) con **40.36 %**, y vegetación media-alta (**0.4–0.5**) con **24.51 %**. Asimismo, la categoría de vegetación densa (**NDVI > 0.5**) pasó de **0.15 %** a **1.88 %**.

Estos cambios sugieren un incremento general en la actividad fotosintética del territorio; sin embargo, este comportamiento no necesariamente representa una recuperación ecológica integral. Parte del aumento puede estar relacionado con la **expansión agrícola tecnificada**, cultivos permanentes, pastos mejorados o vegetación secundaria, coberturas que presentan valores altos de NDVI pero no equivalen funcionalmente a ecosistemas naturales conservados.

En sectores periurbanos de los municipios de Cota, Tenjo y Tabio, la disminución de coberturas intermedias también puede estar asociada a procesos de transformación urbana dispersa, parcelación rural y cambios en la ocupación del suelo, donde áreas agrícolas tradicionales son reemplazadas por usos residenciales, industriales o comerciales.

Por otra parte, el incremento localizado de valores altos de NDVI en zonas montañosas y de difícil acceso podría relacionarse con procesos de regeneración natural, menor presión antrópica o conservación de remanentes de vegetación nativa.

Los resultados indican que el paisaje no perdió completamente su cobertura vegetal, pero sí experimentó una reconfiguración funcional, donde aumentó la presencia de vegetación asociada a usos productivos o secundarios, mientras disminuyeron coberturas intermedias tradicionales. Este comportamiento refuerza la necesidad de complementar el NDVI con métricas de fragmentación del paisaje, ya que un mayor verdor no implica necesariamente mayor conectividad ecológica ni mejor calidad ambiental.

6.3 Fragmentación del paisaje

Para evaluar los cambios en la estructura espacial de las coberturas naturales, se calcularon métricas de fragmentación del paisaje, incluyendo el tamaño medio de parche (MPS), la densidad de parches (PD), la densidad de bordes (ED) y la distancia media al vecino más cercano (ENN). Estas métricas permiten caracterizar la configuración espacial del paisaje y son ampliamente utilizadas para analizar procesos de fragmentación y conectividad ecológica.

El MPS fue seleccionado para evaluar el tamaño promedio de los fragmentos de cobertura natural, siendo un indicador directo del grado de subdivisión del paisaje. Por su parte, la PD permite cuantificar la cantidad de parches presentes en una unidad de área, lo que facilita la identificación de procesos de fragmentación. La métrica ED fue utilizada para analizar la complejidad de los bordes entre coberturas, mientras que el ENN constituye un indicador clave de conectividad estructural, ya que mide la distancia entre parches y permite inferir el nivel de aislamiento que enfrentan las especies para desplazarse en el territorio.

Los resultados evidencian cambios significativos en la estructura del paisaje entre 2005 y 2020 (Tabla 4). El tamaño medio de parche (MPS) presentó una disminución marcada, pasando de aproximadamente 6.09 ha en 2005 a valores cercanos a 0.012 ha en 2020, lo que indica una reducción considerable en la continuidad de las coberturas naturales y un aumento en su fragmentación.

La densidad de parches (PD) mostró un incremento de 0.0016 a valores entre 0.039 y 0.076 parches por cada 100 ha, lo que refleja un aumento en el número de fragmentos dentro del paisaje. Este patrón de áreas previamente continuas fue subdividido en unidades más pequeñas.

En conectividad, la distancia media al vecino más cercano (ENN) aumentó en 2020, alcanzando valores entre 133 y 145 metros, con un mayor aislamiento entre parches de cobertura natural. Este incremento es una disminución en la conectividad estructural del paisaje, logrando limitar el desplazamiento de especies y afectar los procesos ecológicos.

La densidad de bordes (ED) presentó un ligero incremento hacia 2020 (hasta 5.85 m/ha), con un aumento moderado en la complejidad de los límites entre coberturas.

Los patrones observados en la fragmentación del paisaje reflejan procesos de intervención antrópica que han modificado la continuidad de la cobertura vegetal, generando áreas más fragmentadas y con menor conectividad.

