



Análisis de los cambios en la cobertura del suelo y fragmentación del paisaje en la cuenca de Rio Grandes, Antioquia (2000 – 2020).

Manuela Tamayo Madrigal

Monografía presentada para optar al título de Especialista en Medio Ambiente y Geoinformática

Asesora

Alba Lucia Marín Valencia,

MSc. Áreas Silvestres y Conservación de la Naturaleza

Ingeniera forestal.

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Especialización en Medio Ambiente y Geoinformática

Medellín, Antioquia, Colombia

2024

Cita

(Tamayo Madrigal, 2024)

Referencia

Estilo APA 7 (2020)

Tamayo Madrigal, M. (2024). *Análisis de los cambios en la cobertura del suelo y la fragmentación del paisaje en la cuenca de Rio Grandes, Antioquia (2000 – 2020)* [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.



Seleccione posgrado UdeA (A-Z), Cohorte XIX.



Centro de Documentación de Ingeniería
(CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

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

Tabla de contenido

Abstract	7
1. Introducción	8
2. Planteamiento del problema	10
3. Objetivos	11
2.1. Objetivo general	11
2.2. Objetivos específicos.....	11
4. Marco teórico	12
5. Materiales y Métodos	13
5.1. Área de estudio	13
5.2. Métodos	15
5.2.1. Obtención y clasificación de los datos de cobertura del suelo.....	15
5.2.2. Reclasificación y análisis de las coberturas del suelo.....	16
5.2.3. Análisis de métricas del paisaje	18
6. Resultados	20
6.1. Cambios en las Coberturas del Suelo	20
6.2. Análisis de la Fragmentación de la cuenca de Rio Grande	25
7. Conclusiones	30
Referencias	31

Lista de tablas

Tabla 1. Reclasificación de categorías de la metodología Corine Land Cover (Ideam).	16
Tabla 2. Métricas utilizadas para analizar la fragmentación en la cuenca de Rio Grande. ... ¡Error! Marcador no definido.	
Tabla 3. Resultados Cambios de las coberturas del suelo, cuenca de Rio Grande.	21
Tabla 4. Tasa de cambio en porcentaje de coberturas dominantes en la Cuenca de Rio Grande. .	22
Tabla 5. Tasa de cambio en porcentaje del Número de Parches de las Coberturas Dominantes...25	
Tabla 6. Métricas del paisaje para los años 2000, 2010 y 2020, de las coberturas del suelo de la cuenca Rio Grande.	26

Lista de Ilustraciones

Ilustración 1. Mapa de ubicación cuenca de Rio Grande, Antioquia.....	14
Ilustración 2. Gráfico de superficie total de las coberturas de la cuenca de Rio Grande.....	21
Ilustración 3. Mapa de coberturas del suelo cuenca de Rio Grande, años A) 2000, B) 2010 y C) 2020.....	24
Ilustración 4. Áreas promedio en hectáreas de las clases de coberturas dominantes. (2000 - 2020).....	27
Ilustración 5. Tasa de cambio IA, para las coberturas cultivo, pastos y bosque.....	28
Ilustración 6. Tasa de cambio SPLIT, para las coberturas cultivos, pastos y bosque.....	28

Resumen

Este estudio cuantificó los cambios en la cobertura del suelo atribuibles a actividades antropogénicas y su impacto en la configuración del paisaje en la cuenca del río Grande, Antioquia, durante el periodo 2000-2020. Para ello, se utilizaron tres capas oficiales, descargadas del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de cobertura del suelo generadas a través de sistemas de teledetección, las cuales se analizaron mediante sistemas de información geográfica empleando el software ArcGIS Pro. Adicionalmente, se calcularon métricas de paisaje seleccionadas con base en la literatura científica, utilizando el software Fragstats 4.2, para evaluar los procesos de fragmentación.

Los resultados del análisis evidencian que, durante los 20 años de estudio, las actividades económicas de la región definieron una predominancia de la cobertura de pastos como uso del suelo principal. Asimismo, se observó que los cultivos presentan mayores niveles de fragmentación, caracterizados por un incremento en el número de parches, especialmente en municipios como Entreríos y Don Matías. Las métricas estimadas revelaron un incremento en la fragmentación de los sistemas naturales, reflejado en un aumento en el número de parches, siendo más significativo en áreas antrópicas. Esto sugiere una presión creciente sobre las áreas naturales, comprometiendo su integridad ecológica y los servicios ecosistémicos asociados.

Palabras clave: Fragmentación, coberturas del suelo, Fragstats 4.2., Cuenca de Rio Grande

Abstract

This study quantified changes in land cover attributable to anthropogenic activities and their impact on the landscape configuration in the Río Grande basin, Antioquia, during the period 2000–2020. For this purpose, three official land cover layers generated through remote sensing were analyzed using geographic information systems with the software ArcGIS Pro. Additionally, landscape metrics selected based on relevant scientific literature were calculated using Fragstats 4.2 software to evaluate fragmentation processes.

The analysis results show that, over the 20 years studied, the region's economic activities defined grassland cover as the predominant land use. Furthermore, it was observed that crops exhibit higher levels of fragmentation, characterized by an increase in the number of patches, particularly in municipalities such as Entreríos and Don Matías. The estimated metrics revealed an increase in the fragmentation of natural systems, reflected in a rise in the number of patches, with a more significant impact in anthropogenic areas. This suggests growing pressure on natural areas, compromising their ecological integrity and the associated ecosystem services.

Keywords: Fragmentation, Land cover, Fragstats 4.2, Río Grande Basin

1. Introducción

La fragmentación del paisaje es un proceso ecológico que divide áreas continuas de hábitat en parches aislados, afectando la conectividad entre ecosistemas y generando consecuencias graves para la biodiversidad y los servicios ecosistémicos (Wilcove, 1986) (Suescún, y otros, 2017). Este fenómeno, impulsado principalmente por actividades humanas como la expansión urbana y la agricultura intensiva, ha adquirido relevancia debido a sus impactos en la biodiversidad, el funcionamiento ecológico y la provisión de servicios ecosistémicos (Fahrig, 2003) (Leija & Mendoza, 2021). Entre sus efectos destacan la pérdida de especies, la alteración de ciclos naturales y la disminución de la resiliencia de los ecosistemas frente a eventos extremos (Bian, Chen, & Zeng, 2023).

En muchos territorios, como en los ecosistemas de montaña, los cambios en la cobertura han reducido la capacidad de los ecosistemas para proporcionar servicios esenciales, como la regulación hídrica y la protección del suelo (Berrío Giraldo, Villegas Palacio, & Arango Aramburo, 2021) (Berrío Giraldo L. I., 2020). Este problema es particularmente crítico en áreas de alto valor ecológico donde la pérdida de coberturas de suelo como bosques, puede comprometer la sostenibilidad y el equilibrio ecológico (Nagendra, Reyers, & Lavorel, 2013). Sin embargo, la evaluación y cuantificación de estos efectos requieren métodos específicos que permitan un análisis detallado de la configuración espacial y temporal de la fragmentación (Fahrig, 2003).

Este estudio tiene como objetivo analizar cuantitativamente la fragmentación del paisaje en la cuenca del río Grande a partir de los cambios en las coberturas del suelo, utilizando métricas que permitan evaluar las transformaciones en su configuración durante veinte años.

Para el análisis de la fragmentación se empleará el software Fragstats v4.2, una herramienta ampliamente utilizada en la ecología del paisaje para estudiar la configuración y cohesión de los paisajes (McGarigal, Cushman, Neel, & Ene, 2002). Este software permite relacionar la estructura del paisaje y sus dinámicas territoriales, proporcionando métricas clave para analizar cómo la fragmentación afecta a los ecosistemas.

La metodología incluye la selección de coberturas clasificadas de la zona de estudio, representativas de tres momentos diferentes, para identificar los cambios en las coberturas del suelo en cada periodo. Tras la selección, los datos serán procesados y se calcularán las métricas del paisaje, permitiendo un análisis de la fragmentación y sus cambios a lo largo del tiempo.

Los resultados de esta investigación servirán como soporte para la toma de decisiones en gestión y planificación territorial, fortaleciendo instrumentos como los planes de ordenamiento y manejo de cuencas hidrográficas.

