

Estado de conservación de la cobertura de bosques y conectividad del Paisaje en la zona de reserva hidrológica compuesta por las microcuencas de los caños Aguas claras y Caño Cristalino, en el municipio de Cubarral, Meta

Angela Patricia Gómez Ríos

Luz Adriana Ortiz-Orduz

Trabajo de Grado para Optar el título de Especialista en Sistemas de Información Geográfica

Director

Profesor Andres Carvajal

Universidad Antonio Nariño

Facultad de Ingeniería Ambiental y Civil

Bogotá

2022

Contenido

Introducción.....	12
1. OBJETIVOS.....	8
1.1 Objetivo general	8
1.2 Objetivos específicos.....	8
2. MARCO TEORICO	9
2.1 El Paisaje	11
2.1.1 Elementos del paisaje	11
2.2 Conectividad del paisaje	12
2.3 Metricas del paisaje.....	13
3 ESTADO DEL CONOCIMIENTO.....	19
4 METODOLOGIA	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
4.1 Area de estudio	22
4.2 Generacion y análisis de información	24
4.2.1 Procesamiento de las imágenes	24
4.2.2 Generación del mapa de coberturas	25
4.2.2 Análisis multitemporal de las coberturas.....	27
4.2.4 Analisis de la conectividad del paisaje	27
4.2.3 Analisis de la Metrica del paisaje	28
5 RESULTADOS Y DISCUCIÓN	28
5.1 Analisis multitemporal	28
5.1.1 Mapa de coberturas, año 2014.....	28
5.1.2 Mapa de coberturas, año 2021	31
5.1.3 Análisis multitemporal del cambio de coberturas vegetales, años 2014-2021.....	33
5.2 METRICAS DEL PAISAJE.....	37

Lista de Tablas

Tabla 1. Característica de las bandas 1-8 de Landsat 8.....	25
Tabla 2. Coberturas de la tierra según CORINE Land Cover, adaptada para Colombia. Tomada y modificada de IDEAM, 2010. Fuente el autor.....	26
Tabla 3. Tipos de coberturas presentes en el área de estudio para el año 2014.	28
Tabla 4. Tipos de coberturas presentes en el área de estudio para el año 2021.	31
Tabla 5. Diferencia de áreas para las coberturas presentes en la zona de estudio, entre el intervalo de tiempo comprendido entre los años 2014 y 2021.	35
Tabla 6. Definición de las métricas utilizadas en el estudio.	37
Tabla 7. Valores métricas de área y forma	38
Tabla 8. Valores métricas de subdivisión y agregación. y diversidad.	42
Tabla 9. Valores métricas de diversidad para los años 2014 y 2021.	49

Lista de Figuras

Figura 1. Diagrama de diseño de la metodología. Fuente elaboración propia.....	21
Figura 2. Localización área de interés del proyecto de investigación. Fuentes: (CORMACARENA, DANE, 2020). Zona de recarga de agua, Veredas versión 2020. Recuperado de https://geoportal.dane.gov.co/servicios/descarga-y-metadatos/visor-descarga-refveredas/ . La capa de zona de recarga de agua es entregada por el grupo SIG de Cormacarena	23
Figura 3. Área del parque nacional natural Sumapaz en el municipio de Cubarral. Fuente de la capa. Fuentes: (SIAC, CORMACARENA, DANE, 2020). Sistema Nacional de Áreas Protegidas, Zona de recarga de agua, Veredas versión 2020. Recuperado de http://www.siac.gov.co/catalogo-de-mapas y https://geoportal.dane.gov.co/servicios/descarga-y-metadatos/visor-descarga-refveredas/	24
Figura 4. Imágenes de la zona de estudio, Landsat 8, combinación 5 6 4, para adaptación de la metodología Corine Land Cover. La imagen al costado izquierdo corresponde al año 2014 y la imagen al costado derecho corresponde al año 2021.	27
Figura 5. Áreas en porcentaje de los tipos de coberturas para el año 2014.	30
Figura 6. Distribución del las coberturas presentes en la zona de estudio, año 2014.	30
Figura 7. Área en porcentaje de los tipos de coberturas para el año 2021.....	32
Figura 8. Distribución del las coberturas presentes en la zona de estudio, año 2021.	33
Figura 9. Evolución del área en hectáreas (ha) de las coberturas presentes en la zona de estudio para los años 2014 y 2021.	34
Figura 10. Evolución del área de las coberturas en porcentaje presentes en la zona de estudio para los años 2014 y 2021.	34
Figura 11. Evolución del número de fragmentos (NUMP) de cada clase del paisaje, a travez de los años.	42
Figura 12. Métricas del paisaje número de parches para el año 2014.....	43
Figura 13. Métrica del paisaje numero de parches para el año 2021.....	44
Figura 14. Métrica del paisaje del vecino más cercano para el año 2014	46
Figura 15. Métrica del paisaje del vecino más cercano para el año 2021	47

Resumen

Para la zona de las cuencas del caño Cristalino y caño Aguas Claras, ubicadas en el municipio de Cubarral en el departamento del Meta, se llevó a cabo un análisis multitemporal y de métricas del paisaje, a partir de un análisis visual sobre imágenes satelitales landsat 8, con lo que se construyeron los mapas de coberturas correspondientes a los años 2014 y 2021. A partir de este análisis se logra determinar el grado de conectividad de la cobertura vegetal de interés, mostrando los corredores principales de tránsito para la fauna silvestre presente en el área de estudio. Mediante este análisis se puede deducir la distribución, concentración y el grado de fragmentación que presentan los diferentes tipos coberturas presentes en la zona; evidenciando la evolución del estado de la cobertura vegetal y la conectividad del paisaje, siendo así plasmados en mapas para el año 2014 y 2021. Los resultados de este estudio dan un acercamiento en conocer el estado de conservación del bosque, debido a que es una zona de interés ambiental, ya que se encuentra colindando con el Parque Nacional Natural de Sumapaz y a su vez es una zona de recarga hídrica que abastece el acueducto municipal de Cubarral, por tanto, debe ser un área de protección para los ecosistemas, las fuentes hídricas y la fauna silvestre.

Introducción

El incremento de la población humana, conlleva a un aumento de la demanda recursos naturales, acelerando e incrementando el impacto ambiental en los ecosistemas (Pettorelli et al., 2011) como los cambios en las coberturas vegetales que reducen el hábitat de algunas especies (fauna y flora). Con base en estos problemas ambientales se hace necesario disponer de herramientas como los SIG, los cuales permiten estudiar estas zonas a partir de imágenes satelitales, brindando una mejor información del estado de las coberturas terrestres a escala espacial y temporal (Flórez-Yepes et al., 2017).

En el área de estudio, las condiciones morfológicas y biológicas se han visto afectadas debido al aumento de sistemas de producción animal (ganadería de doble propósito) y vegetal (cultivos comerciales de arroz) (Cormacarena, 2016), por lo que se hace necesaria la generación de información correspondiente al uso y manejo de los suelos, así como el impacto ambiental en esta zona.

Con el objetivo de identificar los cambios en el uso del suelo en el área de estudio, se lleva a cabo un análisis multitemporal, en el cual se identifican las coberturas de bosque, pastos, cultivos y cuerpos de agua dulce; realizando un monitoreo principalmente a la cobertura de bosque, la cual es vital para asegurar la oferta del recurso hídrico a la población del casco urbano del municipio de Cubarral.

El propósito de este estudio es establecer la evolución en la cobertura de suelos mediante un análisis multitemporal en el cual se realiza la clasificación de coberturas usando la metodología de Corine Land Cover en las imágenes satelitales landsat 8 para los años 2014 y 2021. A partir del mapa de cobertura se lleva a cabo el cálculo de las métricas del paisaje con el objetivo de conocer

el grado de fragmentación de la cobertura de bosques en la zona de recarga hidrológica de Aguas claras y Caño Cristalino, las cuales abarcan un área de 3540 hectáreas para la cuenca de Aguas Claras y 703,58 hectáreas para la cuenca de caño Cristalino (Cormacarena, 2016). Todos estos datos son procesados en los programas Erdas y Arcgis.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Evaluar el estado de conservación de la cobertura vegetal en la reserva hidrológica compuesta por las microcuencas de los caños Aguas claras y Caño Cristalino, en el municipio de Cubarral para los años 2014 y 2021.

1.2 Objetivos específicos

- Identificar las coberturas presentes en la zona recarga hídrica Aguas Claras y caño Cristalino en los años 2014 y 2021.
- Analizar el cambio de coberturas entre los años 2014 y 2021.
- Identificar el estado de conectividad del bosque en la zona de estudio.

2. Marco teórico

Colombia acredita el título de ser el segundo país más biodiverso entre las 12 naciones más biodiversas del planeta. El primer lugar lo ocupa Brasil, a la fecha Colombia registra 54.871 especies, con 3.625 especies exclusivas, 66 aves, 1500 plantas, 1543 orquídeas, 32 biomas terrestres y 314 tipos de ecosistemas, entre otras características que resaltan la biodiversidad de Colombia. Sin embargo, esta biodiversidad se ve amenazada por factores como el cambio climático, la contaminación, la sobre explotación de recursos, la introducción de especies invasoras y la deforestación, esta última amenaza se ha concentrado en los departamentos de Caquetá, Nariño, Meta, Chocó, Putumayo y Cauca. Los registros en pérdida de cobertura de bosque desde el año 1990 hasta el año 2010, mencionan que Colombia perdió 6 millones de hectáreas en bosque (FAO, 2021). Para el año 2020 Colombia pierde 1.718 km² de bosque, un área que se comparó con la extensión de territorio de la ciudad de Bogotá, la cual tiene una superficie de 1.775 km². Los departamentos más deforestados en el año 2020 son Caquetá, Guaviare, Putumayo y Meta en el sur y el sureste, así como Antioquia en el noroeste (Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, 2021). Para conocer los cambios en la cobertura de bosque el sensado remoto es el método de evaluación de la deforestación más usado en Colombia. De acuerdo al “*Estudio multitemporal de la deforestación en Colombia utilizando procesamiento de imágenes*” realizado por Parody y Zuleta (2015); quienes concluyen que el sensado remoto es usado por instituciones de gobierno y no oficiales, y es considerada la herramienta más óptima para la elaboración de mapas de uso de bosques, usos del suelo y cambios de cobertura. Debido a que la fotografías

aéreas digital es una buena herramienta pero solo es usada para analizar áreas pequeñas, aunque representan una alta resolución espacial (Parody & Zapata, 2015) .

En Colombia las zonas utilizadas para el desarrollo de ganadería, agricultura, minería y entre otras actividades, tienden a generar alteraciones en el tipo del suelo, lo que conlleva un impacto ambiental en el área donde se encuentran. Existen estudios de análisis multitemporal a partir del análisis de imágenes satelitales, mediante los cuales se logra determinar cómo se encuentran las coberturas terrestres actuales, con respecto a temporadas previas al desarrollo de actividades (ganadería, etc.) en el territorio. El análisis multitemporal ha permitido el desarrollo de estudios donde se analiza el impacto ambiental generado por diferentes actividades económicas, como es el caso del estudio desarrollado por (Flórez-Yepes et al., 2017); donde se analiza el impacto ambiental generado por la minería de oro presente en la zona de Maltería en Manizales, en el cual hace uso de los SIG para el procesamiento de imágenes satelitales; estableciendo cómo ha variado la cobertura vegetal en un rango de tiempo comprendido entre los años 1998 y 2010.

Mediante el análisis multitemporal se logra establecer los cambios de coberturas en un intervalo de tiempo de una zona de interés, lo que permite generar un valor cuantitativo de cómo el área de la zona estudiada ha sido modificada, o si ésta ha cambiado a otro tipo de cobertura (Velandia, 2019).

Para este tipo de análisis es importante contar con información adicional, para complementar o validar este estudio, por lo cual se usan fuentes como: cartografía básica, topográfica, mapas temáticos de cobertura del territorio e información estadística de uso de suelos y cobertura, entre otros.

Para lograr el objetivo planteado de conocer el grado de transformación de las coberturas presentes en el área de estudio en el intervalo de años analizados (2014-2021) se emplean recursos como imágenes satelitales para realizar el análisis multitemporal y las métricas del paisaje.

2.1 El Paisaje

Un paisaje se puede definir como un área de tierra que contiene un mosaico de parches o elementos del paisaje; esta área terrestre se encuentra compuesta por un grupo de ecosistemas que interactúan y que se repite de forma similar en todas partes (Mcgarigal, 2015). Este paisaje puede delimitarse con base en unidades geográficas, ecológicas o administrativas como por ejemplo, una cuenca, un área urbana o un condado (Wu, 2013).

2.1.1 Elementos del paisaje

Según (Ingegnoli, 2015), el paisaje se encuentra compuesto por tres elementos, descritos de la siguiente manera:

Parche: representa un área superficial no lineal, la cual se diferencia en apariencia y sustancia de su entorno. Estos parches se generan como respuesta a cambios ambientales, los cuales se van transformando con el tiempo. Estos se pueden clasificar por tamaños, forma y cantidad. La extensión de un parche no influye en el flujo de energía y nutrientes de su ecosistema.

Fragmentos: son las diferencias de unidades morfológicas que se pueden diferenciar en el territorio (Gouesnard et al., 1996).

Corredor: consta de una franja de tierra que puede ser diferenciada de los elementos adyacentes del paisaje (matriz), con forma y dirección variable (Etter, 1991). Estas franjas aisladas, generalmente se encuentran unidas a un parche de vegetación similar (Mcgarigal, 2015).

Los corredores se pueden diferenciar por su amplitud (ancho-delgado) y grado de conectividad. Los corredores se pueden clasificar en corredores de arroyos (canal), corredores de línea (límites de parches, carreteras, caminos, etc.) y corredores de banda, en donde la amplitud del corredor permite el desarrollo de condiciones internas (Ingegnoli, 2015).