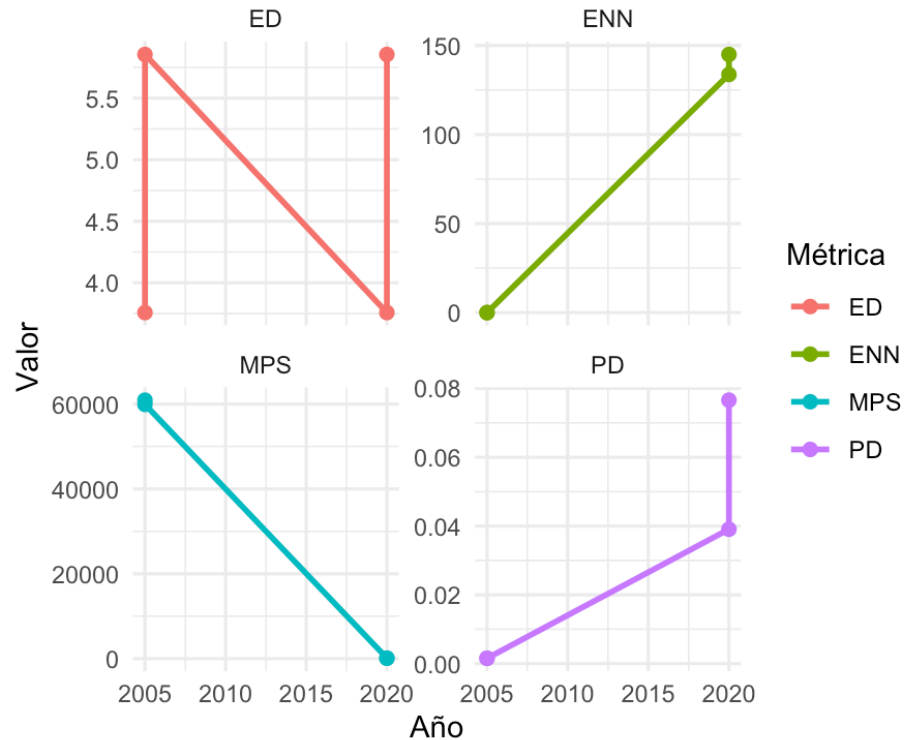
Tabla 4. Métricas de fragmentación del paisaje para 2005 y 2020

Métrica	2005	2020	Tendencia	Interpretación
MPS (ha)	6.09	0.012	↓↓↓	Disminución fuerte del tamaño de los parches (mayor fragmentación)
PD (parches/100 ha)	0.0016	0.039 – 0.076	↑↑	Aumento en el número de fragmentos
ED (m/ha)	3.76	5.85	↑	Incremento en la complejidad de bordes
ENN (m)	—	133 – 145	↑	Mayor aislamiento entre parches (menor conectividad)

Nota. El símbolo (—) indica valores no disponibles para 2005 debido al bajo número de parches.

Elaboración Propia.

Ilustración 6. Tendencia temporal de las métricas de fragmentación del paisaje (2005–2020)



Nota. Elaboración propia a partir de procesamiento en RStudio.

El análisis integrado entre las métricas de fragmentación del paisaje y el índice de vegetación (NDVI) permite comprender de manera sistémica los cambios ocurridos en la estructura y composición del territorio entre 2005 y 2020. En este sentido, los resultados evidencian un proceso de transformación del paisaje coherente con las dinámicas de cambio de uso del suelo descritas en la literatura, donde la expansión de actividades antrópicas genera modificaciones en la cobertura, configuración espacial y funcionalidad ecológica del territorio.

Las métricas de fragmentación muestran una disminución del tamaño medio de los parches (MPS), un aumento en la densidad de parches (PD) y un incremento en la distancia al vecino más cercano (ENN), lo que indica que las coberturas naturales han sido subdivididas en unidades más pequeñas y aisladas. Este comportamiento es consistente con lo planteado por Richard T. T. Forman, quien señala que la fragmentación implica la pérdida de continuidad del paisaje y la alteración de su estructura ecológica, también Lenore Fahrig establece que la reducción del tamaño de los parches y el aumento en su número generan efectos negativos sobre la biodiversidad, especialmente en especies que requieren hábitats extensos o condiciones ambientales estables.

La reducción del tamaño medio de los parches es una menor disponibilidad de hábitat continuo para numerosas especies de flora y fauna, como una menor capacidad de los ecosistemas para mantener poblaciones viables en el largo plazo. Los fragmentos pequeños suelen presentar mayor vulnerabilidad frente a perturbaciones externas, menor diversidad biológica y una capacidad reducida para sostener procesos ecológicos esenciales. Por ello, la disminución del MPS observada en el área de estudio sugiere un deterioro progresivo en la integridad ecológica del paisaje.

