

Análisis multitemporal de coberturas en zonas de minería aurífera aluvial y su impacto en el recurso forestal entre los años 2014 al 2023, en municipios del Bajo Cauca Antioqueño.

Daniela Vargas Portela

Investigación de trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de Titulación de Especialista en Sistemas de Información Geográfica

Asesor:

Mario Andrés Giraldo Fadul

Grupo de Investigación y Desarrollo en Informática y Telecomunicaciones

Universidad de Manizales

Facultad de Ciencias e Ingeniería

Especialización en Sistemas de Información Geográfica

Manizales, 2024

Resumen

La identificación de las coberturas, es una actividad determinante para la conservación e implementación de buenas técnicas de manejo de los recursos ambientales, de los cuales las comunidades de El Bagre, Zaragoza, Caucasia, Nechí y Anorí, serían beneficiadas. El presente proyecto se desarrolló mediante el uso del software ArcGIS 10.8 y ArcGIS Pro 3.2.2, con los cuales se elaboró un mosaico con las imágenes seleccionadas (Landsat 8 y 9), se realizó una clasificación visual, y supervisada para los años 2014- 2023; las coberturas interpretadas fueron sometidas a evaluaciones de calidad, y se implementó la interpretación de datos para determinar el cambio a través del tiempo, impactos ambientales y cambio en el uso del suelo, se utilizó como insumo los resultados obtenidos mediante la herramienta *change detection*, además de un énfasis en la variación del 2014 vs. 2023 a nivel municipal en coberturas de zona de extracción minera, análisis en el impacto del recurso forestal, estudio de la cobertura de zona de extracción minera en zona de influencia del río Nechí y finalmente, relación entre coberturas y zonas urbanas.

Los resultados obtenidos servirán como insumo para la planificación territorial del área de estudio y determinar si las medidas de mitigación implementadas por las partes mineras tienen efectividad, o si por el contrario el recurso ambiental se está afectando, además de validar si las medidas de mitigación por parte de los entes mineros del país afectan de manera positiva o negativa la salud del recurso de nuestras coberturas naturales.

Palabras clave: Clasificación supervisada, zona de extracción minera, zona de influencia, impactos ambientales, cambio en el uso del suelo

Abstract

The identification of coverage is a determining activity for the conservation and implementation of good environmental resource management techniques, from which the communities of El Bagre, Zaragoza, Caucasia, Nechí and Anori will benefit. This project was developed through the use of ArcGIS 10.8 and ArcGIS Pro 3.2.2 software, with which a mosaic was created with the selected images (Landsat 8 and 9), a visual classification was carried out, and supervised for the years 2014- 2023; The interpreted coverages were subjected to quality evaluations, and data interpretation was implemented to determine the change over time, environmental impacts and change in land use in an important area in the country, the results are used as input. . 2014 at the municipal level in coverage of the mining extraction area, analysis of the impact of the forest resource, study of the coverage of the mining extraction area in the area of influence of the Nechí River and finally, relationship between coverage and urban areas.

The results obtained will serve as input for the territorial planning of the study area and determine if the mitigation measures implemented by the mining parties are effective, or if, on the contrary, the environmental resource is being affected, in addition to validating if the mitigation measures by part of the country's mining entities positively or negatively affects the health of the resource of our natural coverage.

Keywords: Supervised classification, mining extraction zone, zone of influence, environmental impacts, change in land use