2 . Planteamiento del problema

Las actividades antropogénicas han provocado cambios significativos, especialmente durante el último siglo, en la superficie de la tierra (Hansen, y otros, 2013). El cambio en la cobertura del suelo se considera uno de los principales factores asociados al cambio ambiental global (López, López-Sandoval, & Jung, 2021). Estas transformaciones son cruciales, ya que las propiedades de la superficie terrestre influyen en el equilibrio de los ecosistemas (Bonan, 2008). El cambio en la cobertura del suelo impacta en procesos físicos y biogeoquímicos, alterando estos equilibrios, por lo que, afecta directamente la disponibilidad de los bienes y servicios ecosistémicos (Broxton, Zeng, Sulla-Menashe, & Troch, 2014) (Mahmood, y otros, 2014).

Uno de los efectos colaterales de la alteración en la cobertura del suelo es la fragmentación del paisaje, una problemática de alta relevancia ecológica que limita el flujo genético entre las especies e interfiere con oferta de servicios ecosistémicos (Wilcove, 1986). A pesar de que se han realizado esfuerzos en algunas partes del mundo por incrementar la cobertura forestal, esto no se ha traducido necesariamente en una menor fragmentación; al contrario, la proliferación de bordes y la división de los bosques en parches pequeños y aislados sigue siendo un desafío ambiental a nivel global (Ma, Li, Wu, & Liu, 2022).

La fragmentación del paisaje es una problemática ambiental crítica que afecta de manera profunda la funcionalidad y sostenibilidad de los ecosistemas (Murunga, Nyadawa, Sang, & Cheruiyot, 2024), especialmente en regiones de alto valor ecosistémico, como es el caso de la cuenca del Río Grande en los Andes Colombianos (Berrio Giraldo L. I., 2020) (Berrio Giraldo, Villegas Palacio, & Arango Aramburo, 2021).

Este proceso de fragmentación, impulsado en gran medida por la expansión de la frontera agrícola y el crecimiento urbano, fragmenta los hábitats naturales en parches cada vez más aislados, dificultando la conectividad y afectando la integridad de los ecosistemas (Robinson, y otros, 2012).

La cuenca del Río Grande, reconocida por su importancia en la provisión de servicios ecosistémicos, ha experimentado una transformación significativa en las coberturas del suelo, lo

cual amenaza su capacidad para sostener estos servicios como la regulación hídrica y control de la erosión en el largo plazo (Berrio Giraldo L. I., 2020).

En este sentido, el aislamiento de parches naturales, como el bosque, limita la movilidad de especies y reduce la biodiversidad, poniendo en riesgo los servicios ecosistémicos que dependen de un equilibrio ecológico robusto, como el suministro de agua y la protección contra la erosión (Mezgebu & Workineh, 2017) . Afectando, no solo a las comunidades de especies, sino que también exponen a las comunidades humanas a mayor vulnerabilidad ante eventos climáticos extremos (Berrouet, Villegas-Palacio, & Botero, 2019).

En este contexto, la fragmentación del paisaje puede conllevar a una disminución de la resiliencia ambiental de la cuenca, lo cual compromete el bienestar de las poblaciones locales y su economía (Muhammed & Elias, 2021). Por lo anterior, con este trabajo se pretende evaluar el cambio en las coberturas del suelo de la cuenca de río Grande en Antioquia, y con ello, analizar la fragmentación resultante de dichos cambios.

3. Objetivos

2.1. Objetivo general

Analizar el impacto espaciotemporal de los cambios de coberturas del suelo, en el paisaje de la cuenca del río Grande, Antioquia, el periodo comprendido entre los años 2000 y 2020.

2.2. Objetivos específicos

Evaluar los cambios en la cobertura del suelo en la cuenca del río Grande en Antioquia para los años 2000, 2010 y 2020.

Analizar la fragmentación de la cuenca del río Grande, Antioquia, para los años 2000, 2010 y 2020 mediante métricas del paisaje

4. Marco teórico

La ecología del paisaje, tienen sus comienzos en la geografía y ha evolucionado con el objetivo de dar una perspectiva integral de los ecosistemas, definiendo además el paisaje como una entidad espacio temporal, donde los componentes ecológicos y socioeconómicos moldean las dinámicas del uso de la tierra (Etter, 1991). Esta área de conocimiento se centró en el estudio de la estructura del paisaje, es decir, comprender su composición, la cual está dividida en tres partes (Etter, 1991).

El elemento dominante, representando el mayor porcentaje del paisaje, se conoce como la matriz. Por otro lado, los parches, configuraciones no lineales dentro de la matriz, exhiben características distintivas que los diferencian. Mientras tanto, los corredores, elementos lineales, pueden surgir de forma aislada o conectando otros elementos, como los parches (Etter, 1991).

Cada uno de estos elementos ejerce influencia en aspectos específicos del paisaje. La matriz, determinada por su cobertura, puede tanto facilitar como complicar la conectividad dentro del paisaje, afectando movimientos de energía, materiales ecológicos y organismos (Morlans, 2009). Por otro lado, los parches pueden albergar una amplia variedad de fauna, y su reducción en tamaño y cambio de forma debido a la actividad humana puede impactar negativamente a estas poblaciones. Sin conexiones a través de corredores, los parches pueden quedar aislados, lo que resulta en una disminución de las poblaciones e incluso su desaparición a nivel local (Morlans, 2009).

Este enfoque en la estructura del paisaje proporciona una herramienta valiosa para comparar mismo paisaje en distintos momentos, a través de diversas métricas y metodologías, se puede analizar y observar las variaciones en la composición y configuración del paisaje a lo largo del tiempo (Naseri & Mostafazadeh, 2023).

Por otro lado, la fragmentación del paisaje se define como la división de áreas grandes y continuas de cobertura terrestre en parches más pequeños y aislados, influenciada principalmente por actividades humanas, como la urbanización, la agricultura intensiva, y, en menor medida, por factores naturales (Ma, Li, Wu, & Liu, 2022). Este proceso afecta negativamente la biodiversidad y la funcionalidad ecológica al reducir el tamaño de los hábitats y limitar su conectividad,

impactando ciclos naturales como la regulación hídrica y la dinámica de nutrientes (Murunga, Nyadawa, Sang, & Cheruiyot, 2024).

Investigaciones recientes han destacado que la fragmentación compromete no solo la integridad de los hábitats, sino también la capacidad de los ecosistemas para proporcionar servicios esenciales, como la producción de agua limpia y la mitigación del cambio climático (Zhang, Li, & Li, 2023) . Además, estudios como los realizados en el norte de Shaanxi, China, demuestran una correlación negativa entre la fragmentación y el valor de los servicios ecosistémicos, evidenciando que, a medida que aumenta la fragmentación, disminuyen los beneficios tangibles e intangibles que los ecosistemas ofrecen a las comunidades humanas (Zhang, Li, & Li, 2023).

Este impacto es especialmente crítico en paisajes agrícolas, forestales y urbanos, donde la fragmentación genera tensiones en la sostenibilidad de los recursos naturales (De Groot, Alkemade, Braat, Hein, & Willemsen, 2010). Asimismo, afecta tanto los servicios de provisión como los de regulación, lo que repercute en las especies dependientes de estos hábitats y en las comunidades humanas que los utilizan para actividades económicas y culturales (Mitchell, y otros, 2015). Por lo tanto, abordar la configuración del paisaje requiere un enfoque multidisciplinario que considere tanto las implicaciones ambientales como las socioeconómicas.