Matriz: representa el elemento más extenso y conectado del paisaje. Desempeña el rol dominante en el funcionamiento del paisaje. Las matrices pueden ser de tipo continuo (un solo tipo de elemento dominante), discontinuo (más de un tipo de elemento dominantes) y con corredores conectados de funciones predominantes (Ingegnoli, 2015).

2.2 Conectividad del paisaje

La conectividad dentro de un paisaje, corresponde al grado en que este paisaje ayuda o dificulta el movimiento de los diferentes organismos dentro de un sistema. A más movimiento dentro del área mayor será el grado de conectividad, la cual se presenta en diferentes escalas dentro de la naturaleza. Este movimiento se puede dar por diferentes medios y formas, como lo son: el suelo, fuego, viento, agua, interacciones ecológicas; así como también por movimiento e interacciones de animales y plantas (Crooks & Sanjayan, 2010).

(Bennett, 2003) y (Tischendorf & Fahrig, 20007) definen dos componentes principales en la conectividad:

- Componente físico o estructural, el cual corresponde a la disposición espacial de los diferentes tipos de hábitat en el paisaje, y se mide analizando la estructura del paisaje sin tomar en cuenta los movimientos de los organismos o los procesos en el paisaje.
- Componente funcional, el cual representa la respuesta de los comportamientos de los individuos, especies o procesos ecológicos a la estructura física del paisaje. Este

componente además de requerir la información espacial sobre los hábitats o los elementos del paisaje, debe tener información sobre los movimientos de los organismos, así como de los procesos en el paisaje.

Así, según (Taylor et al., 1993) la conectividad agrupa los elementos dentro del paisaje que permiten o impiden que los diferentes organismos presentes en un hábitat se muevan entre parcelas (parches). Su estudio se centra en conocer las distancias que existen entre un parche, al parche más cercano. Con base en esto, es requerido cuantificar y conocer las métricas de la conectividad; ya que a partir de esto se pueden tomar decisiones futuras sobre conservación de zonas de interés para su protección (Calabrese & Fagan, 2004).

2.3 Métricas del paisaje

Para comprender los cambios en las coberturas de bosques en un ecosistema, es importante identificar áreas fragmentadas que identifiquen las presiones que tienen las áreas de bosque. Una forma de identificar la fragmentación en los bosques es por medio de la comparación de paisajes que identifican en el tiempo y relaciona patrones del paisaje con la función ecológica y es necesario la aplicación de métodos cuantitativos (Turner, 1989). Estos métodos incluyen la mediación de indicadores o “Métricas del paisaje” las cuales contribuyen a la detección de patrones de cambio no visibles a simple vista. (Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO), Universidad Nacional de Salta, 2012)

Las métricas del paisaje cuantifican un patrón respecto a un único paisaje delimitado, para comprender la relación entre patrón y proceso (Mcgarigal, 2015). A partir del cálculo de las métricas del paisaje se puede caracterizar y comparar los diferentes patrones espaciales de los paisajes, lo que permite establecer los cambios en los mismos, y así relacionarlos con los procesos

ecológicos de un territorio (H. Li & Wu, 2004). Sin embargo, las métricas del paisaje pueden estar limitadas por las características de los datos (escala, índices) en los métodos de análisis espacial (H. Li & Wu, 2004). (Calabrese & Fagan, 2004), clasifican las métricas del paisaje de la siguiente manera:

Conectividad estructural: hace referencia a las características físicas del paisaje, como lo son el tamaño, forma y ubicación de los parches. Esta clasificación no tiene en cuenta la capacidad de dispersión de los parches.

Conectividad potencial: tiene en cuenta las propiedades físicas del paisaje y la capacidad de dispersión de un parche, para predecir la capacidad de dispersión y qué tan conectado estará un paisaje o parche de cierta especie.

Conectividad real: se enfoca en la determinación de individuos en movimiento dentro o fuera de parches focales, o a través de un paisaje. Permite hacer una estimación de los vínculos existentes entre elementos del paisaje o los parches de hábitat.

Se identifican las métricas del paisaje con las cuales se puede conocer la biodiversidad del paisaje, el área de las coberturas, la dispersión entre parches, la conectividad entre coberturas y finalmente conocer el grado de fragmentación en cada cobertura, a continuación se describe la funcionalidad de cada métrica del paisaje hacer usa en esta investigación.

Métrica de diversidad:

Índice de diversidad de Shannon: evalúa la diversidad del parche, para esto se aplica la siguiente ecuación

$$SHDI = - \sum_{j=1}^m P_i \ln P_i$$

Ecuación 1

Donde

P_i = proporción del paisaje ocupado por el tipo de parche i .

Su valor es 0 cuando se presenta un solo tipo de parche en todo el espacio, y aumenta a medida que van aumentando los diferentes tipos de parche y la equidad de distribución de estos en el área de estudio.

Métrica de área:

Área: corresponde al área de los fragmentos (parche)

$$\text{Área (ha)} = a_{ij} \left(\frac{1}{10000} \right) \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde

a_{ij} = área (m²) del parche ij .

Porcentaje del paisaje (%): representa la suma de las áreas (m²) de todos los parches del tipo de cobertura correspondiente, dividida por el área total del paisaje (m²), multiplicada por 100 (para convertir a un porcentaje); en otras palabras, PLAND es igual al porcentaje del paisaje compuesto por el tipo de cobertura correspondiente.

$$P_i = \left[\frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{A} \right] * 100 \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde

P_i = proporción del paisaje ocupado por tipo de cobertura (clase) i .

a_{ij} = área (m²) del parche (fragmento) ij .

A = área total del paisaje (m²).

P_i varía en un rango de 0 a 100, y estos valores tienden a cero cuando el tipo de parche correspondiente (clase) se vuelve cada vez más raro en el paisaje. Y tiende hacia 100 cuando solo se observa un único fragmento o parche dentro de todo el paisaje, y se observa como un solo parche dentro de la imagen.

Métricas de densidad, tamaño y variabilidad:

Desviación estándar del tamaño de los parches (ha): se obtiene al sacar la raíz a la suma de la desviación al cuadrado de cada valor de la métrica (forma, tamaño, distancia) del valor promedio de la métrica del tipo de parche correspondiente, dividido por el número de parches del mismo tipo, es decir la raíz cuadrada del error (desviación del promedio de la métrica correspondiente).

$$SD = \sqrt{\left(\sum_{j=1}^n \left[X_{ij} - \left(\frac{\sum_{j=1}^n x_{ij}}{n_i} \right) \right]^2 \right) / n_i}$$

Ecuación 7

Donde

x_{ij} = PS del parche j de la clase i

n_i = número de parches de la clase i

Métricas de forma

Índice de forma: es igual al perímetro del parche (m) dividido por la raíz cuadrada del área del parche (m²), ajustado por una constante para ajustar a un estándar cuadrado.

$$shape = \frac{P_{ij}}{\min P_{ij}} \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde

shape: índice de forma

P_{ij} : perímetro (m) del parche del fragmento ij en términos de número de celdas de superficie

$\min P_{ij}$ = perímetro mínimo del fragmento ij en términos de número de celdas de superficie.

Este valor se aproxima a 1 si la forma del fragmento es cuadrada o semicuadrada. Se va haciendo mayor si la forma del fragmento se presenta de forma irregular.

Métricas de conectividad y aislamiento

Índice de Yuxtaposición: mide la continuidad entre los diferentes fragmentos del área de estudio.

$$IJI = - \sum_{j=1}^n \left[\left(\frac{P_{ij}}{\sum_{j=1}^n P_{ij}} \right) \ln \left(\frac{P_{ij}}{\sum_{j=1}^n P_{ij}} \right) \right] / \ln(n - j) * 100 \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde,

n = número de tipos de fragmentos (clases) en el paisaje

j = número de clases o tipos de fragmento

P_{ij} = longitud total del borde dentro del paisaje entre clases (i) y K.

Este valor tiende a 0 donde la distribución de la continuidad de los fragmentos es desigual. Se aproxima a 100 donde todos los tipos de fragmentos presentan la misma continuidad.

Media de la distancia del vecino más cercano (MNN): mide la distancia más corta a un parche similar (borde a borde). La distancia media del vecino más cercano es el promedio de estas distancias en metros, para clases individuales a nivel de clase.

$$MNN = \frac{\sum_{j=1}^n p_{ij}}{n_i}$$

p_{ij} : distancia en metros más corta desde un fragmento a otro de la misma clase.

n_i : número de fragmentos de cada clase i en el paisaje, con un vecino cercano.

Índice de proximidad media (MPI): El índice de proximidad medio es una medida del grado de aislamiento y fragmentación de un parche. MPI usa la estadística de vecino más cercano. El umbral de distancia predeterminado es 1.000.000.

$$MPI = \frac{\sum_{j=1}^n \frac{\sum_{s=1}^n p_{ijs}}{(h_{ijs})^2}}{n_i}$$

Donde:

p_{ijs} = Área (m²) del fragmento ijs con su vecino específico (m) del fragmento ij

h_{ijs} = Distancia (m) entre los fragmentos ijs - ij , con base en la distancia de borde a borde

$n = n_i$ = Número de fragmentos (clase i)

j = Fragmento

i = Clase

s = fragmentos con vecino especificado

m = cuantifica los diferentes tipos de fragmento (clases) que tiene un paisaje, sin tener en cuenta el borde del paisaje presente.

3 Estado del conocimiento

En Colombia las zonas utilizadas para el desarrollo de ganadería, agricultura, minería y entre otras actividades, tienden a generar alteraciones en el tipo del suelo, lo que conlleva un impacto ambiental en el área donde se encuentran. Existen estudios de análisis multitemporal a partir del análisis de imágenes satelitales, mediante los cuales se logra determinar cómo se encuentran las coberturas terrestres actuales, con respecto a temporadas previas al desarrollo de actividades (ganadería, etc.) en el territorio. El análisis multitemporal ha permitido el desarrollo de estudios donde se analiza el impacto ambiental generado por diferentes actividades económicas, como es el caso del estudio desarrollado por (Flórez-Yepes et al., 2017); donde se analiza el impacto ambiental generado por la minería de oro presente en la zona de Maltería en Manizales, en el cual hace uso de los SIG para el procesamiento de imágenes satelitales; estableciendo cómo ha variado la cobertura vegetal, y como se han visto afectadas las zonas boscosas, como respuesta a sistemas de producción en un rango de tiempo comprendido entre los años 1998 y 2010.

Estos análisis multitemporales también se han llevado a cabo para cuantificar las alteraciones producidas sobre la cobertura vegetal, así como bosques de galería en el área del proyecto Hidroeléctrico Ituango en los años 2009-2019, mostrando como resultado las modificaciones para la fauna y flora de esta zona (Velandia, 2019).

Así mismo en (Toro et al., 2014), desarrollaron un estudio cuantitativo de las coberturas vegetales y boscosas, mediante el análisis visual de imágenes satelitales del año 2013 en el municipio de Envigado, tomando como referencia el mapa de cobertura correspondiente a los años 1996 y 2003 realizados previamente en la zona de análisis. También llevaron a cabo un estudio

de métricas del paisaje, de donde concluyen que la zona ha pasado por un proceso de fragmentación, donde también se ha presentado una mezcla de diferentes tipos de coberturas.

(Acuña, 2010), llevo a cabo el análisis de cobertura y métricas del paisaje en un área ubicada en el altiplano Cundiboyacense, para así, verificar el grado de conservación y fragmentación de la zona de bosques, con el fin de contemplar la conservación de algunas áreas de la zona de interés.

De igual forma (Hernandez, 2017), analiza los cambios presentes en la cobertura terrestre mediante un análisis multitemporal en los años 2001 y 2015, de la zona inundación de la represa de Hidrosogamoso en el departamento de Santander a partir del análisis de imágenes satelitales. En este estudio se pudo observar como la construcción de la represa afecto las coberturas de rastrojo, bosques primarios y bosques secundarios.

(Velásquez, 2017), mediante un análisis multitemporal y de métricas del paisaje, establece que las cuencas de cabecera de Medellín, presentan una alta fragmentación, por ende, una baja conectividad de las coberturas vegetales como la de bosques, como una respuesta a la influencia de los sistemas productivos.

(Alatorre et al., 2011), llevan a cabo un análisis multitemporal de imágenes Landsat, para determinar la evolución de la cobertura vegetal, en un intervalo de tiempo comprendido entre los años 1984 y 2007, analizadas en las estaciones de primavera y verano, en el área de los Pirineos Españoles.

(Zhang et al., 2020), analizan el cambio del patrón del paisaje como respuesta al desarrollo de un proyecto hidroeléctrico y de conservación de agua, mediante el análisis de métricas del paisaje a partir del análisis de imágenes Landsat., en el intervalo de tiempo de 1995-2015.

4 Metodología

La figura 1 presenta la forma en cómo se estructura el desarrollo del presente estudio, así como la información empleada para la obtención de los diferentes resultados y productos.