Contenido

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN Y SU JUSTIFICACIÓN.....	7
1.1 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA PROBLEMÁTICA.....	7
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	8
2. OBJETIVOS	9
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	9
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	9
3. ANTECEDENTES	9
4. REFERENTE TEÓRICO.....	13
5. METODOLOGÍA.....	16
5.1. ENFOQUE METODOLÓGICO	16
5.2. TIPO DE ESTUDIO	16
5.3. PROCEDIMIENTO	16
5.3.1. Búsqueda de imágenes satelitales	16
5.3.2. Desarrollo de trabajo mediante imágenes Landsat 8 y 9 Nivel 2	16
5.3.3. Procesos y análisis	17
5.3.4. Determinación de cambios en las coberturas	17
5.3.5. Clasificación supervisada	18
5.3.6. Análisis multitemporal.....	18
5.3.7. Implementación de Indicador de índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)	19
5.3.8 Change detection.....	20
6. RESULTADOS.....	21
6.1. ÁREA DE ESTUDIO	21
6.2. IMÁGENES SATELITALES.....	22
6.3. COMPOSICIÓN DE BANDAS	22
6.4. MOSAICO.....	23
6.5. CLIP.....	25
.....	26
6.6. CLASIFICACIÓN SUPERVISADA	26
6.6.1. Creación de shapefile para semillado según la región de interés (Año 2014)	26
6.6.2. Creación de firmas espectrales	29
6.6.3. Clasificador de máxima verosimilitud.....	30
6.6.4. Analisis de precisión	30
6.6.5. Resultados clasificación de máxima verosimilitud 2014 vs. 2023.....	31

6.6.5.1. Metodo 1: Calculo de variación en áreas 2014 vs. 2023	31
6.7. CALCULO DE VARIACIÓN EN ÁREAS 2014 VS. 2023 A NIVEL MUNICIPAL EN COBERTURAS DE ZONA DE EXTRACCIÓN MINERA	41
6.8. IMPACTO EN EL RECURSO FORESTAL	45
6.9. ESTADO DE LA COBERTURA VEGETAL DE LOS AÑOS 2014 Y 2023 MEDIANTE EL ÍNDICE DE VEGETACIÓN NORMALIZADA (NDVI)	46
6.10. COBERTURA DE “ZONA DE EXTRACCIÓN MINERA” EN ZONA DE INFLUENCIA DEL RIO NECHÍ.	48
6.11. ANALISIS DE RELACIÓN ENTRE COBERTURAS Y ZONAS URBANAS	50
7. DISCUSIÓN.....	57
8. CONCLUSIONES.....	58
9. REFERENCIAS.....	60

Contenido de Ilustraciones

Ilustración 1. Área (ha) 2014 vs. 2023 en el municipio de Anorí.....	34
Ilustración 2. Área (ha) 2014 vs. 2023 en el municipio de Zaragoza	35
Ilustración 3. Área (ha) 2014 vs. 2023 en el municipio de Caucasia	36
Ilustración 4. Área (ha) 2014 vs. 2023 en el municipio de El Bagre	37
Ilustración 5. Área (km ²) 2014 vs. 2023 en el municipio de Nechí.....	38
Ilustración 6. Cambio de cobertura a zona de extracción minera en Anorí, Antioquia.....	41
Ilustración 7. Cambio de cobertura a zona de extracción minera en El Bagre, Antioquia.....	42
Ilustración 8. Cambio de cobertura a zona de extracción minera en Caucasia, Antioquia.	43
Ilustración 9. Cambio de cobertura a zona de extracción minera en Nechí, Antioquia.	44
Ilustración 10. Cambio de cobertura a zona de extracción minera en Zaragoza, Antioquia.	44
Ilustración 11. Impacto en el recurso forestal por minería aurífera aluvial	45
Ilustración 12. Zona de influencia de casco urbano Anorí	50
Ilustración 13. Zona de influencia de casco urbano Caucasia	51
Ilustración 14. Zona de influencia de casco urbano Bagre	52
Ilustración 15. Zona de influencia de casco urbano Nechí	53
Ilustración 16. Zona de influencia de casco urbano Zaragoza.....	53

Contenido de tablas

Tabla 1. Características imágenes Landsat.....	22
Tabla 2. Valores asociados a las coberturas identificadas	26
Tabla 3. Análisis de precisión 2014	30
Tabla 4. Análisis de precisión 2023	30
Tabla 5. Resultados clasificación supervisada 2014	31
Tabla 6. Resultados clasificación supervisada 2023	32
Tabla 7. Variación en área en ha para los años 2014 vs. 2023.....	39
Tabla 8. Área de coberturas en zona de influencia (3 km) del Río Nechí.....	48