5. Materiales y Métodos

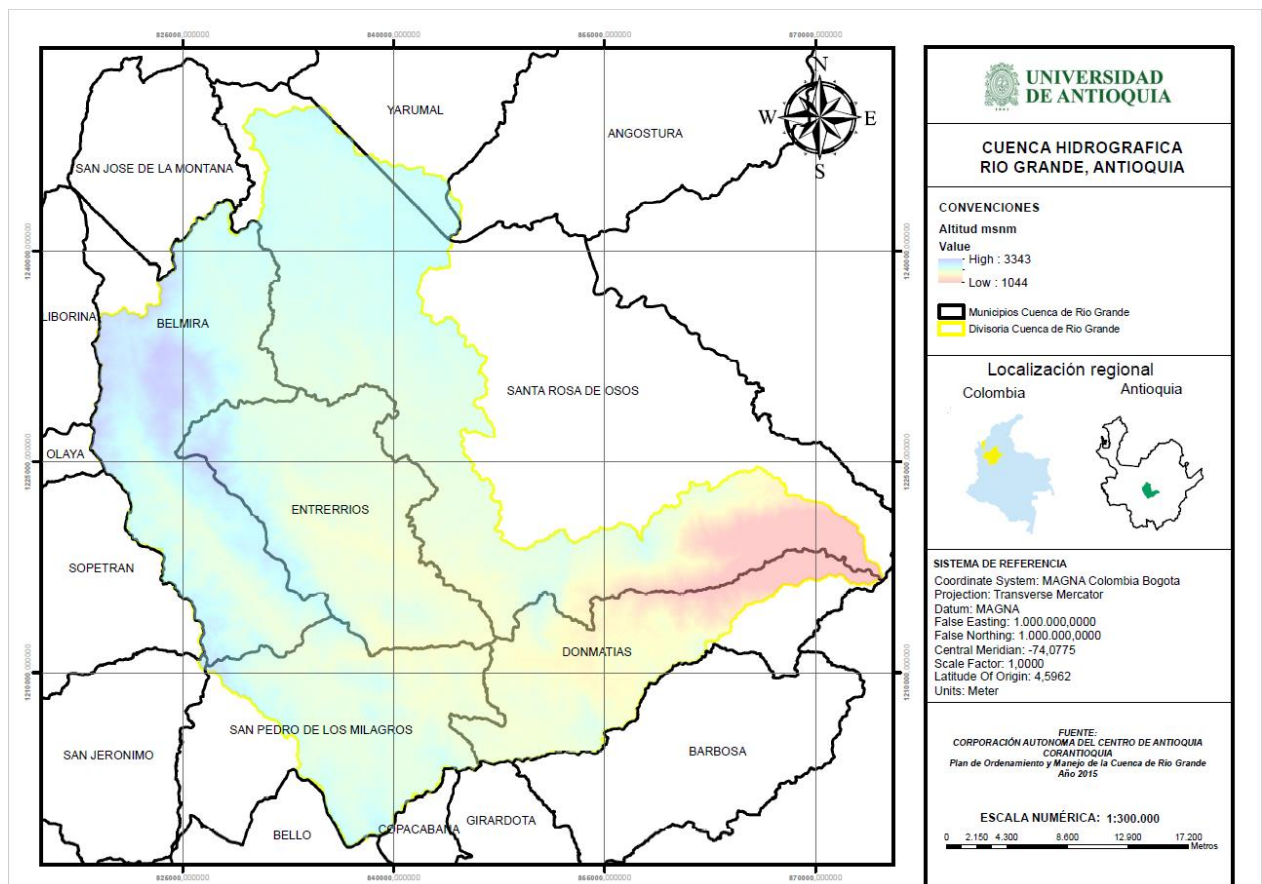
5.1. Área de estudio

La Cuenca del Río Grande, ubicada en los Andes colombianos, en el departamento de Antioquia, comprende un área de aproximadamente 127.986,3 hectáreas abarca los municipios de Belmira, San Pedro de los Milagros, Entreríos, Santa Rosa de Osos y Don Matías. Esta región presenta un rango altitudinal entre los 1.044 y 3.350 metros sobre el nivel del mar y ha experimentado una transformación significativa de sus coberturas del suelo, para el 2020, presenta

61% de áreas de pastos destinadas principalmente a la ganadería lechera, la principal actividad económica local (Berrio Giraldo L. I., 2020)

Estos cambios han afectado de manera directa la provisión de servicios ecosistémicos esenciales, como la regulación hídrica y el control de la erosión, incrementando los riesgos de deterioro ambiental. Además, el embalse Riogrande II, con una capacidad de 220 millones de m³, destaca por su relevancia estratégica en la generación de energía eléctrica (306 MW) y la provisión de agua potable, beneficiando tanto a las comunidades locales como al Área Metropolitana del Valle de Aburrá (Berrio Giraldo L. I., 2020). Proyecciones hacia 2040 indican la necesidad de implementar estrategias de manejo sostenible para mitigar los impactos de estos cambios en el sistema socio-ecológico (Berrio Giraldo L. I., 2020) (Berrio Giraldo, Villegas Palacio, & Arango Aramburo, 2021).

Ilustración 1. Mapa de ubicación cuenca de Rio Grande, Antioquia



Fuente: Elaboración propia.

5.2. Métodos

5.2.1. Obtención y clasificación de los datos de cobertura del suelo

Los datos utilizados en esta investigación fueron obtenidos de la clasificación de coberturas del suelo realizada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), en compañía del Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas (SINCHI), Parques Nacionales Naturales (PNN) y El Instituto Agustín Codazzi (IGAC) (Gobierno de Colombia, s.f.) . Para identificar los cambios en la cobertura del suelo, se seleccionaron datos de tipo vectorial correspondientes a un lapso de 20 años, específicamente de los años 2000, 2010 y 2020. Esta información temática de cobertura de la tierra escala 1:100.000 del territorio colombiano, fue generada a partir de imágenes de satélite Landsat, aplicando la metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia y utilizando la Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra publicada en el año 2010. Este enfoque permitió capturar las dinámicas de transformación del paisaje a lo largo del tiempo, adecuada para representar las características de la cuenca bajo estudio (Gobierno de Colombia, s.f.).

Inicialmente, los datos fueron analizados en formato vectorial, para facilitar su manejo en análisis de paisajes y garantizar un nivel de detalle uniforme, la información fue rasterizada utilizando un tamaño de celda de 30x30 metros. Esta resolución espacial se determinó mediante la fórmula de conversión de escala, que establece la relación entre la escala cartográfica y el tamaño de píxel (Slocum, McMaster, Kessler, & Howard, 2022). El tamaño de celda seleccionado fue considerado adecuado para reflejar los patrones espaciales de las coberturas sin comprometer la precisión de los resultados (Slocum, McMaster, Kessler, & Howard, 2022).

La fórmula utilizada para determinar el tamaño de celda fue:

$$\text{Tamaño de la celda (m)} = \frac{1}{\text{Escala Cartografica}} \times \text{Denominador de conversión}$$

Donde el denominador de conversión depende del sistema métrico, y en este caso corresponde a 100.000 para una representación en metros. Este proceso garantizó la consistencia entre las diferentes escalas.

5.2.2. Reclasificación y análisis de las coberturas del suelo

Una vez rasterizada la información, las coberturas del suelo fueron reclasificadas a partir de la clasificación Corine Land Cover adaptada para Colombia por el IDEAM (Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Territorio; Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales. , 2010), en cinco categorías principales de estudio. Estas categorías fueron definidas según criterios específicos basados en las características predominantes de la cuenca mencionadas por Berrío Giraldo (2021), y teniendo en cuenta las grandes categorías en que se encuentra esta metodología de clasificación de las coberturas del suelo.

Tabla 1. Reclasificación de categorías de la metodología Corine Land Cover (Ideam).

Categorías IDEAM	Categorías Utilizadas
1. TERRITORIOS ARTIFICIALIZADOS	Zonas Urbanas y Suelos desnudos
1.1. Zonas urbanizadas	
1.1.1. Tejido urbano continuo	
1.1.2. Tejido urbano discontinuo	
1.2. Zonas industriales o comerciales y redes de comunicación	
1.2.1. Red vial, ferroviaria y terrenos asociados	
1.2.2. Zonas industriales o comerciales	
1.2.3. Zonas portuarias	
1.2.4. Obras hidráulicas	
1.3. Zonas de extracción minera y escombreras	
1.3.1. Zonas de extracción minera	
1.3.2. Zonas de disposición de residuos	
1.4. Zonas verdes artificializadas, no agrícolas	
1.4.1. Zonas verdes urbanas	
1.4.2. Instalaciones recreativas	
2. TERRITORIOS AGRÍCOLAS	Cultivos
2.1. Cultivos transitorios	
2.1.1. Otros cultivos transitorios	
2.1.2. Cereales	
2.1.3. Oleaginosas y leguminosas	