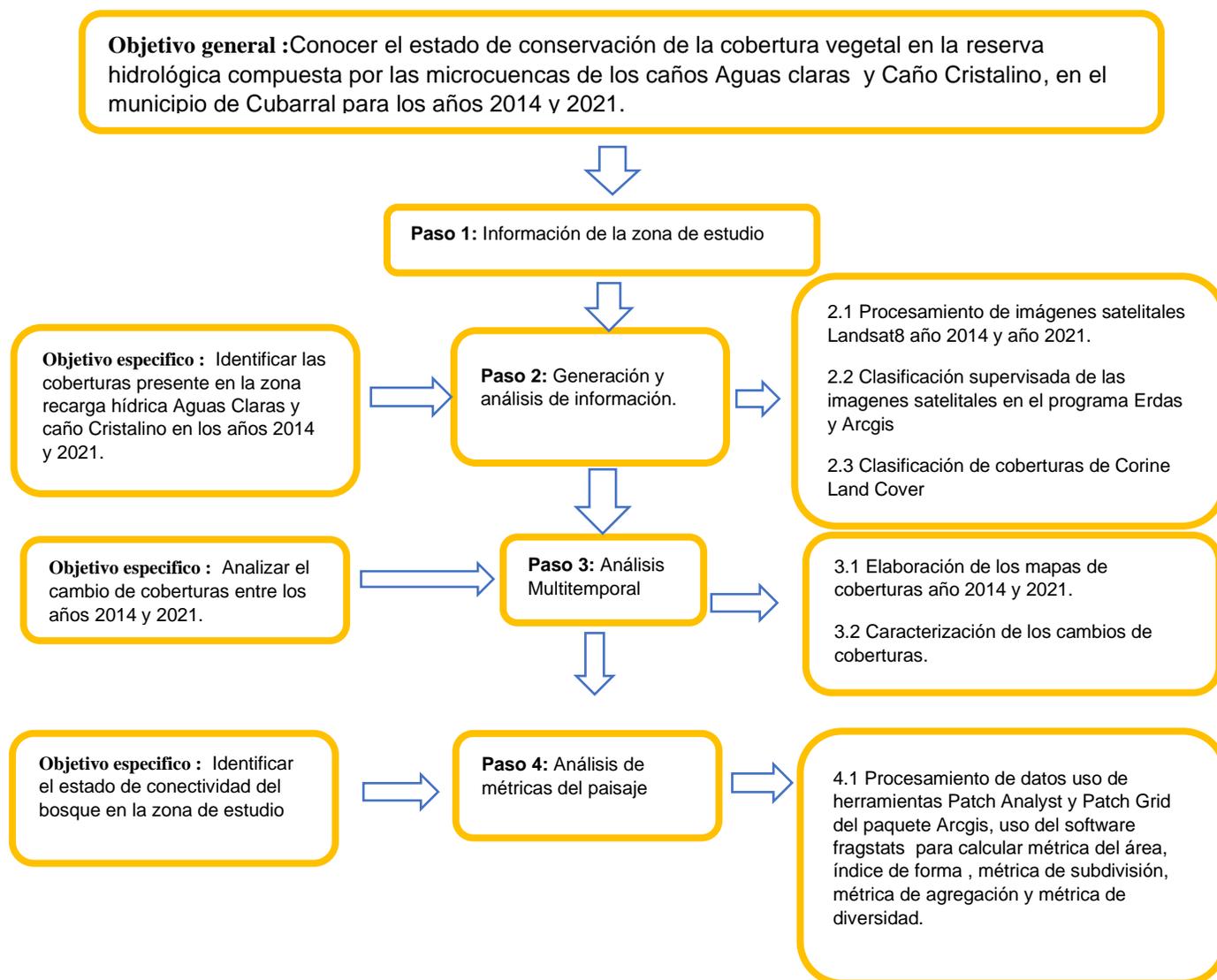


Figura 1. Diagrama de diseño de la metodología. Fuente elaboración propia.

4.1 Área de estudio

La zona de interés se encuentra ubicada en el municipio de Cubarral en el departamento del Meta, este municipio es de gran importancia ambiental debido a que concentra parte del área del Parque Nacional Natural de Sumapáz, de acuerdo a la resolución 153 de 06/06/1997. Dentro del municipio de Cubarral el parque natural de Sumapáz, tiene una extensión aproximada de 78485 hectáreas. El área objeto de estudio son las cuencas del caño Cristalino y caño Aguas Claras, debido a que son las cuencas que abastecen el acueducto municipal del casco urbano San Luis de Cubarral, por tanto, las áreas de bosques que se encuentran dentro de los polígonos de las cuencas Caño Cristalino y Aguas Claras son de importancia para la conservación del recurso agua, también para la protección de la biodiversidad en el área (CORMACARENA, 2016).

En la figura 2, se observan las veredas que se encuentran delimitando el polígono de las cuencas Aguas Claras y caño Cristalino son: la vereda Vergel alto, Mesa Redonda, El Vergel y Aguas Claras. La característica florística dentro del área de estudio se encuentran bosques de galerías, sin embargo, estos han sido amenazados por la actividad ganadera en la zona la cual reemplaza la cobertura del bosque por pastos (CORMACARENA, 2016). La zona de estudio en la cual se identifican los cambios de coberturas en el uso del suelo es el área de recarga hídrica de Aguas Claras y caño Cristalino, esta zona de recarga hídrica limita con el parque nacional natural Sumapaz, este parque alberga el complejo de paramos más grande del mundo, cuenta con una extensión de paramos de 142.112 hectáreas protegidas, sin embargo, su extensión total es de 333.420 hectáreas según el instituto Alexander Van Humboldt (2012). El área del parque de Sumapaz en el municipio de Cubarral tiene una extensión de 78485 hectáreas de acuerdo a la calculadora geométrica del programa ArcGIS (ver figura 3).

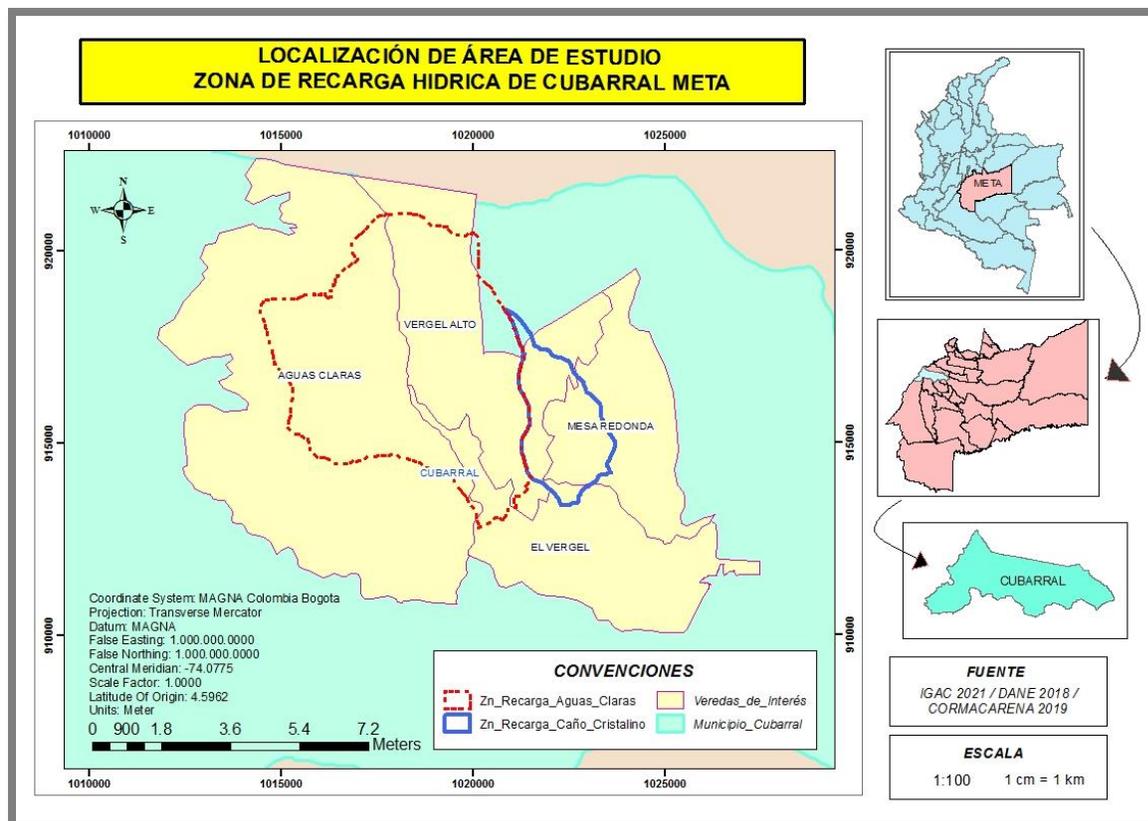


Figura 2. Localización área de interés del proyecto de investigación. **Fuentes:** (CORMACARENA, DANE, 2020). Zona de recarga de agua, Veredas versión 2020. Recuperado de <https://geoportal.dane.gov.co/servicios/descarga-y-metadatos/visor-descarga-refveredas/>. La capa de zona de recarga de agua es entregada por el grupo SIG de Cormacarena



Figura 3. Área del parque nacional natural Sumapaz en el municipio de Cubarral. Fuente de la capa. Fuentes: (SIAC, CORMACARENA, DANE, 2020). Sistema Nacional de Áreas Protegidas, Zona de recarga de agua, Veredas versión 2020. Recuperado de <http://www.siac.gov.co/catalogo-de-mapas> y <https://geoportal.dane.gov.co/servicios/descarga-y-metadatos/visor-descarga-refveredas/>

4.2 Generación y análisis de información

4.2.1 Procesamiento de las imágenes

A partir del Geoportal del servicio Geológico de los Estados Unidos USGS (<http://earthexplorer.usgs.gov/>), se descargó la imagen satelital del satélite Landsat 8, correspondientes a los años 2014 y 2021 ubicadas en el municipio de Cubarral en el departamento del Meta, Colombia. Para la selección de la imagen se tuvo en cuenta, un bajo grado de nubosidad en la zona, ya que esto puede afectar la interpretación de la misma. Se descargó un total de 11 bandas, de las cuales se trabajó con las Bandas 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7; 8 y sus características se pueden observar en la tabla 1.

Tabla 1. Característica de las bandas 1-8 de Landsat 8.

Banda espectral (OLI)	Longitud de onda (μm)	Resolución espacial en metros	Descripción
Banda 1	0.433 - 0.453	30	Costero / Aerosol
Banda 2	0.450 - 0.515	30	Azul
Banda 3	0.525 - 0.600	30	Verde
Banda 4	0.630 - 0.680	30	Rojo
Banda 5	0.845 - 0.885	30	Infrarojo Cercano
Banda 6	1.560 - 1.660	30	Infrarrojo de longitud de onda corta
Banda 7	2.100 - 2.300	30	Infrarrojo de longitud de onda corta
Banda 8	0.500 - 0.680	15	Pancromática
Banda 9	1.360 - 1.390	30	Cirrus
Banda 10	10.30 - 11.30	100	Infrarrojo de longitud de onda larga
Banda 11	11.50 - 12.50	100	Infrarrojo de longitud de onda larga

Una vez descargadas las imágenes Landsat 8, se realizó un cambio de formato TIF a .JPG de las bandas 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7, mediante el procedimiento de composite bands en el software ArcGIS, de donde se obtiene una imagen multiespectral de salida con las 7 bandas agrupadas. Ya con la imagen generada en formato JPG, se llevó a cabo una re-proyección en el programa Erdas Imagen, donde se trabajó con el sistema de referencia espacial Universal Transverse Mercatos (UTM) y con el Datum WGS 84 UTM Zona 18 Norte, EPSG 32618. Seguido de esto se definió un tamaño de pixel de 15 metros (bandas 1-7), igualando el tamaño de pixel de la imagen pancromática. Ajustado el valor del pixel (15m) sobre la imagen compuesta por las 7 bandas se realizó un re-escalamiento de esta imagen, pasando de 16 bits a 8 bits. Con el fin de obtener una imagen con una resolución espacial mejorada. Posterior a esto se llevó a cabo la unión de la imagen multiespectral (bandas 1-7) con la imagen pancromática (banda 8).

4.3 Generación del mapa de coberturas

A partir de la imagen generada de la unión de las 8 bandas se llevó a cabo un análisis visual para la caracterización de la cobertura vegetal presente en la zona de estudio, en donde se estableció

la presencia o ausencia de la cobertura en la zona de interés. Esto se llevó a cabo mediante una clasificación supervisada, en donde sobre la imagen se definieron los tipos de coberturas presentes en el área de interés, las cuales se denominaron áreas de entrenamiento y se generó una clasificación temática de la zona estudiada. La imagen con la clasificación supervisada realizada en el programa Erdas es convertida en formato vector y exportada en ArcGIS, en la cual se delimito al área de estudio de los polígonos de la zona de recarga hídrica.

Las clases de coberturas identificadas se establecieron con base a la clasificación Corine Land Cover (tabla 2), adaptada para Colombia (Ideam, 2010), como se puede observar en la figura 4, donde se empleo la combinación **564** para una clasificación visual de la cobertura de cuerpos de agua dulce, sin embargo también se pueden observar las coberturas de pastos, bosques y cultivos.