Contenido de Figuras

Figura 1. Área de estudio	21
Figura 2. ArcToolbox> Data management tools> Raster > Composite bands	22
Figura 3. Mosaico año 2014	23
Figura 4. Mosaico año 2023	24
Figura 5. Data management tools> Raster processing> Clip.....	25
Figura 6. Clip área de estudio año 2014.....	25
Figura 7. Clip área de estudio año 2023.....	26
Figura 8. Semillado según su tipo de cobertura y combinación de bandas (2014).....	27
Figura 9. Semillado según su tipo de cobertura y combinación de bandas (2023).....	29
Figura 10. Clasificación supervisada año 2014	40
Figura 11. Clasificación supervisada año 2023	40
Figura 12. NDVI 2014 vs. 2023	47
Figura 13. Buffer 3 km zona de influencia Río Nechí.....	49
Figura 14. Buffer tejido urbano Anorí, Antioquia	54
Figura 15. Buffer tejido urbano Caucasia, Antioquia.....	55
Figura 16. Buffer tejido urbano El Bagre, Antioquia.....	55
Figura 17. Buffer tejido urbano Nechí, Antioquia	56
Figura 18. Buffer tejido urbano Zaragoza, Antioquia	56

6. 1. Planteamiento del problema de investigación y su justificación

1.1 Descripción del área problemática

A nivel global se han considerado a los cambios drásticos de uso de suelo como una de las mayores amenazas a la biodiversidad, ya que involucran no sólo la pérdida de cobertura vegetal, sino también la segregación de los ecosistemas naturales en fragmentos de diversos tamaños y por tanto, la discontinuidad y aislamiento de su biodiversidad (Arriaga L. , 2009).

Dichos cambios en el uso del suelo, están ligados a aspectos tales como actividades de explotación minera que pueden dejar una huella de deforestación, contaminación y destrucción en las coberturas vegetales concretamente en las zonas boscosas y cuerpos de agua donde se realiza. Es por esto que monitorear este impacto se ha convertido en una prioridad para las instituciones del estado y es aquí donde las herramientas tecnológicas facilitan el levantamiento de la información técnica apropiada y necesaria para enfrentarlo (Arenas, 2021).

Dado a estos efectos generados, se han realizado múltiples estudios alrededor del mundo para entender esta problemática y generar posibles soluciones entorno a las sociedades. Tal es el caso del municipio de Danlí, el cual se encuentra situado en la zona oriental de Honduras, ciudad la cual a pesar de ser muy importante para la región no tiene planes de desarrollo bien ejecutados. Por lo cual se realizó un análisis multitemporal de imágenes LandSat y la evaluación de los cambios de cobertura del terreno ocurridos en un período de 11 años, entre 1987 y 2011 en el cual se presentó la cartografía temática generada y los resultados obtenidos, indicativos de la dinámica de usos de suelo en la región. Esto con el fin de analizar la metodología aplicada en lo referente a su impacto como una importante herramienta de diagnóstico, así como en las tendencias para una mejor toma de decisiones en pro del desarrollo y bienestar de la zona y sus habitantes.

Por otro lado, en Colombia también se han generado múltiples proyectos entorno a análisis multitemporales de coberturas, como lo fue el caso de estudio en la mina del Cerrejón (Guajira), este estudio se realizó con el fin de determinar las consecuencias de la actividad minera en la cobertura y uso de los suelos entre los años 1986 y 2020. Esto se realizó mediante el procesamiento de imágenes obtenidas de los satélites Landsat. Fue necesario el uso de índices de vegetación y de combinaciones de bandas para obtener una clasificación de la cobertura y uso de los suelos efectiva. Se identificaron cambios cualitativos y

cuantitativos que corroboran el aumento de las zonas de extracción de carbón, así como también el aumento de las extensiones de los municipios en donde esta alojada la mina (Acero, 2022).

Martínez y Delgado (2018) exponen que la riqueza de un país está contenida en el capital natural, compuesto por tierras para la agricultura, áreas protegidas, bosques, agua, minerales y energía; el capital intangible, compuesto por capital humano, capital social y capital institucional; y por el capital producido, que incluye maquinaria, equipos e infraestructura. El reto de la política pública, es cómo hacer para que esta riqueza crezca y contribuya al bienestar social.