2.1.4. Hortalizas	
2.1.5. Tubérculos	
2.2. Cultivos permanentes	
2.2.1. Cultivos permanentes herbáceos	
2.2.1.1. Otros cultivos permanentes herbáceos	
2.2.1.2. Caña	
2.2.1.3. Plátano y banano	
2.2.1.4. Tabaco	
2.2.1.5. Papaya	
2.2.1.6. Amapola	
2.2.2. Cultivos permanentes arbustivos	
2.2.2.1. Otros cultivos permanentes arbustivos	
2.2.2.2. Café	
2.2.2.3. Cacao	
2.2.2.4. Viñedos	
2.2.2.5. Coca	
2.2.3. Cultivos permanentes arbóreos	
2.2.3.1. Otros cultivos permanentes arbóreos	
2.2.3.2. Palma de aceite	
2.2.3.3. Cítricos	
2.2.3.4. Mango	
2.2.4. Cultivos agroforestales	
2.2.5. Cultivos confinados	
2.3 PASTOS	
2.3.1. Pastos limpios	Pastos
2.3.2. Pastos arbolados	
2.3.3. Pastos enmalezados	
2.4. Áreas agrícolas heterogéneas	Cultivos
2.4.1. Mosaico de cultivos	
2.4.2. Mosaico de cultivos y pastos	
2.4.3. Mosaico de pastos con espacios naturales	
2.4.4. Mosaico de cultivos y espacios naturales	
3. BOSQUES Y ÁREAS SEMINATURALES	Bosques
3.1. Bosques	
3.1.1. Bosque denso	
3.1.2. Bosque abierto	
3.1.3. Bosque fragmentado	
3.1.4. Bosque de galería y ripario	
3.1.5. Plantación forestal	
3.2. Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva	
3.3. Áreas abiertas, sin o con poca vegetación	

4. ÁREAS HÚMEDAS	Aguas Superficiales
4.1. Áreas húmedas continentales	
4.2. Áreas húmedas costeras	
5. SUPERFICIES DE AGUA	
5.1. Aguas continentales	
5.2. Aguas marítimas	

Fuente: Elaboración propia – Leyenda Nacional de coberturas de Colombia

El objetivo de esta reclasificación fue identificar y priorizar las coberturas más significativas para el análisis, facilitando la comparación de métricas entre los tres períodos.

El proceso de reclasificación se llevó a cabo utilizando herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), (Reclassify), utilizando el software ArcGIS Pro, asegurando la precisión en la interpretación y la consistencia en los datos procesados. Este análisis preliminar permitió identificar tendencias generales en la dinámica de las coberturas y preparar los datos para el análisis de métricas del paisaje.

5.2.3. Análisis de métricas del paisaje

Para evaluar las características del paisaje y su dinámica a lo largo del tiempo, se utilizó el software Fragstats v4.2.1 (McGarigal, Cushman, & Ene, Spatial Pattern Analysis Program for Categorical Maps., 2023) (, reconocido por su capacidad para calcular métricas espaciales y analizar patrones en el paisaje (McGarigal, Cushman, Neel, & Ene, 2002). La parametrización incluyó el uso de la regla de los 8 vecinos para definir la conectividad entre celdas adyacentes, considerando conexiones ortogonales y diagonales, lo cual permitió un análisis más completo de los parches y las métricas de fragmentación. Las métricas seleccionadas incluyeron índices de agregación y dispersión, que permitieron identificar el grado de conexión o fragmentación de las coberturas del suelo; porcentaje, área promedio y área de cada clase de cobertura, para determinar la proporción y extensión de las categorías reclasificadas; cantidad de parches, para evaluar la fragmentación y cantidad de unidades homogéneas; y el índice de división, que mide la fragmentación de una clase calculando cuántas partes iguales de un tamaño mínimo serían necesarias para dividir completamente la clase, donde valores altos reflejan mayor fragmentación y valores bajos indican mayor agregación. Estas métricas fueron calculadas para los años 2000, 2010 y 2020, lo que permitió comparar su evolución en el tiempo (Hernández Pérez, García Franco,

Vázquez, & Cantellano de Rosas, 2022) (Taveira, y otros, 2022). Además, se estimó la tasa de cambio para analizar las tendencias dinámicas del paisaje (Muhammed & Elias, 2021).

$$Tasa\ de\ cambio = \frac{\text{Área del año final} - \text{Área del año inicial}}{\text{Área del año inicial}} \times 100\%$$

La *tabla 2.* presenta las fórmulas y rangos asociados a las métricas espaciales utilizadas para el análisis del paisaje a nivel de clase. Estas métricas permiten evaluar características como la extensión, fragmentación y agregación de las coberturas del suelo en el área de estudio, ofreciendo una base cuantitativa para comprender los cambios espaciales en los años seleccionados.

Tabla 2. Métricas utilizadas para analizar la cobertura y fragmentación en la cuenca de Rio Grande.

Métrica	Fórmula	Rango	Descripción	Unidades
Área de la clase	$A = \sum a_{ij}$	$A > 0$	Suma de las áreas (en m ²) de todos los parches de un tipo de clase	Metros Cuadrados (m ²)
Área promedio	$AP = A/NP$	$AP > 0$	Cálculo del promedio del área (en m ²) de todos los parches para una clase dada	Metros Cuadrados (m ²)
NP (Número de parches)	$NP \geq 1$, sin límite	$NP \geq 1$, sin límite. NP = 1 indica un único parche.	Mide el grado de subdivisión o fragmentación. NP=1 si el paisaje tiene solo un parche.	Número de parches (sin unidad)
PLAND (Proporción del paisaje)	$PLAND = \sum a_{ij} / A * 100$	$0 < PLAND \leq 100$	Suma del área de todos los parches (en m ²) dividida por el área total del paisaje (en m ²) y convertida a porcentaje.	Porcentaje (%)

AI (Índice de agregación)	$AI = g_{ii} / \max(g_{ii}) * 100$	$0 \leq AI \leq 100$	Calcula la frecuencia con que clases de un tipo aparecen adyacentes en el mapa.	Porcentaje (%)
SPLIT (Índice de división)	$SPLIT = A^2 / \sum a_{ij}^2$	Valor creciente sin límite.	Mide el grado de fragmentación; valores altos indican clases más divididas.	Unidad adimensional

Fuente: Elaboración propia

6. Resultados

6.1. Cambios en las Coberturas del Suelo

El análisis de los cambios en la cobertura del suelo en la cuenca del Río Grande se llevó a cabo durante un período de 20 años, desde el 2000 hasta el 2020. En este lapso, las diferentes clases de cobertura experimentaron dinámicas particulares. Los pastos, mostraron inicialmente una tendencia al incremento en los primeros diez años, seguida de una disminución en el área total durante la última década. Por otro lado, las coberturas de bosque no presentaron cambios significativos, manteniendo relativa estabilidad en el tamaño de su área a lo largo del tiempo. Se resalta cómo los pastos desempeñan un papel predominante en la estructura del paisaje, siendo la clase más representativa en términos de superficie dentro del periodo estudiado. Esto se ilustra en la siguiente tabla, resultado del análisis realizado con el software Fragstats v4.2, donde se presentan las dinámicas de cambio en la superficie y porcentaje de cada clase de cobertura del suelo.

Tabla 3. Resultados Cambios de las coberturas del suelo, cuenca de Rio Grande.

Clases de Coberturas	2000		2010		2020		Cambio Total 2000 -2020
	Superficie (ha)	%	Superficie (ha)	%	Superficie (ha)	%	%
Zonas Urbanas y Tierras Desnudas	351,54	0,12	337,14	0,11	1306,71	0,44	271,71
Cultivos	15625,98	5,26	3650,04	1,23	19073,7	6,42	22,06
Pastos	84794,13	28,56	96430,68	32,48	79642,62	26,82	-6,08
Bosque	24942,24	8,40	26329,23	8,87	26757,9	9,01	7,28
Agua Superficial	1220,04	0,41	1202,13	0,40	1168,29	0,39	-4,24

Fuente: Elaboración propia

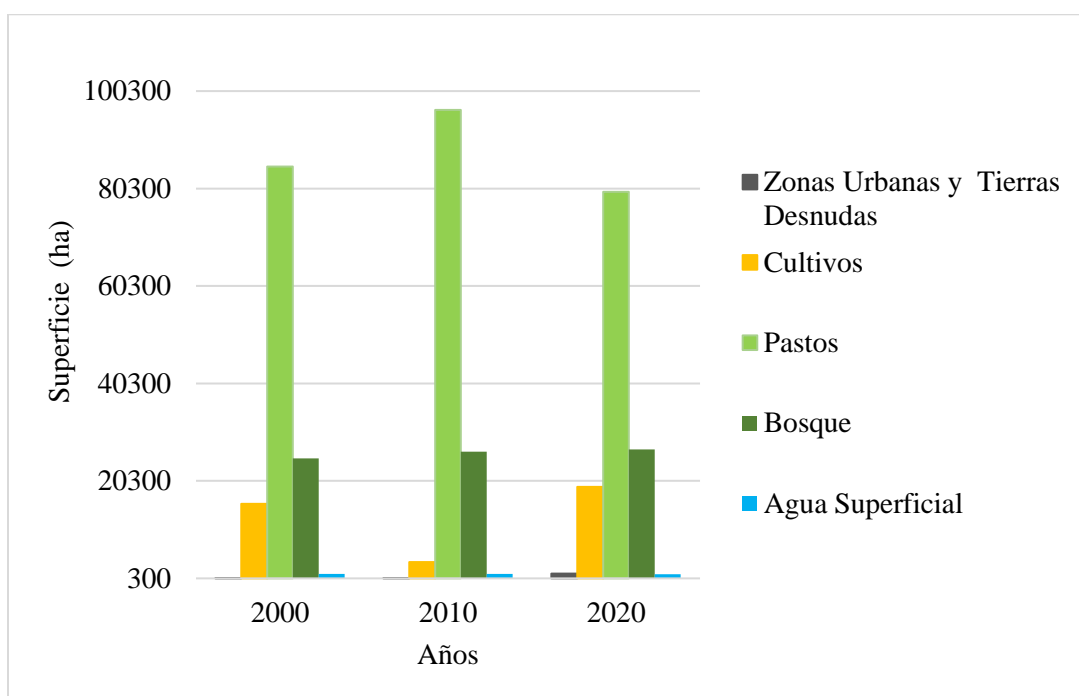


Ilustración 2. Gráfico de superficie total de las coberturas de la cuenca de Rio Grande.