Tabla 2. Coberturas de la tierra según CORINE Land Cover, adaptada para Colombia. Tomada y modificada de IDEAM, 2010. Fuente el autor.

código	Cobertura	Clasificación
2.3.1	Pastos limpios	Pl
2.3.2	Pastos arbolados	Pa
2.3.3	Pastos enmalezados	Pe
2.4.1	Mosaico de cultivos	Mc
2.4.2	Mosaico de pastos y cultivos	Mpc
2.4.3	Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	Mcpe
2.4.4	Mosaico de pastos con espacios naturales	Mpe
2.4.5	Mosaico de cultivos y espacios naturales	Mce
3.1.1	Bosque denso	Bd
3.1.2	Bosque abierto	Ba
3.1.3	Bosque fragmentado	Bfr
3.1.4	Bosque de galería y ripario	Bgr
3.1.5	Plantación forestal	Bfo
3.2.1.1	Herbazal denso	Hd
3.2.1.2	Herbazal abierto	Ha

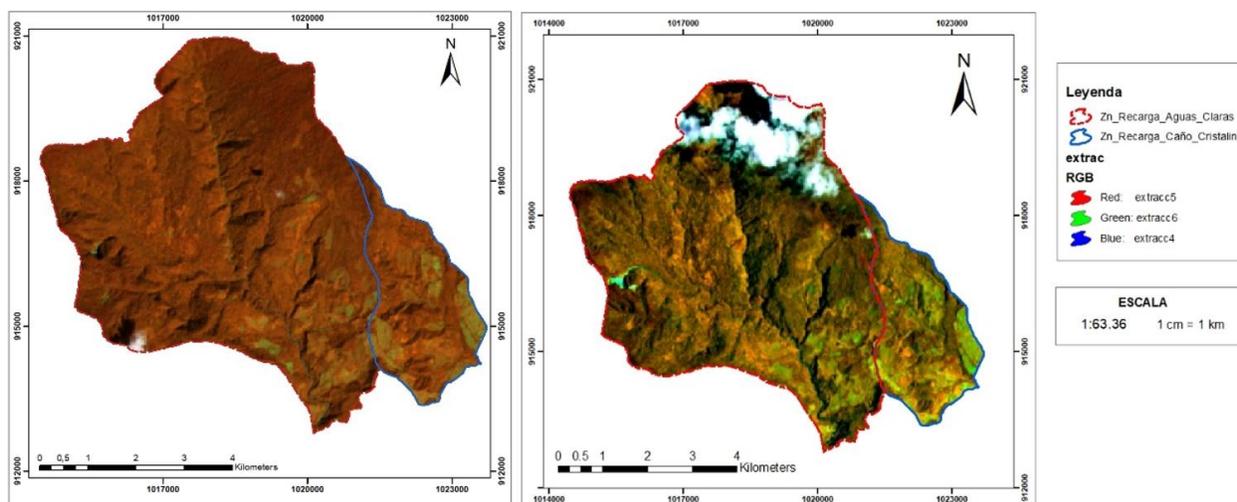


Figura 4. Imágenes de la zona de estudio, Landsat 8, combinación 5 6 4, para adaptación de la metodología Corine Land Cover. La imagen al costado izquierdo corresponde al año 2014 y la imagen al costado derecho corresponde al año 2021.

4.3.1 Análisis multitemporal de las coberturas

A partir de los mapas de coberturas generados previamente se llevó a cabo el análisis multitemporal sobre los mismos, para determinar el comportamiento de la cobertura vegetal con respecto a los años 2014 y 2021. Donde se establecía si estas han aumentado, disminuido, se mantiene igual o han sido modificadas a otro tipo de cobertura. Esto se obtuvo a partir de la superposición de los dos mapas de coberturas (años 2014-2021).

4.3.2 Análisis de la conectividad del paisaje

A partir de los mapas de cobertura para cada año, se identificó el grado de conectividad ecológica dentro de la zona de estudio, en donde se tuvo en cuenta las coberturas vegetales como boscosa ya que esta representa los corredores ecológicos principales de conectividad. Con el propósito de **cuantificar la conectividad estructural del paisaje** para cada uno de los periodos establecidos se tuvo en cuenta los siguientes índices del paisaje: métrica de área, índice de forma, de distancia,

vecindad y porcentaje (%) del paisaje; estas medidas se derivan principalmente de estadística matemática (X. Li et al., 2005).

4.2.3 Análisis de las métricas del paisaje

Una vez obtenidos los mapas de coberturas de cada año estudiado, se procedió a la obtención de las métricas del paisaje para la cobertura vegetal, mediante las herramientas **Patch Analyst** y **Patch Grid** del paquete ArcGIS 10.6. La mayoría de las métricas del paisaje se basan en las características geométricas de los paisajes y representan las medidas cuantitativas de los patrones espaciales (Wu, 2013). A partir de estas medidas se logró describir la heterogeneidad del paisaje (Hargis et al., 1998).

Para este estudio se caracterizaron las métricas del paisaje con base a la clasificación de (Mcgarigal, 2015), la cuales fueron: métrica de diversidad, área, porcentaje del paisaje, métricas de densidad, tamaño y variabilidad, métricas de conectividad y aislamiento.

5 Resultados y discusión

5.1 Análisis multitemporal

5.1.1 Mapa de coberturas, año 2014

Para el año 2014 el área de estudio presentó coberturas tipo bosque denso, pastos limpios, cultivos y cuerpo de agua dulce. En la tabla 3 se observa el área en hectáreas y el porcentaje de cada cobertura.

Tabla 3. Tipos de coberturas presentes en el área de estudio para el año 2014.

Cobertura	caño cristalino		Caño Aguas claras		Total, año 2014	
	Ha	%	Ha	%	Ha	%
Bosque	477,79	67,91	3254,93	91,25	3732,71	87,97
Pastos	180,12	25,60	233,52	6,60	413,64	9,75
Cultivo	45,67	6,49	6,02	0,17	51,69	1,22

Cuerpo de agua dulce			44,96	1,27	44,96	1,06
Total	703,58	100,00	3539,43	100,00	4243,01	100,00

Para el año 2014 la cobertura de bosque presenta un área de 3732,71 hectáreas total, donde un 477,79 ha se ubica en el área de caño cristalino, y un área de 3254,93 hectáreas se ubica en la zona del Caño Aguas Claras, siendo la cobertura con mayor área en la zona de estudio. Seguido a esta, la cobertura de pastos abarca un área total de 413,64 hectáreas total en la zona de estudio, esta abarca un área igual a 180,12 hectáreas en la zona de Caño Cristalino, y 233,52 ha en el área de Aguas Claras.

La cobertura de cultivo se dispone en un área de 45,67 hectáreas en la zona de Caño Cristalino, y un área de 6,60 hectáreas en el Caño de Aguas Claras, seguido de esta se encuentra la cobertura de cuerpos de agua dulce con un área total de 44,96 hectáreas, ubicada en la zona del Caño de Aguas Claras.

La figura 5 evidencia el porcentaje de ocupación de la cobertura de bosque (87,97%), pastos (9,75%), cultivo (1,22%) y cuerpos de agua dulce (1,06%) en el área total de estudio.

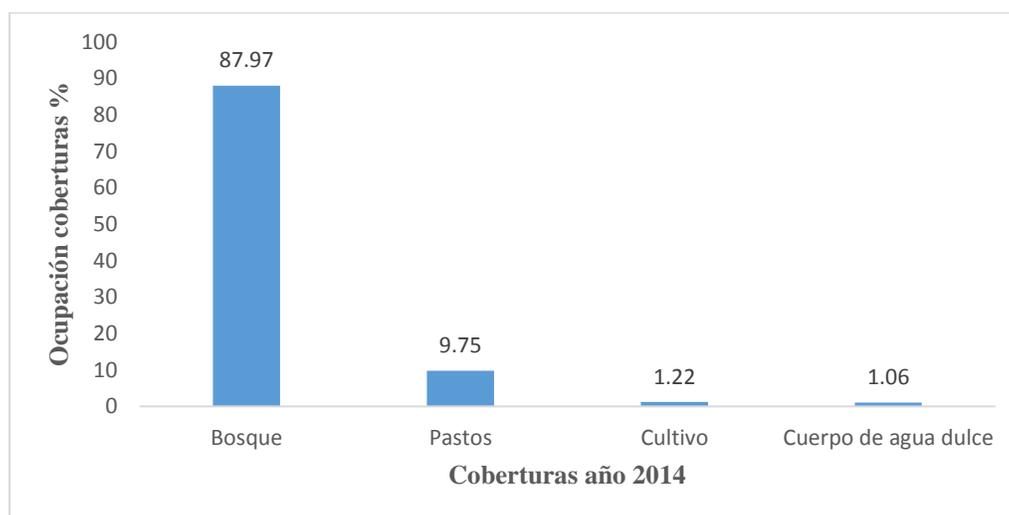


Figura 5. Áreas en porcentaje de los tipos de coberturas para el año 2014.

Para observar la distribución área de las coberturas presentes en la zona de estudio de las cuencas Aguas Claras y Caño Cristalino, en la figura 6 se evidencia su distribución para el año 2014 en el área de Cubarral.

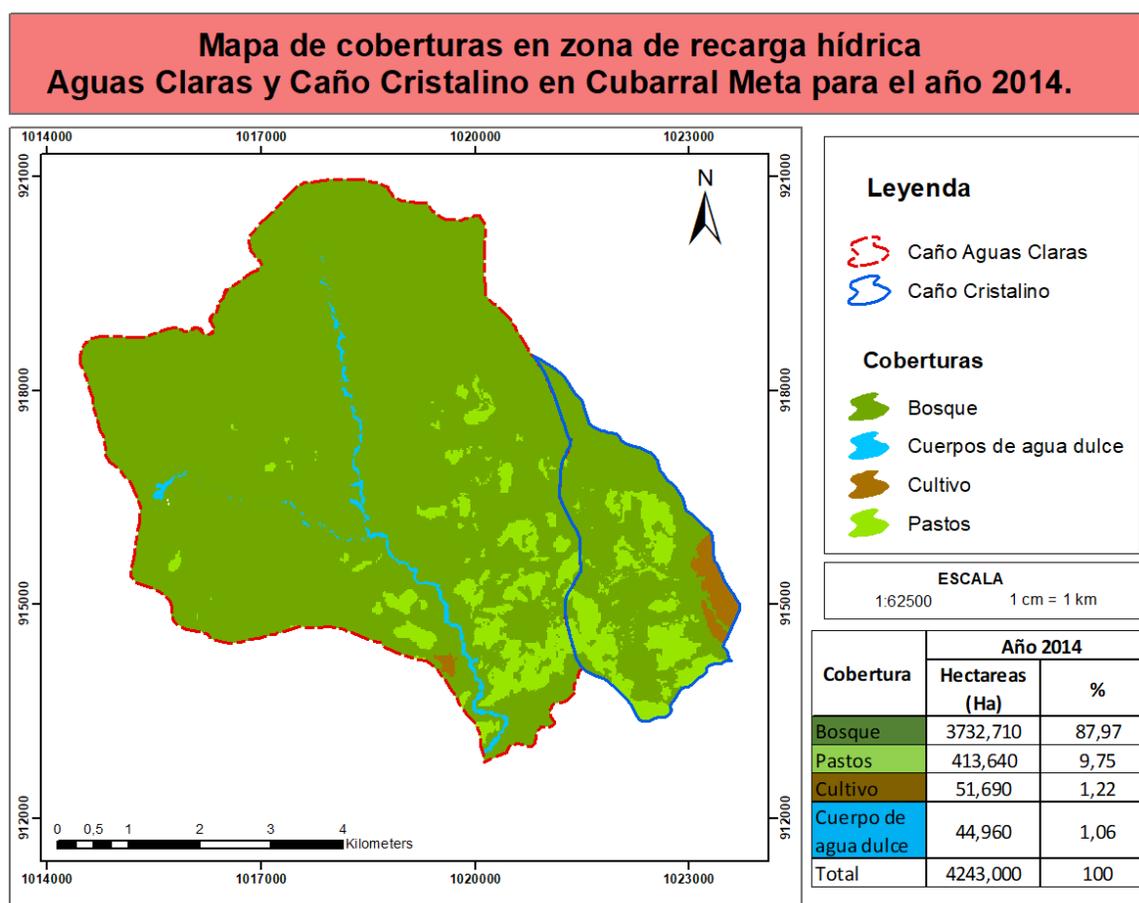


Figura 6. Distribución de las coberturas presentes en la zona de estudio, año 2014.

5.1.2 Mapa de coberturas, año 2021

Para el año 2021 la zona de estudio presenta unas coberturas tipo bosque denso, pastos limpios, cultivos y cuerpo de agua dulce. En la tabla 4 se evidencia el porcentaje y el área de cada cobertura con respecto al área total de la zona de estudio.

Tabla 4. Tipos de coberturas presentes en el área de estudio para el año 2021.

Cobertura	Caño cristalino		Caño Aguas claras		Total, año 2021	
	Ha	%	Ha	%	Ha	%
Bosque	431,78	61,37	3039,10	85,86	3470,88	81,80
Pastos	59,93	8,52	84,79	2,40	144,73	3,41
Cultivo	211,85	30,11	353,25	9,98	565,10	13,32
Cuerpo de agua dulce		0,00	62,43	1,76	62,43	1,47
Total	703,56	100,00	3539,57	100,00	4243,14	100,00

Para el año 2021 la zona de la cuenca de Aguas Claras presenta las siguientes coberturas:

3039.10 hectáreas de bosque, 84.79 hectáreas de pastos, en cultivos muestra un área de 353.25 hectáreas, finalmente en cuerpos de agua dulce se identificó un área de 62.43 hectáreas.

Para este mismo año, la zona de recarga hídrica Caño Cristalino cuenta con un área de cobertura de bosque de 431.78 hectáreas, las zonas de bosques compiten con las zonas cultivos las cuales tienen un área de 211.85 hectáreas siendo la segunda cobertura con mayor extensión. Esta zona presenta un total de 60 hectáreas praderizadas. Como conclusión se observa que la cobertura que predomina es el bosque, sin embargo, la cobertura de cultivos también abarca un área significativa.

El porcentaje de ocupación de los diferentes tipos de coberturas presentes se pueden observar en la figura 7.