La conectividad, el incremento en la distancia al vecino más cercano (ENN) evidencia un mayor aislamiento entre fragmentos de cobertura natural, lo que refleja una disminución en la conectividad estructural del paisaje. Este resultado se relaciona con lo expuesto por Simon A. Levin, quien destaca que la conectividad es fundamental para la resiliencia de los ecosistemas, ya que permite la movilidad de especies, el intercambio genético y la continuidad de procesos ecológicos esenciales. Por lo que, el aumento del aislamiento es de mayores barreras para el desplazamiento de organismos y una reducción en la capacidad adaptativa del sistema frente a perturbaciones ambientales.

En el territoriales, este patrón puede interpretarse como una interrupción progresiva de corredores ecológicos locales entre áreas rurales, relictos de vegetación y zonas estratégicas de valor ambiental presentes en los municipios de Cota, Tenjo y Tabio. La pérdida de conectividad no solo afecta la biodiversidad, sino también procesos asociados a regulación hídrica, captura de carbono y estabilidad del paisaje.

También, el aumento en la densidad de bordes (ED) indica una mayor interacción entre coberturas naturales y áreas transformadas. Este fenómeno genera efectos de borde, entendidos como cambios en las condiciones microclimáticas, mayor exposición al viento y a la radiación solar, alteraciones en humedad y temperatura, así como una mayor probabilidad de ingreso de especies oportunistas o invasoras. En consecuencia, aunque permanezcan áreas con vegetación, la calidad ecológica del hábitat puede verse reducida significativamente.

Al contrastar estos resultados con el comportamiento del NDVI, se observa que en algunos sectores los valores del índice aumentan, por lo que podría ser inicialmente como una mejora en la cobertura vegetal. Sin embargo, este incremento no necesariamente implica una recuperación ecológica del paisaje. De acuerdo con Foley et al. (2005), coberturas antrópicas como cultivos, pastos o vegetación secundaria pueden presentar altos niveles de actividad fotosintética sin representar ecosistemas funcionales equivalentes a las coberturas naturales originales.

Entonces, el aumento del NDVI estaría reflejando procesos de intensificación del uso del suelo o sustitución de coberturas naturales por vegetación de origen antrópico, más que una restauración ecológica real. Esto evidencia que el territorio no ha perdido completamente su cobertura vegetal, sino que ha experimentado una reorganización

estructural del paisaje, caracterizada por la persistencia de vegetación bajo condiciones de menor continuidad ecológica.

Los resultados obtenidos confirman que los cambios en el uso del suelo no solo implican transformaciones espaciales visibles, sino también alteraciones profundas en la funcionalidad ecológica del territorio. Este comportamiento es particularmente relevante en la Sabana de Bogotá, donde la presión urbana, industrial y agropecuaria ha generado patrones de fragmentación que comprometen la sostenibilidad ambiental y la provisión de servicios ecosistémicos estratégicos.

Para la planificación territorial municipal, estos resultados constituyen una base técnica relevante para la actualización de los instrumentos de ordenamiento territorial de Cota, Tenjo y Tabio. La identificación de zonas críticas de fragmentación permite priorizar áreas para conservación, restauración ecológica, establecimiento de corredores biológicos y control de la expansión urbana dispersa. Asimismo, facilita la toma de decisiones orientadas a armonizar el desarrollo económico con la protección de la estructura ecológica regional.

Por lo tanto, la fragmentación del paisaje se consolida como el hallazgo central del estudio, evidenciando que el aumento de la cobertura vegetal observado mediante el NDVI no necesariamente representa una mejora ecológica, sino una transformación hacia sistemas más intervenidos y menos funcionales ecológicamente. Este resultado resalta la importancia de complementar los índices espectrales con métricas de paisaje, con el fin de lograr interpretaciones más precisas e integrales de los cambios territoriales.

Con el propósito de profundizar en la comprensión de las relaciones causales entre las dinámicas antrópicas y los cambios observados en el territorio, se implementa el modelo DPSIR, el cual permite vincular las métricas de fragmentación con los factores socioeconómicos que las originan, sus impactos ecológicos y las posibles respuestas de gestión, aportando así una visión integral del sistema territorial.

6.4 Modelo DPSIR

El modelo DPSIR (Drivers–Pressures–State–Impact–Response) se implementa como una herramienta conceptual que permite analizar de manera integral las relaciones entre las dinámicas antrópicas y los cambios observados en la estructura del paisaje.

Las fuerzas motrices (Drivers) identificadas en el área de estudio están asociadas a la expansión de actividades agrícolas, el crecimiento urbano y las dinámicas económicas locales. Estos procesos responden a la necesidad de aprovechamiento del suelo para actividades productivas y de ocupación del territorio, generando una presión constante sobre las coberturas naturales, mostrando dinámicas en la distribución de coberturas,

donde las categorías agrícolas y antrópicas presentan una alta representatividad en comparación con las coberturas naturales.