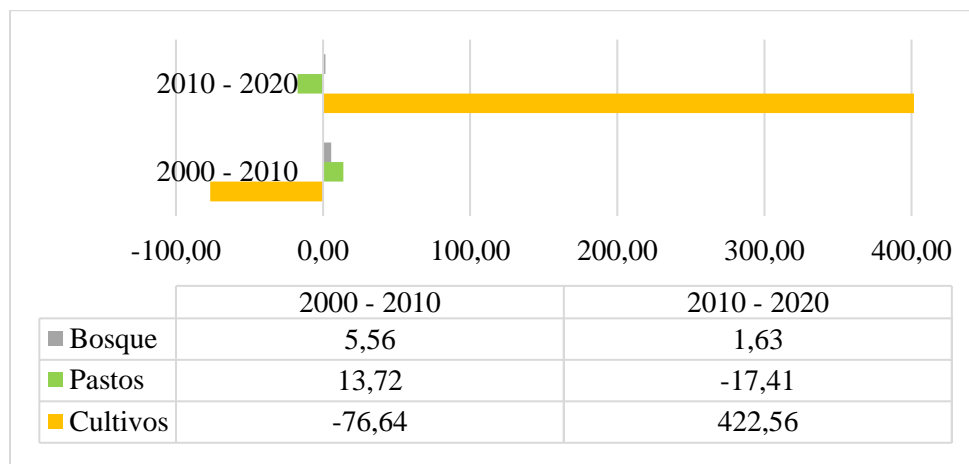
Fuente: Elaboración propia

Se evidencia (Ilustración 2) que los **pastos** y los **cultivos** fueron las clases de cobertura con dinámicas más significativas en la cuenca del Río Grande durante el período 2000-2020, lo que refleja transformaciones importantes en el uso del suelo. En el caso de los pastos, estos representaron la mayor proporción del paisaje durante todo el período, pasando de 84.794,13 ha (28.56%) en 2000 a 79.642,62 ha (26.82%) en 2020. Aunque inicialmente mostraron un incremento

en los primeros diez años (96,430.68 ha en 2010, equivalente al 32.48%), este aumento fue seguido por una disminución del 6.08% en los últimos diez años, lo que puede estar asociado a procesos de conversión de áreas de pastoreo hacia otros usos del suelo, como la agricultura o la expansión urbana. Esta reducción podría ser indicativa de una reorganización en las actividades productivas, posiblemente relacionada con cambios en las políticas de manejo de tierras o demandas del mercado (Bolaños-Valencia, Villegas-Palacio, López-Gómez, Berrouet, & Ruiz, 2019).

Por otro lado, los **cultivos** aumentaron de 15.625,98 ha (5.26%) en 2000 a 19.073,7 ha (6.42%) en 2020, lo que equivale a un crecimiento del 22.06% en el período analizado. Este incremento podría reflejar una intensificación de la actividad agrícola en respuesta a una mayor demanda de alimentos o productos agrícolas, así como la expansión de cultivos en áreas previamente ocupadas por pastos o incluso por coberturas naturales (Machado, Villegas-Palacio, Loaiza, & Castañeda, 2019).

Tabla 4. Tasa de cambio en porcentaje de coberturas dominantes en la Cuenca de Río Grande.



Fuente: Elaboración Propia

La *tabla 4.* evidencia dinámicas contrastantes en las coberturas del suelo de la cuenca del Río Grande en los intervalos 2000-2010 y 2010-2020. Entre 2000 y 2010, los cultivos disminuyeron drásticamente (-76.64), mientras que los pastos mostraron un aumento moderado (13.72), reflejando una transición de áreas cultivadas, como papa, hacia potreros ganaderos, actividad dominante en la región gracias a la estabilidad económica que brinda la ganadería lechera, impulsada por cooperativas como Colanta y Alpina (Berrio Giraldo L. I., 2020). En contraste, entre

2010 y 2020, esta tendencia se invirtió: los cultivos experimentaron un incremento significativo (422.56), mientras que los pastos disminuyeron considerablemente (-17.41), probablemente debido a una intensificación agrícola y al aumento en la demanda de tierras cultivables.

Los bosques, aunque mostraron una ligera recuperación en ambos periodos (5.56 en 2000-2010 y 1.62 en 2010-2020), registraron un menor ritmo de regeneración en la última década. Este bajo cambio en las coberturas naturales se debe en gran medida a la implementación de planes y esquemas de ordenamiento territorial, como los planes municipales de ordenamiento, el Distrito de Manejo Integrado (DMI) de los recursos naturales renovables, el sistema de páramos y bosques altoandinos del noroccidente medio antioqueño, el Sistema de Áreas Protegidas Parque Central de Antioquia, y las iniciativas comunitarias como el Sistema Local de Áreas Protegidas (SILAP) de Santa Rosa de Osos. También se destacan el Plan de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca Hidrográfica de los ríos Grande y Chico (POMCA) y, recientemente, los esquemas de pagos por servicios ambientales, que han contribuido a preservar y estabilizar estas coberturas frente a las presiones del uso intensivo del suelo (Berrio Giraldo L. I., 2020) (Corantioquia; UNAL, 2015).

Se presenta a continuación el mapa de las de coberturas del suelo. Este mapa ilustra visualmente las transformaciones ocurridas entre los periodos 2000-2010 y 2010-2020, permitiendo identificar las áreas específicas donde se concentraron las transiciones de cultivos, pastos y bosques.