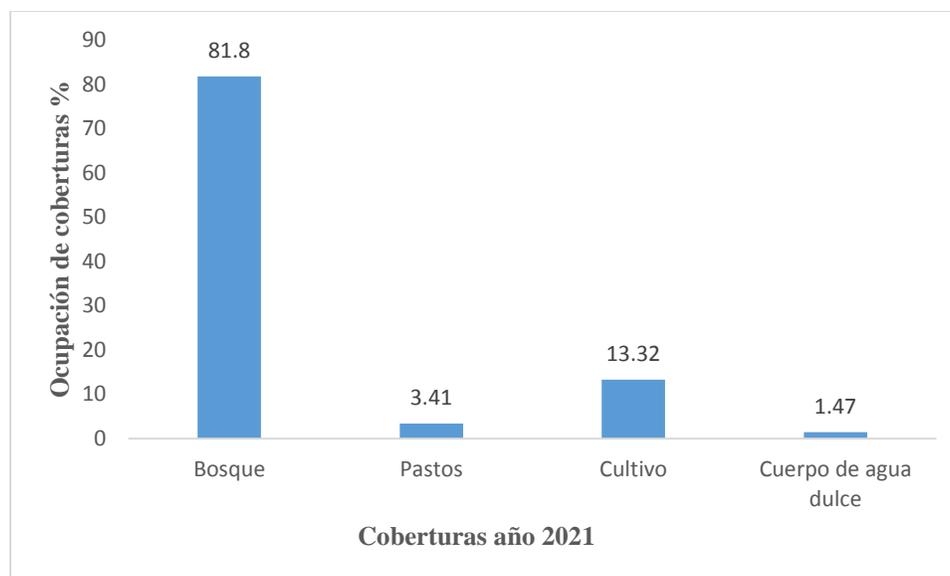


Figura 7. Área en porcentaje de los tipos de coberturas para el año 2021.

La figura 7 evidencia el porcentaje de ocupación de la cobertura de bosque (81,80%), pastos (3,41%), cultivo (13,32%) y cuerpos de agua dulce (1,47%) en el área total de estudio.

En la figura 8 se observa cómo se distribuyen los diferentes tipos de cobertura para el año 2021 en el área de estudio del municipio de Cubarral.

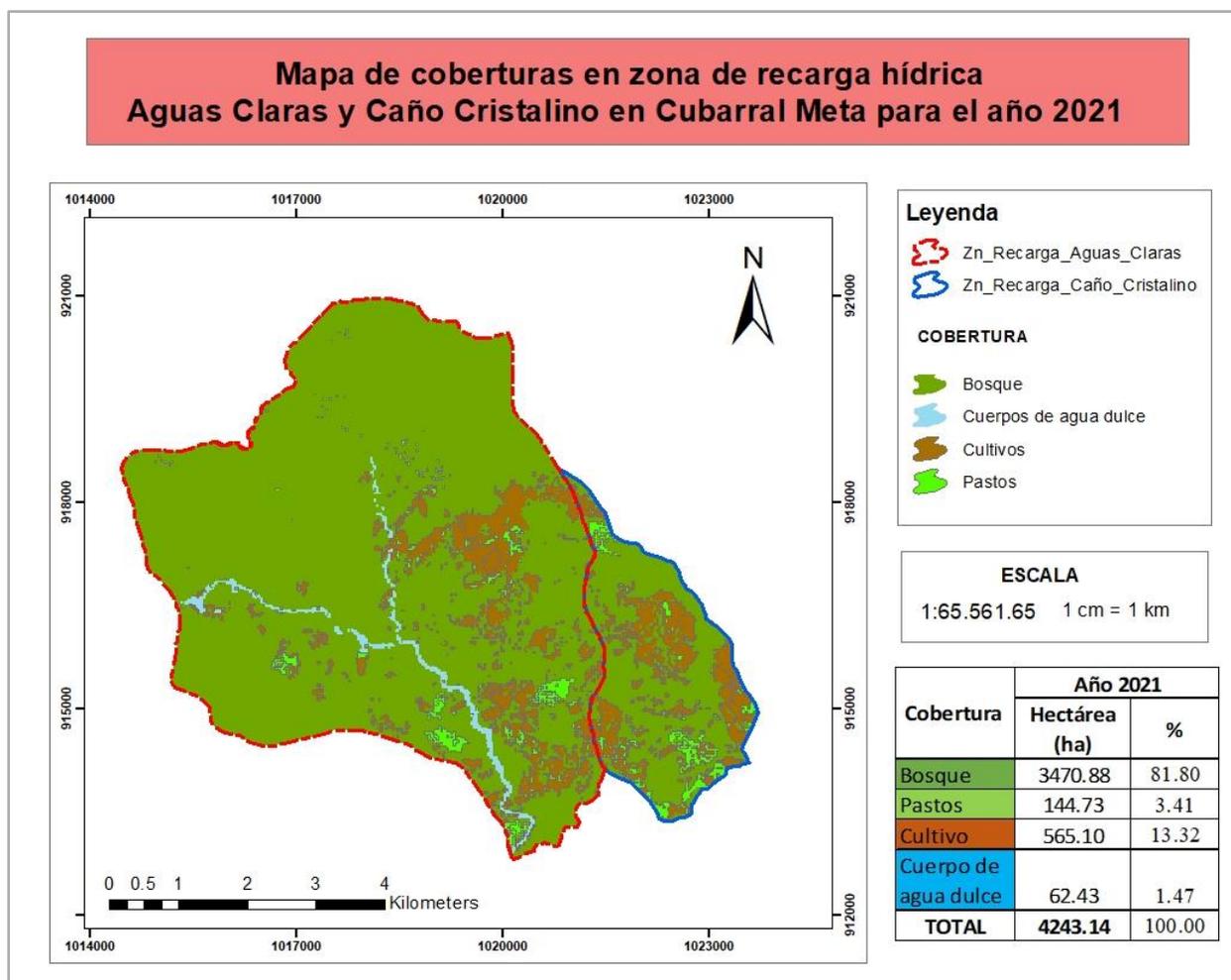


Figura 8. Distribución de las coberturas presentes en la zona de estudio, año 2021.

5.1.3 Análisis multitemporal del cambio de coberturas vegetales, años 2014-2021.

La zona de estudio en el intervalo de tiempo analizado, presentó una disminución de los tipos de coberturas bosque denso y pastos limpios; a su vez, las coberturas de cultivos y cuerpos de agua dulce presentaron un aumento en su área, como se observa en las figuras 9 y 10.

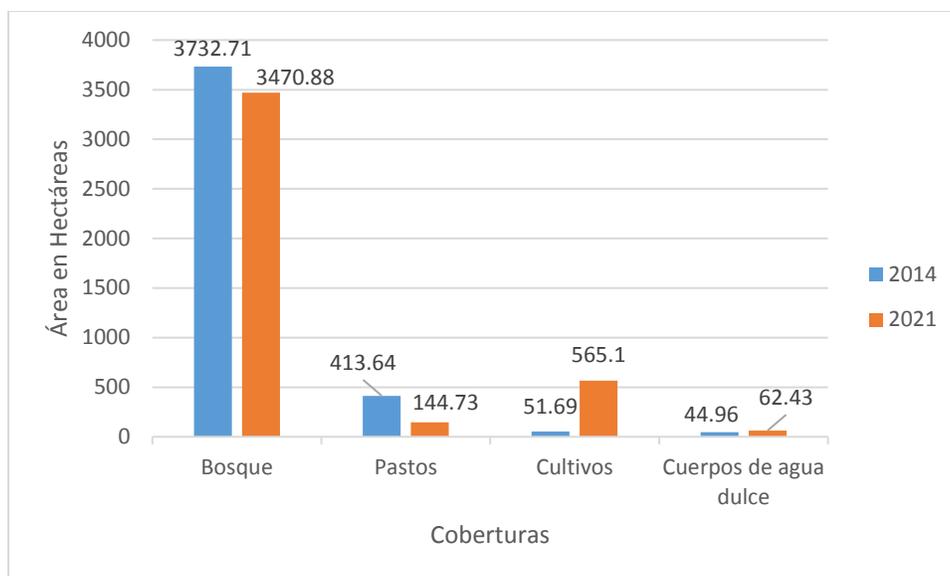


Figura 9. Evolución del área en hectáreas (ha) de las coberturas presentes en la zona de estudio para los años 2014 y 2021.

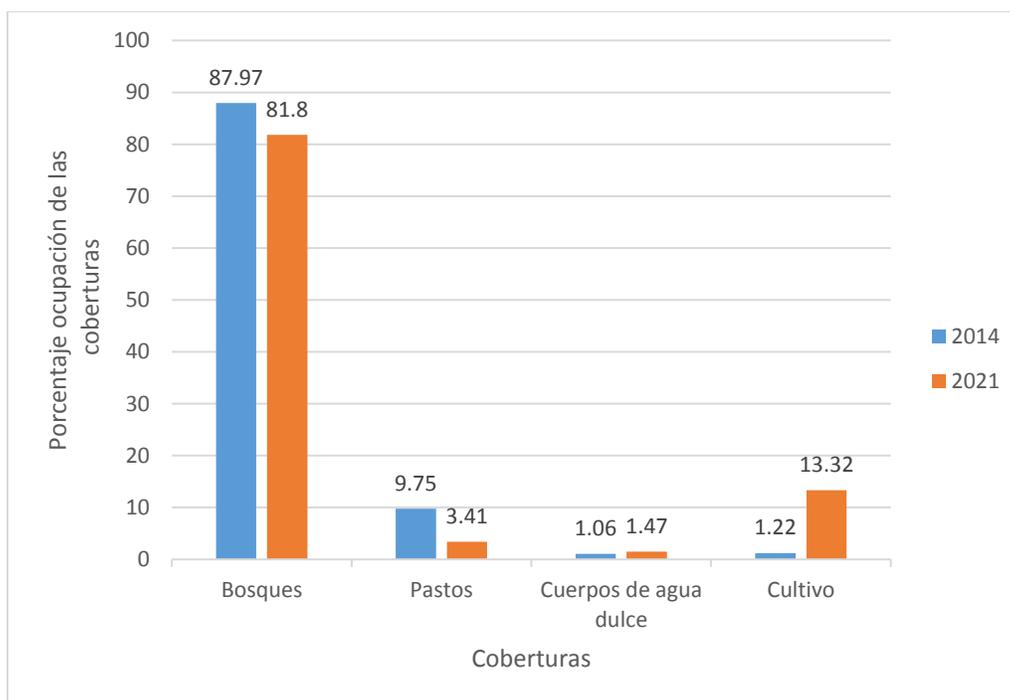


Figura 10. Evolución del área de las coberturas en porcentaje presentes en la zona de estudio para los años 2014 y 2021.

La cobertura de cuerpo de agua dulce presenta un área menor para el año 2014, aspecto que podría estar relacionado, por la conservación del bosque en las zonas aledañas a los cuerpos de agua. Para el año 2021 se observa un aumento de área para la cobertura de agua dulce, lo cual puede ser una respuesta a la disminución de la cobertura de bosque en las áreas de ronda hídrica, permitiendo una mayor exposición del cuerpo de agua dulce.

Estos cambios de área se observan en la tabla 5; donde los valores positivos representan un cambio favorable, y los valores negativos cambios desfavorables, las cuales representan zonas donde el tipo de cobertura ha aumentado (+) o disminuido (-).

Tabla 5. Diferencia de áreas para las coberturas presentes en la zona de estudio, entre el intervalo de tiempo comprendido entre los años 2014 y 2021.

Cobertura	2014		2021		Evolución	
	ha	%	ha	%	ha	%
Bosque	3732.71	87.97316	3470.88	81.80	-261.83	-6.17
Pastos	413.64	9.74874	144.73	3.41	-268.91	-6.34
Cultivo	51.69	1.218239	565.10	13.32	513.41	12.10
Cuerpo de agua dulce	44.96	1.059611	62.43	1.47	17.47	0.41
Total	4243.01	100,00	4243.14	100.00		

Como análisis de aumento y disminución en las áreas de coberturas en los años 2014 y 2021, se tienen en cuenta datos históricos que ha desarrollado la población del municipio de Cubarral, en el análisis multitemporal se observa una disminución de la cobertura de bosque para el año 2021 de un 6% la cual representa 261.83 hectáreas de bosque perdidas, se observa un incremento de la cobertura de cultivos en un 12% al área del año del 2014. Para la cobertura de pastos disminuye en 6.34% a la cobertura de pastos del año 2014. Finalmente, en la imagen del año 2021 la cobertura de cuerpos de agua dulce muestra un incremento del 0,41 % al área del año 2014, lo cual se relaciona con pérdida de cobertura del bosque en las zonas rivereñas, en el mapa de coberturas del año 2021 se observa alrededor de las áreas de cuerpos de agua dulce el aumento

de las coberturas de cultivos y zonas de pasto, las cuales reemplazaron el uso del suelo de vegetación a suelos productivos.

Los resultados del incremento del área de cultivos son impulsados por políticas locales, teniendo presente el documento del plan de desarrollo municipal de Cubarral para los años 2016 al 2019, se evidencia en el capítulo de economía el incremento que presenta el municipio en el sector agrícola, en el cual menciona que desde el año 2015 el municipio ha producido cultivos de cítricos, aguacates, plátanos, papayas, cacao y café, en especial este último sea posicionado en la zona, dando para el año 2015 un total de 445 hectáreas cultivos de café, el segundo cultivo mayor sembrado en la zona es el cacao. En cuanto a la cobertura de pastos para el año 2014 la cual representa un 9.74% del área total de la zona de estudio, se puede relacionar con un componente productivo pecuario, en el cual de acuerdo al plan de desarrollo municipal de Cubarral para los años 2016 y 2019, la ganadería extensiva representa un reglón importante de la economía del municipio, la cual se ve reflejada para el año 2015 con un 92% del área productiva de todo el municipio. Este sector pecuario ha sido respaldado por las instituciones como el ICA para el desarrollo de programas como manejo del hato lechero y mejoramiento genético. El municipio también cuenta en el sector pecuario con la producción avícola y de porcinos, las cuales también representa un reglón importante de ingresos para la economía local (Alcaldía Municipal de Cubarral, 2016). De acuerdo al análisis de coberturas para el año 2021, la cobertura de pastos es reducida a un 6% de ocupación en las zonas de recarga hídrica, este cambio de comportamiento productivo puede ser ocasionado por cambios en las políticas locales para el desarrollo del sector pecuario el cual ya no es tan atractivo, también puede ser influenciado por precios en el mercado del sector de agricultura. Para ello, se consulta el plan de desarrollo del municipio para los años 2020 al 2023, el cual propone realizar acciones de

asistencia técnica, dotación de insumos agrícolas, apoyo a créditos y aumentar la formalización de la productividad rural, dando con estas políticas un mayor respaldo a las actividades agrícolas (Concejo municipal de Cubarral, 2020).