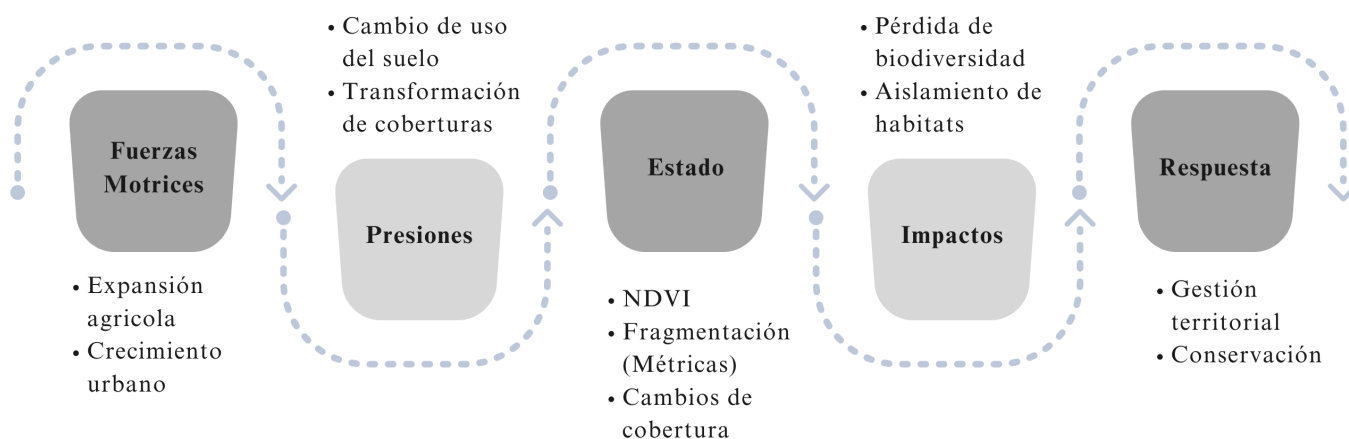
Las presiones (Pressures) se presentan principalmente en el cambio de uso del suelo, caracterizado por la conversión de coberturas naturales en áreas agrícolas y antrópicas. Este proceso implica la reducción de hábitats naturales y la alteración de su configuración espacial, contribuyendo directamente a la fragmentación del paisaje.

El estado (State) del sistema evidencia cambios significativos en la estructura espacial de las coberturas naturales entre 2005 y 2020. Se observa una disminución en el tamaño medio de parche (MPS), un aumento en la densidad de parches (PD) y un incremento en la distancia al vecino más cercano (ENN), lo que indica un proceso de fragmentación caracterizado por la subdivisión de áreas naturales y el aumento de su aislamiento. Aunque los valores de NDVI indican presencia de cobertura vegetal, estos no necesariamente reflejan una mejora en la calidad ecológica del paisaje, ya que pueden estar asociados a coberturas de tipo agrícola o intervenido.

Los impactos (Impacts) incluyen la reducción de la conectividad ecológica, la afectación de la biodiversidad y la alteración de procesos ecológicos fundamentales como la dispersión de especies y el flujo genético. Estos impactos comprometen la funcionalidad del paisaje y la provisión de servicios ecosistémicos.

Finalmente, las respuestas (Responses) se orientan hacia la implementación de estrategias de gestión territorial enfocadas en la conservación y restauración del paisaje. Entre estas se destacan la incorporación de criterios de conectividad ecológica en los instrumentos de ordenamiento territorial, el establecimiento de corredores biológicos y la planificación del uso del suelo con enfoque sistémico, con el fin de mitigar los efectos de la fragmentación y favorecer la recuperación de la funcionalidad ecológica del territorio.

Ilustración 7. Modelo DPSIR aplicado al análisis de cambios en el uso del suelo en Cota, Tenjo y Tabio (2005–2020)



Nota. Elaboración Propia.

6.5 Enfoque SETS (Social–Ecological–Technological Systems)

El enfoque de Sistemas Socioecológicos y Tecnológicos (SETS) se integra de forma complementaria al modelo DPSIR, con el propósito de formar relaciones entre los componentes sociales, ecológicos y tecnológicos que intervienen en la transformación del territorio. Este enfoque permite comprender el sistema de manera holística, superando análisis lineales y facilitando la interpretación de las dinámicas territoriales desde una perspectiva sistémica.