Es por esto, que se busca realizar el presente proyecto en el bajo Cauca Antioqueño, específicamente en la propiedad minera Nechí Aluvial, en el occidente del país, abarcando municipios tales como El Bagre, Zaragoza, Caucasia, Nechi y Anorí. A través de este análisis multitemporal de coberturas de la tierra en determinado lapso de tiempo, y considerando el cambio en la cobertura como un factor incidente en la alteración de la biodiversidad, se desea dar solución al siguiente cuestionamiento: ¿Existen cambios considerables a través del tiempo en las coberturas? ¿Cuáles son los posibles cambios en las coberturas a través del tiempo mediante un análisis multitemporal en zona de minería aurífera aluvial por parte de industrias de minería formalizadas e informales?

1.2 Justificación

Un análisis multitemporal, es de vital importancia para zonas como el Bajo Cauca Antioqueño, ya que este tipo de estudios permiten evaluar factores como la pérdida en la vegetación, degradación de los suelos y la posible contaminación de los cuerpos de agua. Esto de modo que se permita por medio del análisis, cuantificar dichos cambios y evaluar el impacto en el entorno en el cual realizan la explotación minera.

Por otro lado, la minería puede llegar a contaminar el recurso hídrico con metales pesados, productos químicos y otros contaminantes. Este tipo de estudios permitirían ayudar a identificar las fuentes de contaminación y evaluar el posible impacto o repercusión sobre la salud humana y el medio ambiente.

Por lo cual, este tipo de estudios son imprescindibles para determinar si hay efectos negativos o positivos con los métodos utilizados para la extracción del oro en el país, permitiendo saber si por ejemplo, la minería puede causar la pérdida de vegetación, o si también puede crear nuevos hábitats para especies

animales. Este análisis multitemporal puede ayudar a identificar los cambios positivos y negativos, y a evaluar su posible impacto en el medio ambiente. Además, con los resultados generados por esta investigación se tiene como objetivo el poder dar a conocer a los entes involucrados y comunidades si las medidas utilizadas por la minería en Colombia son las adecuadas, si sus métodos de mitigación están siendo los adecuados para el tipo de intervención que realizan.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Determinar el cambio de las coberturas a través del tiempo mediante un análisis multitemporal en la zona hidrográfica del Río Nechí entre los años 2014- 2023.

2.2 Objetivos específicos

- Determinar los cambios en las coberturas en escalas de tiempo mediante un análisis multitemporal, definir los cambios, donde ocurren y si se concentran en municipios en específico
- Generación de cartografía temática con los cambios de coberturas a través del tiempo.
- Validar la existencia de impacto en el recurso forestal
- Monitorear el estado de la cobertura vegetal de los años 2014 y 2023 mediante el Índice de Vegetación Normalizada (NDVI)
- Evaluar la cobertura de zona de extracción minera en la zona de influencia del río Nechí
- Concluir si los cambios de cobertura guardan relación espacial con fuentes hídricas o actividades antrópicas y zonas urbanas.

7. 3. Antecedentes

Son múltiples los estudios que se han llevado a cabo alrededor del mundo con respecto a análisis multitemporales de coberturas del suelo por medio de imágenes satelitales, tales son los casos como evaluar los cambios en el paisaje de las afueras de Praga de 1990 a 2012, en el cual se hizo un seguimiento de los cambios en el paisaje utilizando los datos de cobertura del suelo de CORINE.

En este estudio se confirmó que la tendencia que surge con frecuencia en Europa, a saber, el aumento de la superficie urbana a expensas de la tierra cultivable. Por otro lado, el aumento de pastos en las zonas más alejadas de la ciudad. Estos cambios se analizan más encontrar regularidades relativas al relieve, a la distancia de la ciudad ya la infraestructura de transporte y asentamiento.