5.2 Métricas del paisaje

Para el análisis de las métricas del paisaje, se tuvo en cuenta las coberturas de bosque, pastos, cultivos y cuerpos de agua dulce, llevando a cabo la caracterización geométrica y espacial de los componentes del paisaje de interés (Mcgarigal, 2015). En la tabla 6 se evidencia las diferentes métricas utilizadas en el estudio para determinar el grado de fragmentación del bosque.

Tabla 6. Definición de las métricas utilizadas en el estudio.

Abreviatura	Definición	Métrica
Ta	Área Total de la clase	
% Paisaje	Porcentaje del paisaje	
MPS	Promedio del tamaño del parche	Métrica de área
PSSD	Desviación estándar del tamaño del parche	
MSI	Índice de forma	Métrica de forma
NumP	Numero de parche	Métrica de subdivisión
MPI	Promedio del índice de proximidad	
MNN	Distancia del vecino más cercano	Métrica de agregación
IJI	Índice de Yuxtaposición	
SDI	Índice de diversidad de Shannon	Métrica de diversidad

Las tablas 7 y 8 evidencian los valores de las diferentes métricas de área-forma, subdivisión, agregación y diversidad, para cada cobertura presente en la zona de estudio.

Tabla 7. Valores métricas de área y forma

Cobertura	Métricas de área								Métricas de forma	
	TA (ha)		% del Paisaje		MPS		PSSD		MSI	
	2014	2021	2014	2021	2014	2021	2014	2021	2014	2021
Bosque	3731	3471,1	87,93	81,85	39,2	56,9	811,1	437,9	1,48	1,29
Pastos	416,1	141,84	9,81	3,34	3,85	0,62	15,23	2,03	1,37	1,18
Cuerpos de agua dulce	45,36	62,37	1,07	1,47	1,33	3,67	4,15	7,36	1,52	2,01
Cultivos	50,49	565,38	1,19	13,33	25,25	2,01	19,22	10,66	1,95	1,35

La cobertura de bosques para el año 2014 presenta un área de clase 3730,9 ha disminuyendo para el año 2021, donde su área de clase alcanza los 3471 ha de la zona total; indicando una disminución de 260 hectáreas de bosque para el año 2021. Esta disminución del área también se puede ver reflejada en el porcentaje del paisaje, ya que este para el año 2014 arroja un resultado de 87.93% y para el año 2021 reporta un valor de 81.85% siendo este menor. Sin embargo, se puede observar que la transformación del paisaje causada por actividades antrópicas ha tenido una baja intervención debido a que la cobertura de pastos y cultivos para el año 2021 solo represento el 16.67% del paisaje total de la zona de estudio, sin embargo, si se evidencia un aumento en la intervención del paisaje con un 5% mayor a la del año 2014 la cual representaba solo el 11% para las coberturas de pastos y cultivos. No obstante, la zona de estudio para el año 2021 continúa mostrando un buen indicador de conservación de las zonas de bosque con un 81% del área total del paisaje, evidenciando la baja intervención por parte de actividades productivas como la ganadería y la agricultura.

También se puede observar una disminución del tamaño de los parches de la cobertura de pastos, reflejado en la diferencia que presenta el área de clase con respecto al año 2014, variando

de un valor de 416.07 ha a un valor de 141.8 ha para el año 2021. El porcentaje del paisaje, para pastos en el año 2021 reporta un valor de 3,34%, siendo menor con respecto al resultado obtenido para el año 2014 de 9.8%. Es importante mencionar que en la zona de estudio del municipio de Cubarral la actividad ganadera es extensiva y presento conflictos ambientales, usando el 92% del área productiva del municipio. Este sector ha contado con asesoría del ICA en programas de nutrición animal, manejo del hato lechero y mejoramiento genético. Se calculo para el año 2015 un total de 54.000 cabezas de ganado en el municipio (González, 2017). Sin embargo, para el año 2021 se presenta una reducción significativa de 275 hectáreas que cambiaron su uso de suelos de praderización a suelos para cultivos, evidenciando un comportamiento positivo en la economía local para el sector agrícola, el municipio de Cubarral se caracteriza por tener fuentes de empleos provenientes del cultivo de café, sin embargo, para el año 2015 este cultivo tuvo una disminución del 60% de las áreas de producción, debido a que no recibieron más apoyo de la federación nacional de cafeteros principalmente por la antigüedad de los cafetales y problemáticas ambientales asociadas a este cultivo (González, 2017). Sin embargo, para los años 2016 al 2019 el municipio de Cubarral vuelve a recibir el apoyo de la federación nacional de cafeteros quienes han adelantado la mayor parte de acueductos y la apertura de vías carreteables. Es importante mencionar que el cultivo de café en el municipio lo comercializan a nivel nacional e internacional, pero también son generadores de otros cultivos como el aguacate, la papaya, el plátano, cítricos y otro de los más representativos para la economía local es el Cacao (Alcaldía Municipal de Cubarral, 2016).

Para la métrica de índice de forma MSI los resultados obtenidos presentan una irregularidad de la forma de los parches de bosque presentando un cambio menor en el intervalo de tiempo estudiado, pasando de 1,48 para el año 2014 a 1,29 al año 2021, indicando una forma más

irregular en el año 2014. Los resultados de los parches de bosque con forma más regular para el año 2021 es negativo para la conservación de las áreas de bosque (Velásquez, 2017) basado en la sustentación que el parche al acercarse más a una forma irregular es beneficioso para la conservación de una cobertura específica.

El área total de clase en la cobertura de agua dulce para el año 2014 abarca 45,36 ha, aumentando para el año 2021 a un área total de 62,3. Este aumento en el área de clase puede estar relacionado, a un mayor cubrimiento de estos cuerpos por la cobertura boscosa para el año 2014, la cual para el año 2021 al ser menor su área, permitió una mayor exhibición de los cuerpos de agua dulce en la zona. Esto también se observa en los resultados obtenidos a partir de la métrica de **porcentaje del paisaje**, la cual para el año 2014 arroja un resultado de 1,07% y para el año 2021 de 1,47%. La cobertura de cuerpo de agua dulce en el año 2021 es más irregular debido a que se aleja de su valor 1, generando un impacto ambiental negativo para el bosque, debido a la pérdida de este sobre las rondas del río; lo que conlleva a un incremento en el caudal del río, esto podría estar relacionado con posibles eventos naturales de inundación en las zonas aledañas al cuerpo de agua.

En la cobertura de cultivos también aumento el área de clase, pasando de 50,49 ha en el año 2014 a 565,3 ha para el año 2021. Este mismo comportamiento se puede observar en el porcentaje del paisaje, que para el año 2014 reporta un valor de 1,19%, aumentando a 13,33% para el año 2021. Esto puede estar indicando que este tipo de cobertura aumento su tamaño hacia lugares aledaños a esta, modificando coberturas preexistentes. Esto puede ser una respuesta a las dinámicas económicas nombradas en párrafos anteriores, en donde parte de las coberturas de bosque y pastos sus usos del suelo fueron remplazados a zonas de cultivos.

El tamaño medio del parche (MPS) tiende a aumentar en la cobertura de bosque, pasando de 39,2 (año 2014) a 56,9 (año 2021); en la cobertura de cuerpos de agua dulce, que para el año 2014 arrojó un resultado de 1,33 aumentando a 3,67 en el año 2021. Esto puede ser una respuesta a la unión cuando aumenta, y de separación (disminuye) de algunos parches de la misma clase a lo largo del tiempo (Moreno, 2014). Se puede inferir que el parche con mayor tamaño lo tiene la cobertura de bosque con 57 hectáreas por parche para el año 2021. Lo cual indica que, si el bosque en el año 2021 tiene una reducción de 260 hectáreas, aún mantiene hábitats en el bosque de forma agrupadas. El valor de la desviación estándar (PSSD) para las áreas de las coberturas de bosque, pastos y cultivos se hace menor para el año 2021, indicando una menor diversidad en el tamaño de los parches (Velásquez, 2017) para el año 2021.

Las coberturas en el lapso de tiempo estudiado (2014-2021) también presentan un cambio en la métrica de subdivisión (NumP), el número de parches aumenta su valor para el año 2021 como se observa en la tabla 8 y la figura 11, producto de una posible interrupción en la continuidad de la cobertura. Esto también genera que los parches se entremezclen con otros tipos de parches de diferentes coberturas, modificando el grado de fragmentación en el paisaje (Toro et al., 2014). Para el año 2021 la cobertura que presenta mayor fragmentación es la cobertura de cultivos indicando un número total de parches de 281 y para la cobertura de bosque se observa un aumento del 32% de fragmentación para el año 2021 con respecto al año 2014. La cobertura que presenta la segunda posición de fragmentación representativa es la cobertura de pastos la cual tiene un número total de parches de 227 para el año 2021. Estos resultados se observan a continuación en los mapas de números de parches en los años estudiados (ver figuras 12 y 13).

Tabla 8. Valores métricas de subdivisión y agregación. y diversidad.

Cobertura	Métricas de subdivisión		Métrica de agregación					
	NUMP		MPI		MNN		IJI	
	2014	2021	2014	2021	2014	2021	2014	2021
Bosque	20	61	22929	19146,53	43,31	49,81	60.85	70.16
Pastos	108	227	221,9	7,92	72,19	89,41	0	74.77
Cuerpos de agua dulce	2,61	9,09	13,66	49.73	59,95	37,79	0	58.1
Cultivos	34,74	281	0	178,54	38,91	62,82	0	48.41



Figura 11. Evolución del número de fragmentos (NUMP) de cada clase del paisaje, a través de los años.

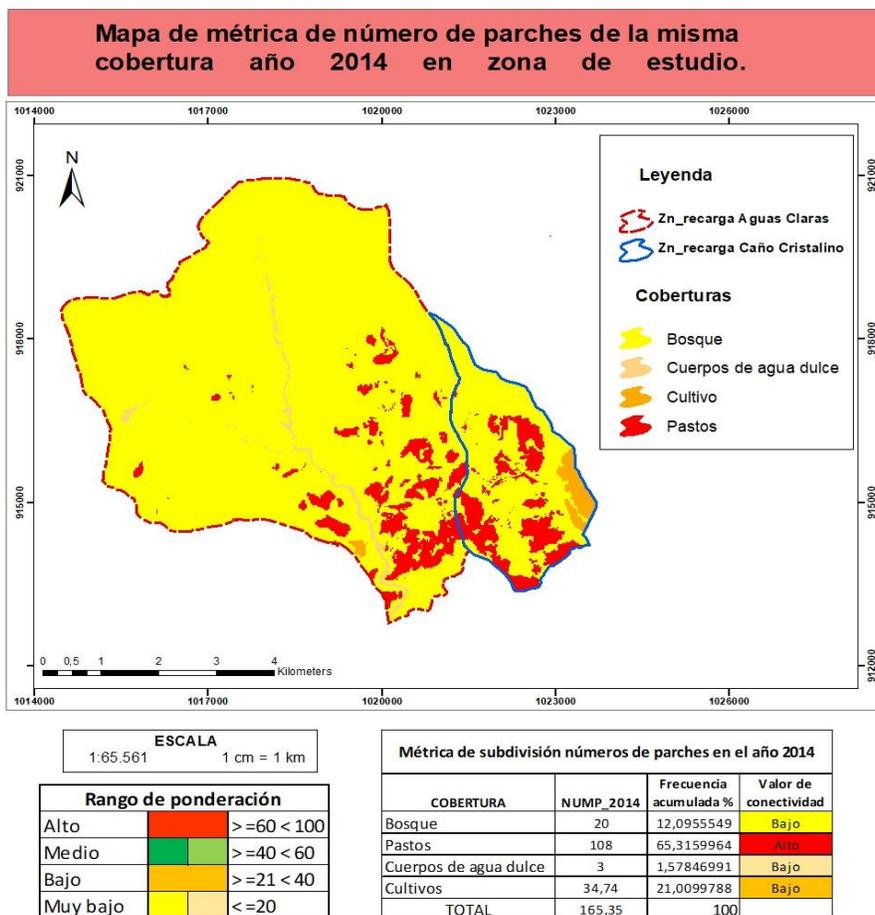
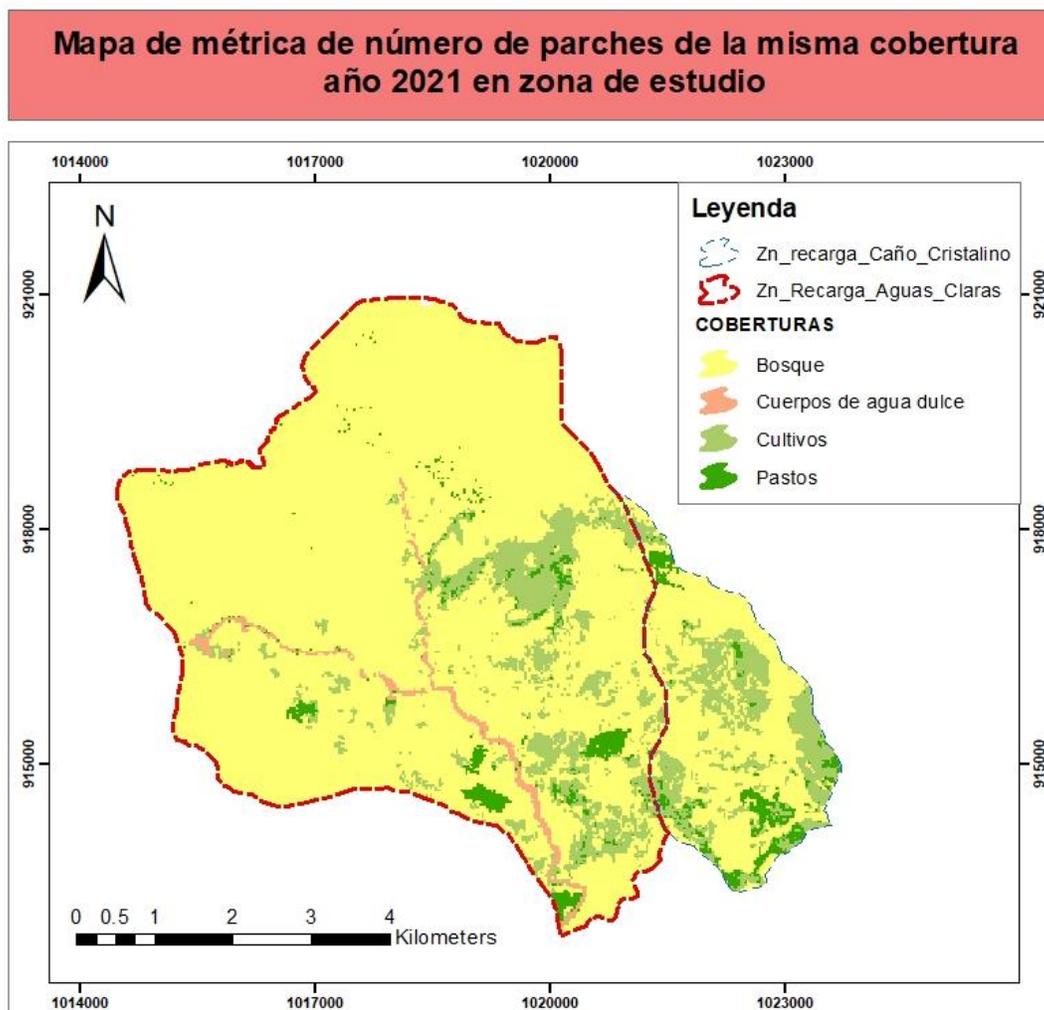