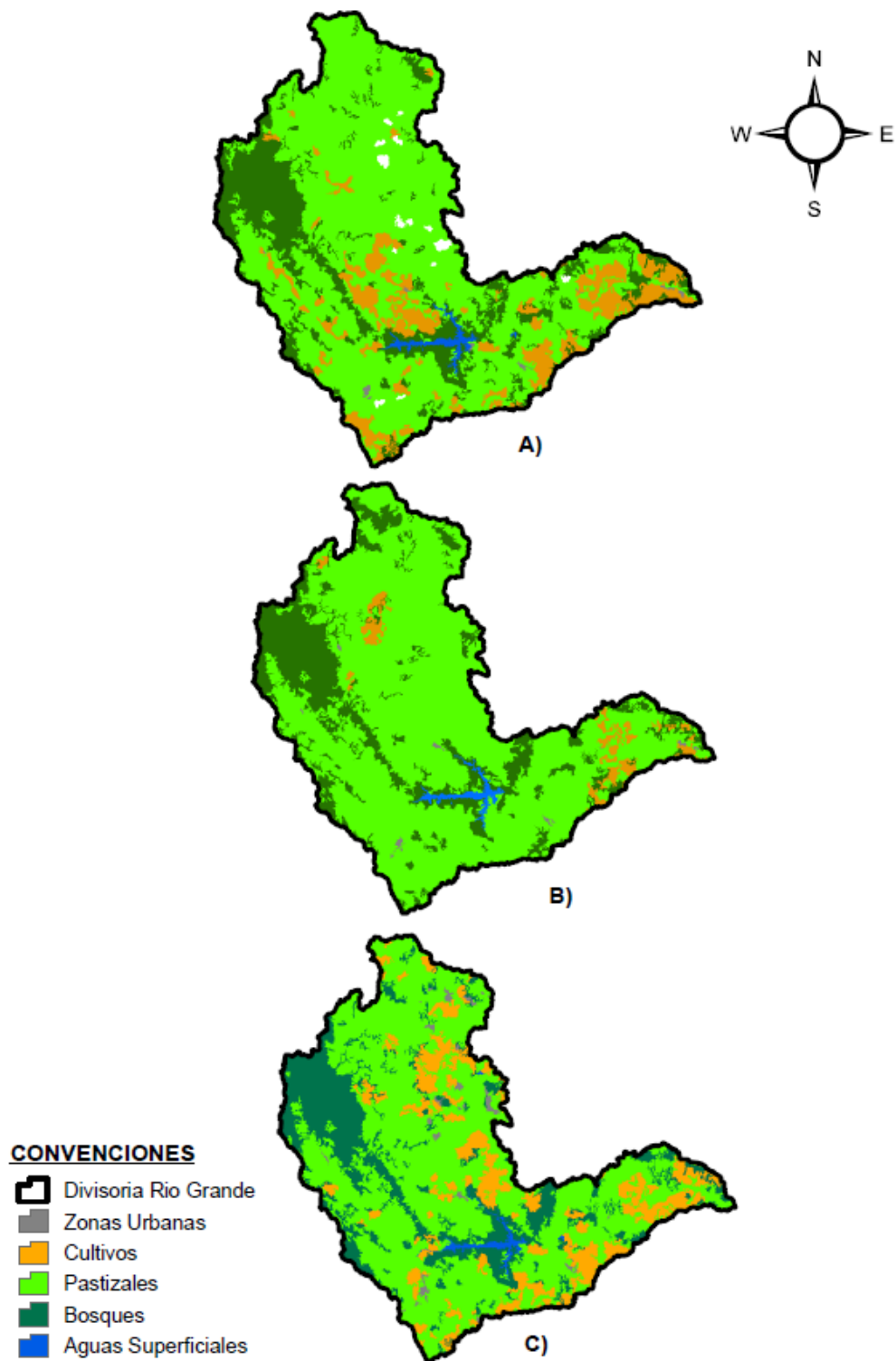


Ilustración 3. Mapa de coberturas del suelo cuenca de Rio Grande, años A) 2000, B) 2010 y C) 2020.

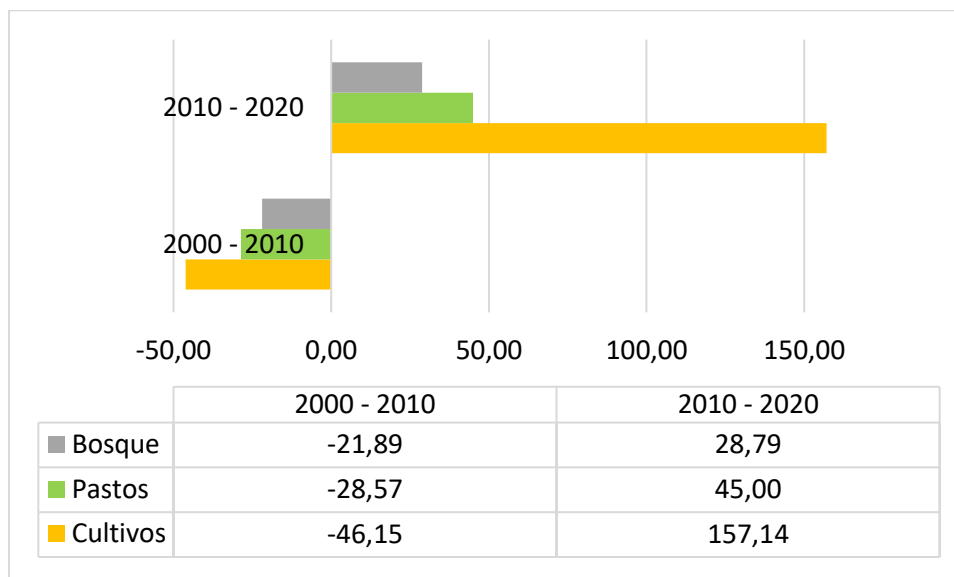
Fuente: Elaboración propia.

6.2. Análisis de la Fragmentación de la cuenca de Rio Grande

El análisis de las métricas del paisaje revela que la cobertura de suelo correspondiente a pastos experimentó un incremento en el número de parches para el año 2020, acompañado de una disminución en el área promedio de cada parche. No obstante, este comportamiento no refleja un patrón uniforme de su disminución a largo plazo. Durante la primera década (2000-2010), la cantidad de parches disminuyó en un 28%, mientras que el área promedio de la clase aumentó. En contraste, durante la segunda década (2010-2020), se observó un aumento del 45% en el número de parches, acompañado de una reducción en el área promedio.

En cuanto a los cultivos, se identificó una tendencia decreciente en el número de parches durante la primera década, como lo muestra la *tabla 5*, con una reducción del 46%, mientras que el área promedio de la clase disminuyó igualmente en un 56%. En la segunda década, el comportamiento cambió significativamente, mostrando un aumento superior al 100% tanto en el número de parches como en el área promedio de la clase.

Tabla 5. Tasa de cambio en porcentaje del Número de Parches de las Coberturas Dominantes.



Fuente: Elaboración propia

Por su parte, la cobertura de bosques presentó un aumento del 35% en el área promedio de la clase durante la primera década, acompañado de una disminución del 21% en el número de parches. Sin embargo, en la segunda década, esta dinámica se invirtió, con una reducción del 21% en el área promedio de la clase y un aumento del 29% en el número de parches.

Estos resultados reflejan dinámicas complejas de cambio en la configuración del paisaje, como se detalla en la siguiente tabla:

Tabla 6. Métricas del paisaje para los años 2000, 2010 y 2020, de las coberturas del suelo de la cuenca Rio Grande.

Clases de Coberturas	2000				2010				2020			
	Área Promedio (ha)	NP	SPLIT	IA %	Área Promedio (ha)	NP	SPLIT	IA %	Área Promedio (ha)	NP	SPLIT	IA %
Zonas Urbanas y Tierras Desnudas	25	14	6055581	90	22	15	4737268	90	24	54	744065	91
Cultivos	240	65	6758	96	104	35	53825	94	212	90	4408	96
Pastos	1009	84	13	98	1607	60	10	99	915	87	36	98
Bosque	148	169	596	95	199	132	595	95	157	170	549	95
Agua Superficial	407	3	61815	93	601	2	61058	95	234	5	72149	92

Fuente: Elaboración propia.

En general, coberturas como zonas urbanas y suelos desnudos, aumentaron su número de parches de 14 a 54, reflejando un incremento en la fragmentación del paisaje, por otro lado, el agua superficial, mostró un aumento consistente en el área promedio de la clase de 406.68 ha en 2000 a 601.07 ha en 2010 y 233.66 ha en 2020, reflejando fluctuaciones significativas en la configuración espacial de este tipo de cobertura.

La gráfica permite visualizar las fluctuaciones significativas en el área promedio de las coberturas dominantes de la cuenca:

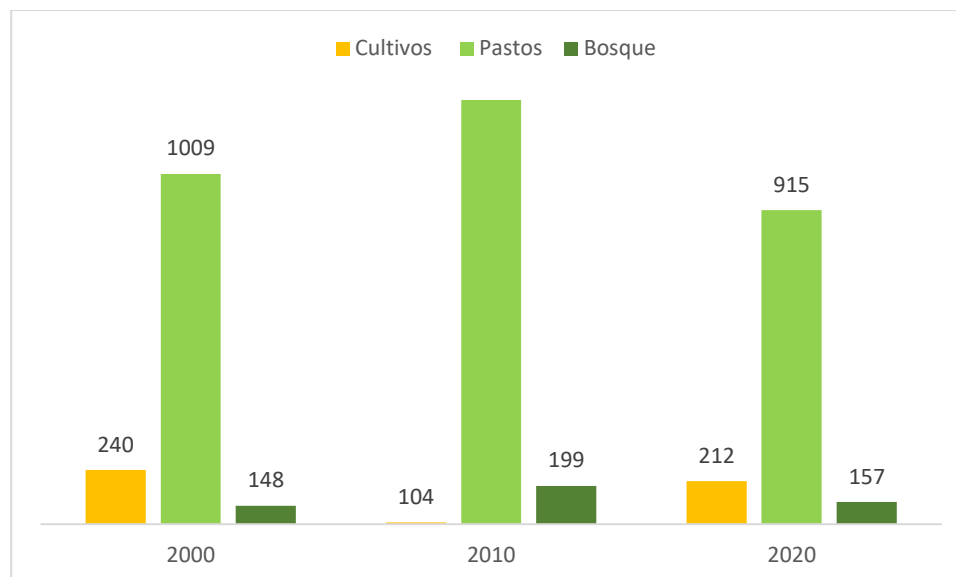


Ilustración 4. Áreas promedio en hectáreas de las clases de coberturas dominantes. (2000 - 2020)