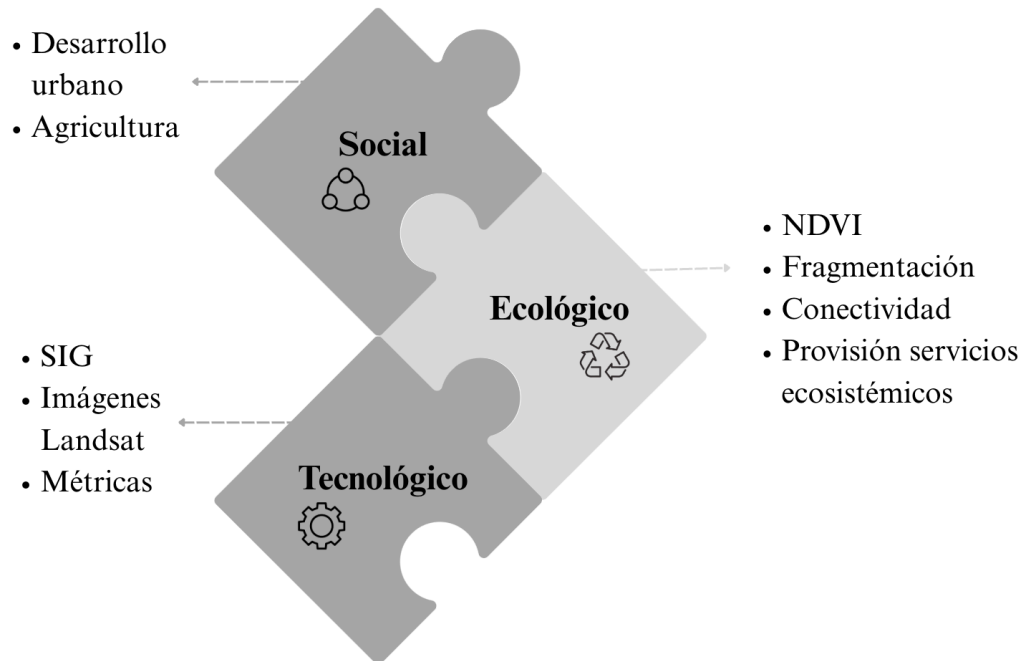
El sistema social está representado por las dinámicas de crecimiento urbano, la expansión de actividades agrícolas y las condiciones económicas locales, las cuales actúan como fuerzas motrices que generan presión sobre el uso del suelo. Estas dinámicas, previamente identificadas en el modelo DPSIR, constituyen el principal factor de transformación del paisaje en los municipios de Cota, Tenjo y Tabio.

El sistema ecológico corresponde a la estructura y funcionalidad del paisaje, evidenciada a través de los resultados obtenidos en el análisis de fragmentación y del índice NDVI. Los cambios observados, como la disminución del tamaño de los parches, el aumento en su número y el incremento en su aislamiento, reflejan un proceso de fragmentación que afecta la conectividad ecológica y la capacidad del sistema para mantener sus funciones. El contraste entre el aumento del NDVI y la fragmentación del paisaje evidencia que la presencia de cobertura vegetal no implica necesariamente una mejora en la calidad ecológica del territorio.

Por su parte, el sistema tecnológico está conformado por las herramientas utilizadas en el análisis, incluyendo la teledetección mediante imágenes Landsat, los Sistemas de Información Geográfica (QGIS) y el análisis espacial en RStudio mediante métricas de paisaje. Estas herramientas permiten no solo identificar y cuantificar los cambios en el territorio, sino también generar información clave para la toma de decisiones en procesos de planificación y gestión ambiental.

La relación entre estos tres sistemas evidencia que las transformaciones del paisaje son el resultado de una relación compleja entre las actividades humanas, las respuestas del sistema ecológico y el uso de herramientas tecnológicas para su análisis. En este sentido, el enfoque SETS complementa el modelo DPSIR al permitir una visión sistémica del territorio, donde las dinámicas sociales generan presiones, estas se reflejan en cambios ecológicos y, a su vez, son analizadas mediante herramientas tecnológicas que facilitan la formulación de estrategias de gestión.

Ilustración 8. Enfoque SETS aplicado al análisis de cambios en el uso del suelo en Cota, Tenjo y Tabio (2005–2020)



Nota. Elaboración Propia.