Figura 12. Métricas del paisaje número de parches para el año 2014.



ESCALA
1:65.561.65 1 cm = 1 km

Rango de ponderación		
Alto		>=60 < 100
Medio		>=40 < 60
Bajo		>=21 < 40
Muy bajo		<=20

Métrica de subdivisión números de parches en el año 2021			
COBERTURA	NUMP_2021	Frecuencia acumulada %	Valor de conectividad
Bosque	61	11.4123216	Bajo
Pastos	227	42.4688032	Medio
Cuerpos de agua dulce	9.09	1.700623	Bajo
Cultivos	237.42	44.4182522	Medio
TOTAL	534.51	100	

Figura 13. Métrica del paisaje número de parches para el año 2021.

Otra de las métricas que dan respuesta a conocer el grado de conectividad del bosque en la zona de estudio es la métrica de distancia del vecino más cercano (MNN). Este índice calcula la distancia desde el hábitat de borde y ecotono de un fragmento hasta el fragmento más próximo al mismo tipo. Este índice puede valorar el grado de aislamiento o conectividad existente entre los distintos fragmentos y parte de la base que a mayor sea el aislamiento se reducen las posibilidades de albergar o mantener un mayor grado de diversidad biológica (Vila et al., 2006). También esta medida indica el nivel de agrupamiento de los fragmentos de una misma clase (Moreno, 2014), por tanto, los resultados de esta métrica indican que todas las coberturas presentan un mayor grado de distanciamiento entre sí para el año 2021, evidenciando un aumento en el lapso de tiempo estudiado en todas las coberturas para el año 2021. Por tanto, teniendo presente lo manifestado por los autores Linde y Subirós, (2006) se puede inducir que la cobertura de bosque en el año 2021 presenta una reducción en mantener un mayor grado de diversidad biológica, comparando el resultado de aislamiento entre parches de bosque para el año 2014 el cual fue de 43,31 pasa a 49,81 en el año 2021. Estos resultados se observan a continuación en los mapas de métricas de agregación del vecino más cercano en los años estudiados (ver figuras 14 y 15).

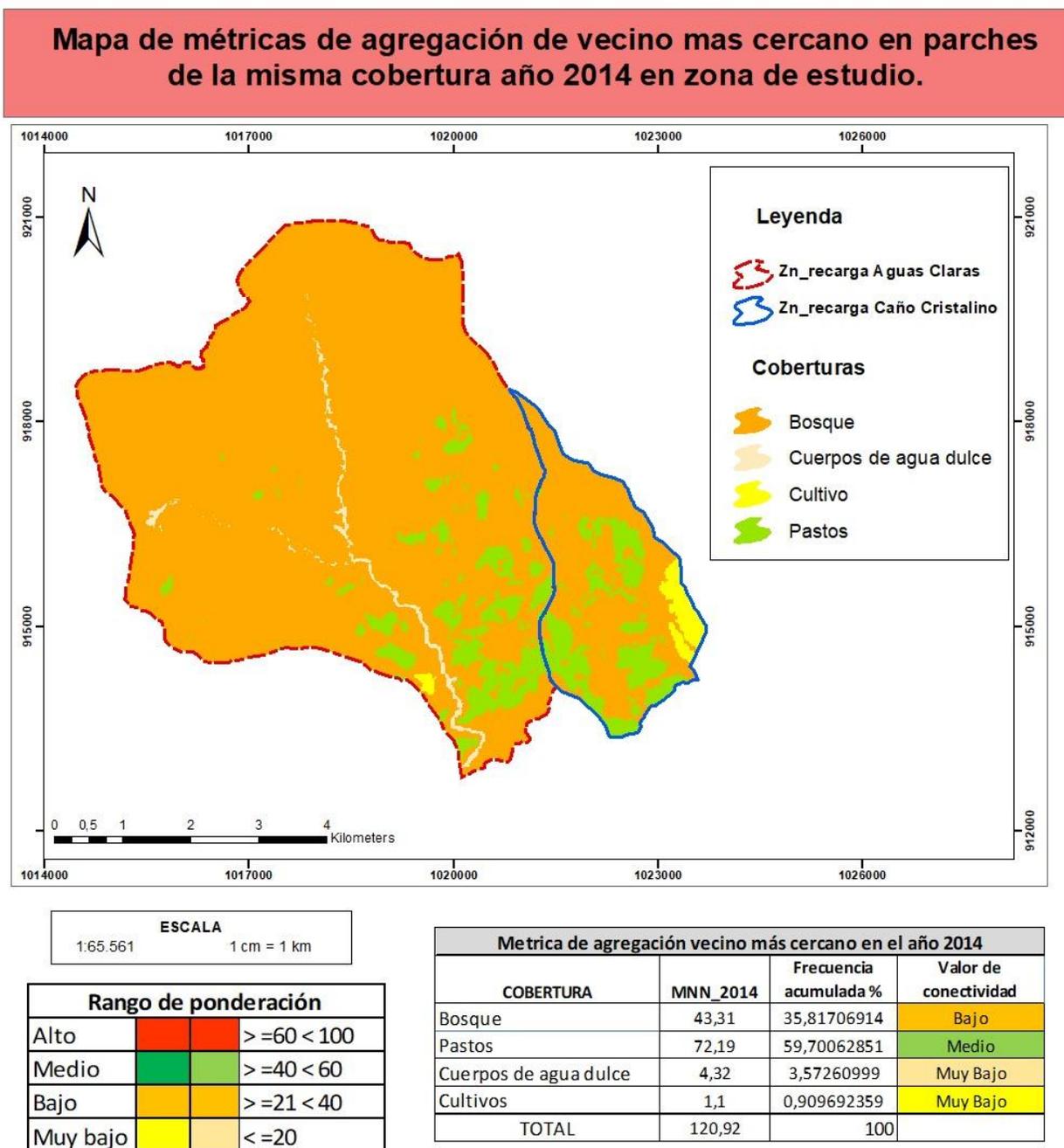
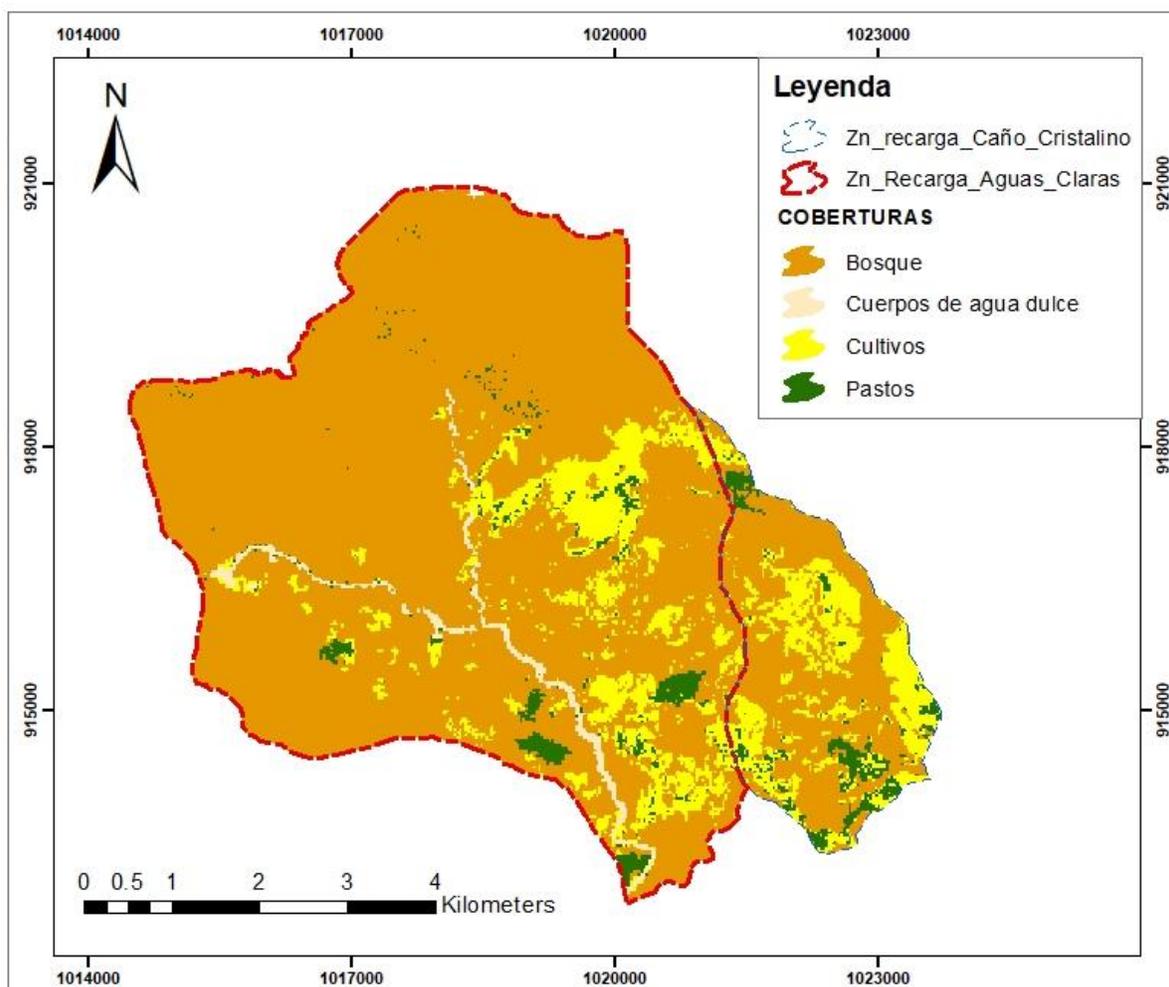


Figura 14. Métrica del paisaje del vecino más cercano para el año 2014

Mapa de métrica de agregación de vecino más cercano en parches de la misma cobertura año 2021 en zona de estudio



ESCALA	
1:65.561.65	1 cm = 1 km

Rango de ponderación		
Alto		>=60 < 100
Medio		>=40 < 60
Bajo		>=21 < 40
Muy bajo		<=20

Métrica de agregación vecino más cercano en el año 2021			
COBERTURA	MNN_2021	Frecuencia acumulada %	Valoración de conectividad
Bosque	49.81	20.76887796	Bajo
Pastos	89.41	37.28057374	Medio
Cuerpos de agua dulce	37.79	15.75699454	Muy Bajo
Cultivos	62.82	26.19355377	Bajo
TOTAL	239.83	100	

Figura 15. Métrica del paisaje del vecino más cercano para el año 2021

El índice de proximidad (MPI) en las coberturas de bosque y pastos de la zona de estudio, disminuyen el aislamiento entre los parches para el año 2021, excepto en las coberturas de cultivos y agua dulce, indicando que la cobertura de cultivos tiene una menor distancia entre los parches en el año 2021. Sin embargo, la cobertura de interés para este estudio es la de bosque, la cual presenta menor aislamiento entre los parches de bosque para el año 2014. Estos datos pueden estar reflejando un aumento en el grado de fragmentación de la cobertura (Mcgarigal, 2015), siendo mayor en el año 2021. Estos análisis son basados en el concepto que a mayor MPI es menor el grado de aislamiento entre parches de una misma clase (Talamantes, 2014).