Fuente: Elaboración propia

A partir de la *ilustración 3* y *4*, se identifica que la cobertura dominante en la cuenca corresponde a los pastos, los cuales han experimentado importantes fluctuaciones durante el periodo evaluado, variando el área de la clase, su porcentaje de área sobre la cuenca y la cantidad de parches en la que se divide, de esta manera, un alto número de parches aislados dentro de una cobertura es indicativo de un elevado nivel de fragmentación (Oertli, y otros, 2020). En este sentido, coberturas como pastos, bosques y cultivos muestran una considerable división (NP) de su área para el año 2020, lo que refleja un proceso de fragmentación del paisaje. Sin embargo, al analizar los índices de agregación (IA), que miden el grado de agrupamiento de las clases en el paisaje, se observa que los cultivos mantienen valores consistentes de 96%, 94% y 96% para los periodos evaluados, lo que indica que, aunque existen múltiples fragmentos, estos se encuentran relativamente cercanos entre sí, formando unidades agrupadas.

De manera similar, las coberturas de pastos y bosques presentan índices de agregación cercanos al 100%, como se detalla en la *Tabla 6*, lo que indica una cohesión espacial significativa. Esta cohesión en los pastos, junto con la distribución de sus parches, se evidencia en el mapa de coberturas (*Ilustración 3*), lo que la caracteriza por ser una cobertura dominante que determina la matriz del paisaje.

Por otro lado, las *Ilustración 5* muestra que, aunque los cultivos presentan índices de agregación elevados, su distribución en la cuenca refleja un alto grado de fragmentación en el paisaje. Esto se debe a la notable dispersión de los parches de esta clase durante el periodo evaluado, tal como se aprecia en el mapa de coberturas (*Ilustración 3*).

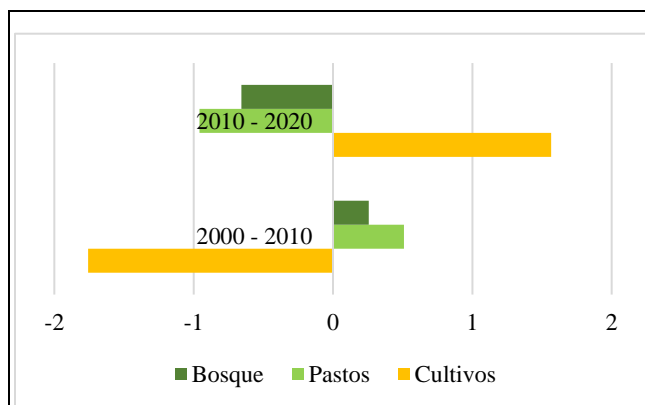


Ilustración 5. Tasa de cambio IA, para las coberturas cultivo, pastos y bosque.

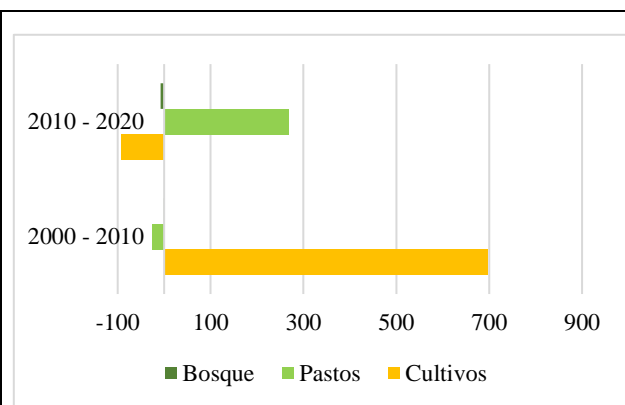


Ilustración 6. Tasa de cambio SPLIT, para las coberturas cultivos, pastos y bosque

Fuente: Elaboración propia

El índice de división (SPLIT), representado en la *Ilustración 6*, proporciona información clave al cuantificar el grado de fragmentación del paisaje. Valores elevados de este índice indican una mayor fragmentación y un mayor aislamiento entre parches (Rodríguez Flores, 2023). En el caso de los pastos, el SPLIT presenta valores bajos durante el primer período analizado (2000-2010), lo que se alinea con el aumento de las áreas de pastos en la cuenca, consolidándose como la matriz del paisaje. Este patrón es coherente con su índice de agregación elevado, reflejando una estructura más cohesionada.

Por otro lado, para la cobertura de bosques se observa un incremento en la fragmentación hacia el año 2020, evidenciado por la disminución en su índice de agregación. Aunque los bosques presentan parches compactos en ciertas áreas, también se identifican fragmentos aislados. Este comportamiento es evidente en el mapa, donde los bosques se concentran en fragmentos significativos alrededor del embalse Río Grande II y en las proximidades del páramo de Belmira.

En contraste, los cultivos se caracterizan por parches grandes pero dispersos, ubicados principalmente en áreas como Don Matías y Entreríos.

Según Berrio Giraldo, 2021, estas dinámicas de fragmentación del bosque pueden explicarse por los cambios significativos en las coberturas de la cuenca durante las últimas décadas. La cobertura de cultivos experimentó la mayor transformación, pasando de representar el 30,9% de la cuenca en 1986 a solo un 1,54% en 2015, así como en este análisis, para el 2010, los cultivos representaban el 1,23%, este proceso de transformación masiva hacia pastos se debía a la alta demanda de carne y leche, principal actividad económica de la región, ya que solo en el área de la cuenca se produce el 55,2% de toda la leche del departamento (Corantioquia; UNAL, 2015).

Adicionalmente, la deforestación, que alcanzó un 11,28%, y la limitada reforestación del 4,73%, evidencian un proceso de pérdida de bosques motivado principalmente por la expansión ganadera, la extracción de leña y, en menor medida, la conversión hacia cultivos en décadas anteriores (Machado, Villegas-Palacio, Loaiza, & Castañeda, 2019). Por lo que se puede explicar el aumento en el número de parches de esta clase de cobertura.

La ausencia de políticas que fomentaran incentivos agrícolas sostenibles, como la diversificación productiva y el manejo adecuado de suelos agrícolas, también contribuyó a estas transformaciones (Berrio Giraldo L. I., 2020). Aunque los pagos por servicios ambientales (PSA) comenzaron a implementarse después de 2015, su impacto fue limitado en cuanto a la conservación de los bosques, ya que las restricciones al uso del suelo y la falta de incentivos efectivos para la protección forestal no lograron mitigar suficientemente estas dinámicas de cambio (Machado, Villegas-Palacio, Loaiza, & Castañeda, 2019).

Por otro lado, las coberturas naturales, como los bosques, enfrentan conflictos relacionados con el uso del suelo. Según Corantioquia y la UNAL (2015), un 33,6% del suelo presenta sobreutilización respecto a su vocación natural, lo que podría estar asociado a la fluctuación en el número de parches de esta cobertura, incrementando su nivel de fragmentación.

El POMCA determinó que, en 2014, la cobertura de bosque abarcaba 38.280 ha, con tasas de cambio inferiores al 10%. Este ejercicio identificó un valor de 26.329 ha para el año 2010, mostrando también tasas de cambio por debajo del 10% durante el periodo evaluado. Estos datos sugieren que, pese a la presión ejercida por la expansión agrícola, la extensión de estas coberturas ha permanecido relativamente estable. Esto puede atribuirse en gran parte a las figuras de protección existentes, que han favorecido su conservación (Corantioquia; UNAL, 2015).

7. Conclusiones

Durante el periodo 2000-2020, los pastos se consolidaron como la cobertura de suelo más significativa, por lo que se establece como la matriz del paisaje en la cuenca del río Grande. No obstante, su extensión presentó una dinámica variable, con un aumento en la primera década, seguido de una reducción en los últimos diez años. Este comportamiento puede estar relacionado con la conversión de áreas de pastoreo hacia usos como cultivos y/o zonas urbanas, dado el aumento en el número de parches de estas coberturas, evidenciando cambios en las actividades productivas de la región.

Por otro lado, los cultivos experimentaron un incremento notable, con un aumento del 22.06% en su extensión total durante el periodo analizado, especialmente marcado en la última década. Este crecimiento refleja una intensificación agrícola que probablemente responde a mayores demandas alimenticias y cambios en la vocación del suelo.