El sur de Yucatán ha sido identificado como un Punto caliente de deforestación. Los estudios de cambio de suelo documentan la magnitud de la pérdida de bosques a escala regional y estudios de casos proporcionar información sobre los impulsores de la deforestación. Esos estudios han pagado un mínimo atención al análisis subregional, especialmente a los discretos unidades de gestión de la tierra por encima del nivel del hogar. El análisis del cambio en los bosques de tierras altas aborda la gama de variación en la deforestación entre 96 tejidos y la Reserva de la Biosfera de Calakmul, las dos unidades dominantes de tenencia y manejo de la tierra en la región. Las imágenes satelitales, el censo y los datos de tenencia de la tierra se han utilizado para establecer el alcance y la ubicación de la deforestación, patrones y técnicas multivariadas que se emplean para identificar variables biofísicas y socioeconómicas que explican tales patrones.

Los resultados muestran que, para el período de 1984- 1993, la deforestación en el sur de Yucatán no fue tan frecuente como implica su designación de punto caliente. Tres se identifican grupos de deforestación. Una regresión logística análisis establece que el tamaño de las propiedades forestales, crecimiento de la población y ubicación en el gradiente de precipitación se correlacionan con ejidos que experimentaron mayor deforestación tasas que el resto de las unidades de tenencia de la tierra. Para el Período 1993–2000, programas de conservación y cambios en el contexto económico de esta “frontera hueca” contribuyó para reducir las tasas y el alcance de la deforestación. Este análisis ilustra la heterogeneidad espacio-temporal de gran parte cambio de los bosques tropicales y la advertencia de que debe traer a formulaciones simples de modelar este cambio y prescribir políticas para controlarlo (Rueda, 2010).

En Peru, se realizó un estudio denominado “impacto de las actividades antrópicas en las áreas naturales protegidas, así como conocer el tipo de actividades antrópicas que se realizan y estudiar los efectos que producen sobre las zonas de protección. Teniendo en cuenta lo anterior, se concluyó que la ocupación humana, la minería, la agricultura, la ganadería, el transporte y los hidrocarburos son las actividades que tienen mayor presencia en los sectores declarados como áreas naturales protegidas, produciendo un cúmulo de alteraciones que terminan generando contaminación, deforestación y

desaparición de un hábitat armonioso para la flora y fauna. Se termina demostrando que la acción humana sin control afecta completamente las áreas que se formulan para poder proteger y conservar la diversidad natural (Roldan, 2021).

En Venezuela, se realizó un análisis multitemporal y de la estructura horizontal de la cobertura de la tierra en el Parque Nacional Yacambú en estado Lara, estudio en el cual se busco determinar el estado de las coberturas en un periodo de tiempo de 2000 al 2008, en el cual se realizo un análisis de su estructura por medio de la evolución temporal, superponiendo mapas de coberturas obtenidos a través de imágenes satelitales, por lo cual se pudo determinar que hay un alto grado de conservación de coberturas en áreas distantes a las vías de acceso y una importante afectación, por expansión de la frontera agrícola. La composición estructural, obtenida a través del cálculo de índices estructurales, apunta a procesos de fragmentación en algunas coberturas naturales (Molina y Albarrán, 2013).

Este tipo de estudios o investigaciones permite ser base para diseñar estrategias para el control efectivo de la expansión de la frontera agrícola, orientada a incentivar la conciencia ambiental, para así proteger los recursos naturales de los que depende su desarrollo y calidad de vida. Similar a esto, es el caso estudio de fragmentación del paisaje empleando análisis multitemporal de imágenes de satélite Landsat TM y ETM+ en el municipio de Montelíbano, Córdoba-Colombia.

Teniendo como fin entender la dinámica espacial de la explotación a cielo abierto de los yacimientos de níquel al sur del departamento de Córdoba-Colombia, el objetivo del artículo fue determinar el estado de la fragmentación del paisaje a partir del cambio de coberturas entre los años 1986 y 2013 utilizando imágenes Landsat TM y ETM+, las cuales fueron sometidas a varios procesos como correcciones radiométricas y transformaciones, los cuales suministran imágenes adecuadas para la correcta clasificación de las coberturas. Los resultados muestran alteraciones en la configuración del territorio, donde se identificó una reducción en rastrojos bajos y tala de bosques secundarios. La dinámica antrópica generó un paisaje fragmentado con diferentes niveles de perturbación (Manrique y García, 2019).