Para concluir con las métricas de agregación de vecino más cercano y métrica yuxtaposición se observó un aumento en el aislamiento entre los parches en la cobertura de bosque para el año 2021, lo cual indica una fragmentación en la cobertura de bosques desde el año 2014 al año 2021 que se relaciona con la métrica del vecino más cercano. Sin embargo, la métrica de índice de proximidad (MPI) indicó que las coberturas de bosques y pastos en el año 2021 disminuyen el valor, lo cual indica que los parches de estas clases se encuentran más aislados, como una posible respuesta a que estas coberturas hayan sido reemplazadas por zonas de cultivos y cuerpos de agua dulce.

El índice de yuxtaposición (JI) mostró un valor más alto en la cobertura de bosque para el año 2021 con respecto al año 2014, indicando un aumento en la adyacencia de los parches de bosque, como respuesta a una aglomeración para el año 2021 de estos parches; siendo la cobertura de pastos la que presenta el mayor grado de aglomeración para el año 2021. Finalmente, se observa que para el año 2014 las coberturas de agua dulce, pastos y cultivos presentaron una distribución de la continuidad de los fragmentos de manera desigual.

A partir de las métricas de diversidad del paisaje se puede observar que el índice de diversidad de Shannon (SDI) tiende a aumentar de 0,44 en 2014 a 0,61 en 2021, indicando un aumento en el número de parches, así como la diversidad del paisaje en el área (Velásquez, 2017); con un grado mayor de distribución de los diferentes fragmentos de cada clase (Mcgarigal, 2015). Por lo cual se puede concluir que para el año 2021 se evidencia mayor diversidad o heterogeneidad en el paisaje de la zona de recarga hídrica de aguas claras y caño cristalino, ubicadas en el municipio de Cubarral Meta.

Tabla 9. Valores métricas de diversidad para los años 2014 y 2021.

Cobertura	Métrica de diversidad	
	SDI	
	2014	2021
Bosque		
Pastos		
Cuerpos de agua dulce	0,44	0,61
Cultivos		

COMPOSICIÓN ESTRUCTURAL DEL PAISAJE

Con el objetivo de conocer el estado de conservación en los diferentes tipos de hábitats en el paisaje de las zonas de recarga hídrica de Aguas Claras y caño Cristalino del municipio de Cubarral, se hizo uso del componente físico o estructural con el cual se conoció la distribución espacial de los diferentes tipos de hábitats en el paisaje, sin necesidad de conocer los movimientos de los organismos o los procesos en el paisaje (Alonso-F. et al., 2017).

A partir del cálculo de las métricas del paisaje se elaboraron los mapas con métricas de subdivisión de número de parches y el índice del vecino más cercano con los cuales dan a

conocer la conectividad del bosque. En las figuras 12,13, 14 y 15 se visualizó la evolución del estado de conectividad en las diferentes coberturas en los años 2014 y el año 2021, permitiendo evaluar la conectividad en cada una de las coberturas por medio de ponderados.

CONCLUSIONES

Mediante el uso de la metodología de análisis multitemporal se logró identificar un total de cuatro coberturas, haciendo uso de la clasificación supervisada con la cual se identifican coberturas como bosques densos, pastos limpios, cultivos y cuerpos de agua dulce. Como resultado se evidencia un comportamiento favorable para la cobertura de cultivos y cuerpos de agua dulce, las cuales incrementa su tamaño de área en el intervalo de tiempo estudiado, a diferencia de la cobertura de bosques y pastos que presentaron un comportamiento desfavorable en su área de tamaño para el año 2021. Siendo la cobertura de bosque la más afectada, presentando una pérdida de su área de 260 hectáreas desde el año 2014 hasta el año 2021.

El cambio más representativo del uso del suelo se da en la cobertura de cultivos, la cual se evidencia un incremento de su área relacionado a los incentivos de asesoría técnica y ejecución de obras que han recibido por parte de entidades como la federación cafeteros, así como la ejecución de obras de acueductos y aperturas de vías carretables, impulsando en el municipio de Cubarral el desarrollo del sector agrícola; el cual reemplaza áreas que contenían bosques y zonas de praderización a zonas agrícolas. Finalmente, la cobertura de agua dulce evidencio un comportamiento favorable la cual se encuentra relaciona con la cobertura de bosque, ya que esta al presentar una disminución de su área para el año 2021 permite una mayor exposición de los cuerpos de agua dulce. Sin embargo, la variable de aumento de precipitación en la zona para el

año 2021, también puede ser una variable directamente relacionada al incremento de la cobertura de agua dulce.

A partir del análisis de conectividad los resultados de este estudio muestra un incremento en el grado de fragmentación para el año 2021, sin embargo, los parches de bosques presentan un mayor aislamiento en el año 2021 comparado con el año 2014, lo cual representa una amenaza para mantener la diversidad biológica en la zona de recarga hídrica de Aguas claras y caño Cristalino, sin embargo, los parches de bosques para el año 2021 cada uno tiene un tamaño proporcional a 57 hectáreas y mantiene una forma regular, la cual es positivo para mantener los bosque de forma agrupada. No obstante, se deberán tomar acciones que aseguren la conservación de estos bosques en la zona de estudio al evidenciar el grado de fragmentación del bosque en un 32% de aumento respecto al año 2014, debido a que si continua el aislamiento entre los parches de bosques se reduce las posibilidades de mantener la biodiversidad biológica en el área de recarga hídrica del municipio de Cubarral. Finalmente, mediante el uso de ponderados en los mapas de métrica de agregación del vecino más cercano y haciendo uso de la frecuencia acumulada en los dos años de estudio se infiere una baja conectividad del bosque.

Bibliografía

- Acuña, C. A. (2010). *IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS PRIORITARIAS DE CONSERVACIÓN ENFOCADAS HACIA LA CONECTIVIDAD ESTRUCTURAL DEL CORREDOR ENCENILLO (MUNICIPIOS DE LA CALERA, GUASCA, SOPO, SESQUILÉ, GUATAVITA), CUNDINAMARCA*.
- Alatorre, L. C., Begueria, S., & Vicente-Serrano, S. (2011). Evolution of vegetation activity on vegetated, eroded, and erosion risk areas in the central Spanish Pyrenees, using multitemporal Landsat imagery. *Earth Surface Processes and Landforms*, 36(3), 309–319. <https://doi.org/10.1002/esp.2038>
- Alcaldía Municipal de Cubarral. (2016). Plan de Desarrollo Municipal de Cubarral 2016-2019. *Alcaldía de Cubarral*, 58. <https://goo.gl/MXGBFA>
- Alonso-F., A. M., Finegan, B., Brenes, C., Günter, S., & Palomeque, X. (2017). Evaluación de la conectividad estructural y funcional en el corredor de conservación Podocarpus-Yacuambi, Ecuador. *Caldasia*, 39(1), 140–156. <https://doi.org/10.15446/caldasia.v39n1.64324>
- Bennett, A. F. (2003). *Linkages in the Landscape, The Role of Corridors and Connectivity in Wildlife Conservation*.
- Calabrese, J. M., & Fagan, W. F. (2004). *A comparison-shopper's guide to connectivity metrics*.
- CORMACARENA. (2016). *PROYECTO : Implementación de Estrategias para la conservación del recurso hídrico para consumo humano en el departamento del Meta ” Informe final municipio Cubarral servicios ecosistémicos, sugerencia de compra predial y establecimiento de líneas estratég.*
- Crooks, K. R., & Sanjayan, M. (2010). Connectivity conservation: maintaining connections for nature. In *Connectivity Conservation* (pp. 1–20). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/cbo9780511754821.001>
- Etter, A. (1991). *Introducción a la ecología del paisaje: un marco de integración para los levantamientos ecológicos*.
- FAO. (2021). *Colombia en una mirada*. Organización de La Naciones Unidas Para La Agricultura. <https://www.fao.org/colombia/fao-en-colombia/colombia-en-una-mirada/en/>
- Flórez-Yepes, G. Y., Rincon-Santamaría, A., Cardona, P. S., & Alzate-Alvarez, A. M. (2017). Análisis multitemporal de las coberturas vegetales en el área de influencia de las minas de oro ubicadas en la parte alta del sector de Maltería en Manizales, Colombia. *DYNA (Colombia)*, 84(201), 95–101. <https://doi.org/10.15446/dyna.v84n201.55759>
- González, I. (2017). *Caracterización socioeconómica de la población del municipio de Cubarral 2015* [Universidad de los Llanos]. <http://repositorio.unillanos.edu.co/bitstream/001/616/1/CARACTERIZACION DE CUBARRAL PARA ENTREGAR 2017 %281%29.pdf>
- Gouesnard, B., Sanou, J., Panouillé, A., Bourion, V., & Boyat, A. (1996). Evaluation of agronomic traits and analysis of exotic germ plasm polymorphism in adapted x exotic maize crosses. *Theoretical and Applied Genetics*, 92(3–4), 368–374.

<https://doi.org/10.1007/BF00223681>

- Hargis, C. D., Bissonette, J. A., & David, J. L. (1998). The behavior of landscape metrics commonly used in the study of habitat fragmentation. *Landscape Ecology*, *13*, 167.
- Hernandez, C. E. (2017). *ANÁLISIS MULTITEMPORAL DEL CAMBIO EN LA COBERTURA DEL SUELO, EN LA ZONA DE INUNDACIÓN DE LA REPRESA HIDROSOGAMOSO, DEPARTAMENTO DE SANTANDER, AÑOS 2001 Y 2015*.
- Ideam. (2010). Leyenda nacional de coberturas de la tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia, escala 1:100.000. In *Area: Vol. TH-62-04-1* (Issue 257).
- Ingegnoli, V. (2015). *Landscape Bionomics Biological-Integrated Landscape Ecology*.
- Li, H., & Wu, J. (2004). Use and misuse of landscape indices. *Landscape Ecology*, *19*, 389–399.
- Li, X., He, H. S., Bu, R., Wen, Q., Chang, Y., Hu, Y., & Li, Y. (2005). The adequacy of different landscape metrics for various landscape patterns. *Pattern Recognition*, *38*(12), 2626–2638. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2005.05.009>
- Mcgarigal, K. (2015). *FRAGSTATS HELP*.
- Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. (2021). *En 2020, Colombia perdió un área de bosque más grande que Bogotá*. Portafolio. <https://www.portafolio.co/tendencias/en-2020-colombia-perdio-un-area-de-bosques-mas-grande-que-bogota-553797>
- Moreno, A. (2014). *Ecología del paisaje y cambio del uso del suelo y vegetación en la Sierra San Antonio Peña Nevada, Zaragoza, Nuevo León*. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Parody Zuleta, A., & Zapata Sanjuan, E. (2015). Estudio multitemporal de la deforestación en Colombia utilizando procesamiento de imágenes. *Ingenio Ufpso*, *08*(1), 159–175. https://redib.org/Record/oai_articulo2997604-estudio-multitemporal-de-la-deforestación-en-colombia-utilizando-procesamiento-de-imágenes
- Pettorelli, N., Ryan, S., Mueller, T., Bunnefeld, N., Jedrzejewska, B., Lima, M., & Kausrud, K. (2011). The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI): Unforeseen successes in animal ecology. *Climate Research*, *46*(1), 15–27. <https://doi.org/10.3354/cr00936>
- Talamantes, A. M. (2014). *Ecología del paisaje y cambios del uso del suelo y vegetación en la sierra San Antonio Peña Nevada, Zaragoza, Nuevo León*. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Taylor, P. D., Fahrig, L., Henein, K., & Merriam, G. (1993). Taylor, P. D.; Fahrig, L.; Henein, K.; Merriam, G. Connectivity is a vital element of landscape structure. *Oikos*, v. 68, n. 3, p. 571–573, 1993. *Oikos*, *68*(3), 571–573.
- Tischendorf, L., & Fahrig, L. (20007). *On the usage and measurement of landscape connectivity*.
- Toro, L. J., Gutiérrez Henao, A., Suárez Gómez, J. A., Toro Jiménez, F. A., Díaz, A. M., Raigosa García, O. I., Uribe, L. F., Uribe, G. I., Ángel Arango, J. J., Arias Gil, J. J., John Jairo Arias Gil, T. F., & Guzmán Agudelo, J. D. (2014). *Actualización del mapa de coberturas vegetales, análisis multitemporal y métrica del paisaje del municipio de Envigado*.

- Turner, M. G. (1989). Landscape ecology: the effect of pattern on process. *Annual Review of Ecology and Systematics*. Vol. 20, 171–197.
<https://doi.org/10.1146/annurev.es.20.110189.001131>
- Velandia, O. F. (2019). *ANÁLISIS MULTITEMPORAL PARA DETERMINAR LOS CAMBIOS EN LA COBERTURA VEGETAL Y EN EL CAUCE PRINCIPAL DEL RÍO CAUCA PRODUCIDO POR EL PROYECTO HIDROELÉCTRICO ITUANGO, EN LOS AÑOS 2009 Y 2019, EMPLEANDO IMÁGENES SATELITALES*.
- Velásquez, P. A. (2017). *Caracterización de la Estructura del Paisaje y su Estado de Conservación en las Cuencas de Cabecera de Medellín*. Universidad de San Buenaventura Medellín.
- Vila, J., Varga, D., Llausás, A., & Ribas, A. (2006, November). Conceptos y métodos fundamentales en ecología del paisaje (landscape ecology). Una interpretación desde la geografía. *Documents d'Anàlisi Geogràfica*, 0(48), 151–166.
<https://doi.org/10.1234/no.disponible.a.RACO.72657>
- Wu, J. (2013). Landscape Ecology. In *Ecological Systems* (pp. 179–200). Springer New York.
https://doi.org/10.1007/978-1-4614-5755-8_11