En conjunto, los resultados obtenidos permiten evidenciar que los municipios de Cota, Tenjo y Tabio han experimentado un proceso significativo de transformación territorial entre 2005 y 2020, caracterizado por cambios en la cobertura del suelo y en la configuración espacial del paisaje. El análisis multitemporal mediante composiciones espectrales y el índice NDVI permitió identificar variaciones en la cobertura vegetal, mientras que las métricas de fragmentación evidenciaron una reducción en el tamaño de los parches, un aumento en su número y un mayor aislamiento entre ellos, indicando un proceso progresivo de fragmentación del paisaje.

Demostrando que, aunque en algunos sectores se presenta un incremento en los valores de vegetación, esto no necesariamente se traduce en una mejora de la calidad ecológica, ya que puede estar asociado a coberturas de origen antrópico. En este sentido, el territorio refleja una reorganización espacial donde la cobertura vegetal persiste, pero bajo condiciones de menor conectividad y funcionalidad ecológica.

El uso del modelo DPSIR permitió establecer relaciones causales entre las dinámicas sociales y económicas, las presiones ejercidas sobre el territorio y los cambios observados en el estado del paisaje, así como sus impactos ecológicos y posibles respuestas de gestión. Complementariamente, el enfoque SETS facilitó una comprensión sistémica de estas transformaciones, evidenciando la interacción entre los sistemas social, ecológico y tecnológico en la configuración del territorio.

De esta manera, el análisis integral desarrollado en este capítulo permitió concluir que la fragmentación del paisaje constituye el principal efecto del cambio de uso del suelo en el área de estudio, con implicaciones directas sobre la conectividad ecológica, la biodiversidad y la provisión de servicios ecosistémicos. Estos resultados aportan insumos técnicos relevantes para la planificación y el ordenamiento territorial, destacando la necesidad de implementar estrategias orientadas a la conservación, restauración y gestión sostenible del paisaje.

Si bien los resultados obtenidos permitieron identificar tendencias relevantes en el cambio de uso del suelo y la fragmentación del paisaje entre 2005 y 2020, es necesario reconocer algunas limitaciones metodológicas asociadas a las fuentes de información empleadas.

En primer lugar, las imágenes Landsat utilizadas presentan una resolución espacial de 30 m, adecuada para análisis regionales y comparaciones multitemporales; sin embargo, esta resolución puede limitar la detección de elementos de pequeña escala, tales como fragmentos reducidos de vegetación, corredores ecológicos estrechos o cambios localizados en áreas urbanas y rurales.

En segundo lugar, la cartografía derivada de la metodología CORINE Land Cover constituye una herramienta estandarizada ampliamente utilizada en estudios territoriales. No obstante, su nivel de generalización temática puede simplificar dinámicas locales complejas, especialmente en zonas donde coexisten mosaicos de usos agrícolas, vegetación secundaria y expansión periurbana.

El índice NDVI corresponde a una medida indirecta del vigor fotosintético de la vegetación, razón por la cual su interpretación debe realizarse con cautela. Valores elevados no necesariamente representan ecosistemas naturales conservados, ya que también pueden asociarse con cultivos, pastizales o coberturas vegetales de origen antrópico. Entonces, los resultados del presente estudio deben interpretarse como una aproximación robusta al comportamiento territorial del área analizada, susceptible de fortalecerse en investigaciones futuras mediante imágenes de mayor resolución espacial, validación en campo y análisis multitemporales de mayor detalle.

7. CONCLUSIONES

La cobertura vegetal en los municipios de Cota, Tenjo y Tabio presentó una dinámica de incremento en los valores del índice NDVI entre 2005 y 2020, lo que indica un aumento en la actividad fotosintética en determinados sectores del territorio. Sin embargo, este comportamiento no representa necesariamente una recuperación ecológica, ya que dichos incrementos se asocian principalmente a coberturas de origen antrópico, como cultivos, pastos y vegetación secundaria. Por lo que, la vegetación más afectada corresponde a las coberturas naturales, las cuales han sido transformadas o sustituidas, evidenciando una pérdida en la calidad ecológica a pesar del aumento aparente en biomasa.

El análisis de las métricas de fragmentación del paisaje evidenció un proceso progresivo de deterioro en la estructura ecológica del territorio. La disminución significativa del tamaño medio de los parches (MPS), el incremento en la densidad de parches (PD) y el aumento en la distancia al vecino más cercano (ENN) confirman que los ecosistemas en los municipios de estudio están experimentando un proceso de fragmentación que compromete la conectividad ecológica. Estos resultados demuestran que, a pesar del aumento en los índices de vegetación densa y/o saludable, el paisaje se encuentra cada vez más subdividido y aislado, lo que afecta negativamente la biodiversidad y los procesos ecológicos.