En cuanto a los bosques, estos mantuvieron una relativa estabilidad en términos de área total, pero mostraron fluctuaciones en el número y tamaño de los parches. Esto pone de manifiesto la influencia de presiones antrópicas, en contra posición de las medidas de conservación, como los planes de ordenamiento territorial y los pagos por servicios ambientales, en mitigar la pérdida de estas áreas.

El análisis de la fragmentación del paisaje revela patrones diferenciados. Los cultivos presentaron un incremento significativo en el número de parches y una mayor dispersión espacial

en la última década, Los pastos, aunque continúan siendo dominantes, mostraron una tendencia similar, con un aumento en el número de parches aislados y una reducción en el área promedio de los mismos, lo que indica una creciente fragmentación en el paisaje de la cuenca.

Finalmente, la cobertura de bosques evidenció un aumento en su fragmentación hacia el año 2020, caracterizado por una mayor dispersión de los fragmentos y una disminución en su cohesión espacial. Este fenómeno subraya las presiones persistentes sobre estas áreas naturales, a pesar de los esfuerzos implementados para su conservación. Estas dinámicas resaltan la necesidad de estrategias integrales que favorezcan la conectividad ecológica y promuevan un uso sostenible del suelo.

Referencias

- Berrio Giraldo, L. I. (2020). *Dinámica de sistemas socio- ecológicos en cuencas hidrograficas de media montaña, Colombia*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Berrio Giraldo, L., Villegas Palacio, C., & Arango Aramburo, S. (2021). Understating complex interactions in socio-ecological systems using system dynamics: A case in the tropical Andes. *Journal of Environmental Management*.
- Berrouet, L., Villegas-Palacio, C., & Botero, V. (2019). A social vulnerability index to changes in ecosystem services provision at local scale: A methodological approach. *Environmental science & policy*, 93, 158-171.
- Bian, J., Chen, W., & Zeng, J. (2023). Ecosystem services, landscape pattern, and landscape ecological risk zoning in China. *Environmental Science and Pollution Research*.
- Bolaños-Valencia, I., Villegas-Palacio, C., López-Gómez, C., Berrouet, L., & Ruiz, A. (2019). Social perception of risk in socio-ecological systems. A qualitative and quantitative analysis. *Ecosystem Services*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2019.100942>
- Bonan, G. B. (2008). Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science* , 1444-1449.
- Broxton, P. D., Zeng, X., Sulla-Menashe, D., & Troch, P. A. (2014). A global land cover climatology using MODIS data. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 1593-1605.

- Corantioquia; UNAL. (2015). *Actualización y ajuste plan de ordenamiento y manejo de la cuenca de los rios Grande y Chico*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- De Groot, R. S., Alkemade, R., Braat, L., Hein, L., & Willemen, L. (2010). Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. *Ecological complexity*, 7(3), 260-272.
- Etter, A. (1991). *Introducción a la Ecología del Paisaje*. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.
- Fahrig, L. (2003). Effects of Habitat Fragmentation on Biodiversity. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*.
- Gobierno de Colombia. (s.f.). *Colombia en Mapas*. Obtenido de <https://www.colombiaenmapas.gov.co/#>
- Hansen, M. C., Potapov, P. V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S. A., Tyukavina, A., & Townshend, J. R. (2013). High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science*, 850 - 853.
- Hernández Pérez, E., García Franco, J. G., Vázquez, G., & Cantellano de Rosas, E. (2022). Land-use change and landscape fragmentation in central Veracruz, Mexico (1989–2015). *Madera y Bosques*, 28.
- Leija, E. G., & Mendoza, M. E. (2021). Landscape connectivity studies in Latin America: research challenges. *Madera y Bosques*, 27. doi: 10.21829/myb.2021.2712032
- López, S., López-Sandoval, M. F., & Jung, J. K. (2021). New insights on land use, land cover, and climate change in human–environment dynamics of the Equatorial Andes. *Annals of the American Association of Geographers*, 1110-1136.
- Ma, J., Li, J., Wu, W., & Liu, J. (2022). Global forest fragmentation change from 2000 to 2020. *Nature Communications*.
- Machado, J., Villegas-Palacio, C., Loaiza, J. C., & Castañeda, D. A. (2019). Soil natural capital vulnerability to environmental change. A regional scale approach for tropical soils in the Colombian Andes. *Ecological Indicators*, 116-126.
- Mahmood, R., Pielke Sr, R. A., Hubbard, K. G., Niyogi, D., Dirmeyer, P. A., McAlpine, C., & Fall, S. (2014). Land cover changes and their biogeophysical effects on climate. *International journal of climatology*, 929-953.
- McGarigal, K., Cushman, S., & Ene, E. (2023). *Spatial Pattern Analysis Program for Categorical Maps*. Obtenido de fragstats: <https://www.fragstats.org>

- McGarigal, K., Cushman, S., Neel, M., & Ene, E. (2002). *FRAGSTATS: Spatial pattern analysis program for categorical maps. Comp. software prog. Univ. Mass. Amherst*. Obtenido de www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html
- Mezgebu, A., & Workineh, G. (2017). Changes and drivers of afro-alpine forest ecosystem: future trajectories and management strategies in Bale eco-region, Ethiopia. *Ecological Processes*, 6, 1-13.
- Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Territorio; Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales. . (2010). *Leyenda Nacional de coberturas de la tierra - Metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia escala 1: 100.000*. Bogotá .
- Mitchell, M. G., Suarez-Castro, A. F., Martinez-Harms, M., Maron, M., McAlpine, C., Gaston, K. J., & Rhodes, J. R. (2015). Reframing landscape fragmentation's effects on ecosystem services. . *Trends in ecology & evolution*, 30(4), 190-198.
- Morláns, M. C. (2009). *Estructura del paisaje (Matriz, parches, bordes, corredores) sus funciones fragmentación del habitat y su efecto borde*. San Fernando del Valle de Catamarca: Universidad Nacional de Catamarca.
- Muhammed, A., & Elias, E. (2021). Class and landscape level habitat fragmentation analysis in the Bale mountains national park, southeastern Ethiopia. *Heliyon*.
- Murunga, K. W., Nyadawa, M., Sang, J., & Cheruiyot, C. (2024). Characterizing landscape fragmentation of Koitobos river sub-basin, Trans-Nzoia, Kenya. *Heliyon*.
- Nagendra, H., Reyers, B., & Lavorel, S. (2013). mpacts of land change on biodiversity: making the link to ecosystem services. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 503-508.
- Naseri, N., & Mostafazadeh, R. (2023). Spatial relationship of Remote Sensing Ecological Indicator (RSEI) and landscape metrics under urban development intensification. *Earth Science Informatics*, 3797-3810.
- Oertli, B., Joye, D. A., Castella, E., Juge, R., Cambin, D., & Lachavanne, J. B. (2020). Does size matter? The relationship between pond area and biodiversity. . *Biological conservation* 104, 59-70.
- Robinson, D. A., Hockley, N., Dominati, E., Lebron, I., Scow, K. M., Reynolds, B., & Tuller, M. (2012). Natural capital, ecosystem services, and soil change: why soil science must embrace an ecosystems approach. *Vadose Zone Journal*.

- Rodríguez Flores, S. (2023). *Evaluación integral, mediante lógica difusa y modelación, de la subcuenca Santa Cruz de Aquismón*. Mexico.
- Slocum, T., McMaster, R., Kessler, F., & Howard, H. (2022). *Thematic cartography and geovisualization*. CRC Press.
- Suescún, D., Villegas, J. C., León, J. D., Flórez, C. P., García-Leoz, V., & Correa-Londoño, G. A. (2017). Vegetation cover and rainfall seasonality impact nutrient loss via runoff and erosion in the Colombian Andes. *Regional Environmental Change*, 827–839.
- Taveira, G., Beboulaz, R., Ramos, M., Lagos, X., Bergamino, L., & Inda, H. (2022). Evaluación de la fragmentación del paisaje en la cuenca de la laguna costera Garzón, Uruguay. *Innotec*.
- Wilcove, D. S. (1986). Habitat fragmentation in the temperate zone. *Conservation biology*, 237–256.
- Zhang, Y., Li, X., & Li, M. (2023). Assessing spatio-temporal variation and associated factors of forest fragmentation from morphological spatial pattern analysis and geo-detector analyses: a case study of Xinyu city, Jiangxi province of Eastern China. *Forests*, 14(12), 2376.