La integración del análisis del NDVI con las métricas de fragmentación permitió identificar que el territorio no ha perdido completamente su cobertura vegetal, sino que ha experimentado una reorganización estructural del paisaje. Este proceso se caracteriza por la persistencia de vegetación en condiciones de menor continuidad y conectividad ecológica. Este hallazgo resalta la importancia de complementar índices espectrales con métricas espaciales para obtener una interpretación más precisa de los cambios en el uso del suelo.

Los resultados obtenidos constituyen un insumo técnico relevante para los procesos de planificación y ordenamiento territorial en los municipios de Cota, Tenjo y Tabio en donde permiten identificar zonas críticas donde la conectividad ecológica se encuentra comprometida, así como áreas con potencial de conservación y restauración. En este sentido, la información generada puede servir como base para la actualización de los instrumentos de ordenamiento territorial, orientando la delimitación de áreas de protección, la implementación de corredores ecológicos y la formulación de estrategias de uso sostenible del suelo.

Finalmente, la aplicación del modelo DPSIR permitió comprender las relaciones causales entre las dinámicas socioeconómicas, las presiones sobre el territorio y los impactos observados en la estructura del paisaje, evidenciando que la fragmentación constituye uno de los principales efectos del cambio de uso del suelo. De manera complementaria, el enfoque SETS aportó una visión integral al analizar la interacción entre los sistemas

sociales, ecológicos y tecnológicos, fortaleciendo la interpretación de los resultados y su aplicación en la gestión territorial.

8. REFERENCIAS

- AHVENNIEMI, Hanni, et al. What are the differences between sustainable and smart cities? En: Cities. Vol. 60 (2017); p. 234–245.
- ALBUT, D. Land use land change utilizing the QGIS MOLUSCE plugin. 2024.
- ALCALDÍA DE COTA. Plan de Desarrollo Municipal 2020-2023 “Cota que soñamos”. Cota: La Alcaldía, 2020.
- ALCALDÍA DE TABIO. Plan de Desarrollo Municipal 2020-2023 “Tabio, unidos con sentido”. Tabio: La Alcaldía, 2020.
- ALCALDÍA DE TENJO. Plan de Desarrollo Municipal 2020-2023 “Tenjo, nuestra casa común”. Tenjo: La Alcaldía, 2020.
- ALCALDÍA MUNICIPAL DE COTA. Información del municipio: Geografía y distancia a Bogotá. [en línea]. 2019. [Fecha de consulta: 12 de octubre de 2025]. Disponible en: <https://www.cotacundinamarca.gov.co/MiMunicipio/Paginas/Informacion-del-Municipio.aspx>.
- ANGEL, S., et al. Atlas of urban expansion. Cambridge: Lincoln Institute of Land Policy, 2016.
- ASTRÁGALO. Transformaciones urbanas y ecosistémicas en la Sabana de Bogotá. 2010.
- BURROUGH, P. A. y MCDONNELL, R. A. Principles of geographical information systems. Oxford: Oxford University Press, 1998.
- CAR. Diagnóstico ambiental de la Sabana de Bogotá y municipios circundantes. Bogotá: Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, 2020.
- CAR. Memoria Justificativa: Lineamientos para el ordenamiento ambiental de la Sabana de Bogotá. Bogotá: Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, 2021.
- CAR. Informe del estado del ambiente y de los recursos naturales renovables en la jurisdicción de la CAR. [en línea]. 2021. [Fecha de consulta: 8 de octubre de 2025]. Disponible en: <https://www.car.gov.co/vercontenido/193>.
- CEPAL. Expansión urbana y sostenibilidad en América Latina y el Caribe. [en línea]. Santiago de Chile: Comisión Económica para América Latina y el

- Caribe, 2012. [Fecha de consulta: 10 de octubre de 2025]. Disponible en: <https://repositorio.cepal.org>.
- CODAZZI-IGAC, I. G. A. Colombia en mapas. [en línea]. 2025. [Fecha de consulta: 31 de octubre de 2025]. Disponible en: <https://www.colombiaenmapas.gov.co/?u=0&t=29>.
- COSTANZA, Robert, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital. En: *Nature*. Vol. 387, no. 6630 (1997); p. 253–260.
- DAILY, G. C. (Ed.). *Nature's services: Societal dependence on natural ecosystems*. Washington D.C.: Island Press, 1997.
- DATOS SABANA CENTRO. Datos Sabana Centro: Tenjo. [en línea]. 2020. [Fecha de consulta: 10 de octubre de 2025]. Disponible en: <https://sabanacentrocomovamos.org/main-tenjo/>.
- ELEUTÉRIO, J., et al. *Uso de SIG en la gestión ambiental y territorial*. 2011.
- FAHRIG, L. Effects of habitat fragmentation on biodiversity. En: *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*. Vol. 34 (2003); p. 487–515.
- FOLEY, J. A., et al. Global consequences of land use. En: *Science*. Vol. 309, no. 5734 (2005); p. 570–574.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). *State of the World's Forests 2016: Forests and agriculture – Land use challenges and opportunities*. Roma: FAO, 2016.
- FORMAN, R. T. T. *Land mosaics: The ecology of landscapes and regions*. Cambridge: Cambridge University Press, 1995.
- GABRIELSEN, P. y BOSCH, P. *Environmental indicators: Typology and use in reporting*. Copenhagen: European Environment Agency, 2003.
- GOBERNACIÓN DE CUNDINAMARCA. *Infraestructura de Datos Espaciales Regional (IDER)*. [en línea]. 2026. [Fecha de consulta: 23 de abril de 2026]. Disponible en: <https://ider.cundinamarca.gov.co/search?collection=dataset&layout=grid&q=Cota>.
- GOODCHILD, M. F. Citizens as sensors: The world of volunteered geography. En: *GeoJournal*. Vol. 69, no. 4 (2007); p. 211–221.

- HADDAD, N. M., et al. Habitat fragmentation and its lasting impact on Earth's ecosystems. En: Science Advances. Vol. 1, no. 2 (2015); p. e1500052.
- HESSELBARTH, M. H. K., et al. LandscapeMetrics: una herramienta R de código abierto para calcular métricas de paisaje. En: Ecography. Vol. 42 (2019); p. 1648-1657.
- HIJMANS, R. J. terra: Spatial data analysis (R package). [en línea]. 2023. Disponible en: <https://cran.r-project.org/package=terra>.
- HISTORIA MUNICIPIO DE COTA/TABIO/TENJO. Datos abiertos. [en línea]. 2019. [Fecha de consulta: 23 de abril de 2026]. Disponible en: <https://www.datos.gov.co/stories/en/s/Historia-Municipio-de-Tabio/3cu5-ixph/>.
- HUMACATA, L. Evaluación de servicios ecosistémicos frente al cambio de uso del suelo en la Sabana de Bogotá. Tesis de Maestría. Bogotá, 2017.
- IDEAM. Informe nacional del estado del recurso suelo. Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2018.
- IDEAM. Estudio Nacional del Agua 2018. Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2018.
- LAMBIN, E. F., GEIST, H. J. y LEPPERS, E. The causes of land-use and land-cover change: Moving beyond the myths. En: Global Environmental Change. Vol. 11, no. 4 (2001); p. 261–269.
- LAURANCE, S. G. W. An Amazonian rainforest and its fragments as a laboratory of global change. En: Biological Reviews. Vol. 93, no. 1 (2018); p. 223–247.
- MAASS, J. M., et al. Ecosystem services of tropical dry forests: insights from long-term ecological and social research on the Pacific Coast of Mexico. En: Ecology and Society. Vol. 10, no. 1 (2005); p. 17.
- MARKOLF, S. A., et al. Interdependent infrastructure as linked social, ecological, and technological systems (SETSs) to address lock-in and enhance resilience. En: Earth's Future. Vol. 6, no. 12 (2018); p. 1638–1659.
- MCGARIGAL, K., CUSHMAN, S. A. y ENE, E. FRAGSTATS v4: Spatial pattern analysis program for categorical maps. Amherst: University of Massachusetts, 2012.

MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT (MEA). Ecosystems and Human Well-being: a Framework for Assessment. Washington D.C.: Island Press, 2003.

MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Estudio técnico de soporte: Lineamientos para el ordenamiento ambiental de la Sabana de Bogotá. Bogotá: MinAmbiente, 2025.

TSCHERNING, K., et al. Does research applying the DPSIR framework support decision making? En: Land Use Policy. Vol. 29, no. 1 (2012); p. 102–110.

TURNER, B. L., LAMBIN, E. F. y REENBERG, A. The emergence of land change science for global environmental change and sustainability. En: Proceedings of the National Academy of Sciences. Vol. 104, no. 52 (2007); p. 20666–20671.

TURNER, M. G., GARDNER, R. H. y O'NEILL, R. V. Landscape ecology in theory and practice. Nueva York: Springer, 2001.

VERBURG, P. H., NEUMANN, K. y NOL, L. Challenges in using land use and land cover data for global change studies. En: Global Change Biology. Vol. 17, no. 2 (2011); p. 974–989.