Bonilla y Bonilla (2018) desarrollaron un estudio para evaluar la transformación de las coberturas vegetales y uso del suelo en la llanura amazónica colombiana en Puerto Leguízamo- Putumayo, estudio

en el cual se busco caracterizar la transformación de la cobertura vegetal en el margen de la vía La Tagua-Puerto Leguízamo y su incidencia en el calentamiento global. Para ello, se presentó el contexto histórico de la colonización en el municipio que provocó la transformación ecológica del paisaje; se analizó el comportamiento de variables climáticas, como precipitación y temperatura; y se mide la deforestación y emisión de CO₂ por conversión de bosque a pastos, en el periodo 2002-2016. Este estudio de caso permite ver cómo los cambios en la cobertura y uso del suelo en la Amazonía colombiana, fruto de procesos de colonización, han elevado la emisión de gases de efecto invernadero, como el CO₂.

Otro de los casos de estudio se da en Manizales, en donde se realizó un 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 donde se presentó un análisis multitemporal de una zona con influencia de dos sistemas productivos la ganadería y la minería y sobre la cual se presentan impactos ambientales significativos. La metodología partió de la utilización y digitalización de fotografías aéreas de los años 1998 y 2010 y una imagen tomada de *Google Earth* del año 2015 debidamente georreferenciada, se trabajó con a una escala 1:25000; así mismo, se utilizó el software ArcGIS para el procesamiento de la información. En el análisis se estableció como han sido las variaciones en las coberturas vegetales en el tiempo, la influencia de los sistemas productivos sobre las áreas boscosas, las áreas que han tenido procesos de recuperación y otras que con el tiempo han ido desapareciendo. Este tipo de investigaciones de análisis multitemporal permite realizar procesos de planificación del territorio, entendiendo la evolución de las problemáticas y buscando a través de procesos planificados la solución de las mismas (Flores et. al., 2016)

Por último, en el Santuario de Flora y Fauna Los Flamencos, por actividades antrópicas se ha ido interrumpiendo el equilibrio en las coberturas naturales, por lo cual se hace necesario emplear herramientas como la teledetección y los Sistemas de Información Geográfica. El desarrollo del trabajo se basó en un análisis multitemporal de imágenes satelitales de los años 1987 y 2007, siguiendo los lineamientos impuestos por la metodología CORINE Land Cover, que fue desarrollada por primera vez en Europa e implementada luego en Colombia, gracias a la ejecución de varios proyectos de estudios de cobertura vegetal a nivel nacional. Adicionalmente, para ese estudio de caso se efectuó la interpretación visual asistida por computador de imágenes Landsat, utilizando medios informáticos especializados. Los resultados finales fueron analizados estadísticamente y plasmados en el mapa de cambios en la cobertura entre los años mencionados (Corredor et. al., 2011)

8. 4. Referente teórico

Actividades antrópicas: Son todos aquellos actos realizados por el ser humano que impactan sobre el medioambiente donde las lleva a cabo. Cutipa-Luque et al. (2020) explican que la acción humana que impacta sobre el medioambiente es, por esencia, diversa, y se la debe de entender como una conjugación de actividades relacionadas con actividades productivas de diversa índole y con la ocupación humana.

Cobertura del suelo: La cobertura del suelo pasa a ser uno de los factores más eficientes en la minimización de los efectos indeseables, que se derivan de la exploración de los suelos agrícolas, debido, especialmente, a la acción protectora proporcionada por los residuos orgánicos dejados por los cultivos, los cuales, actúan interceptando las gotas de lluvia y disipando su energía cinética (Saturnino & Landers, 1997). La cobertura es un factor para el éxito de la producción agrícola en la siembra directa, principalmente, en lo referente a la economía de agua. Dentro de las principales características buscadas, las plantas utilizadas deben proteger el suelo y mejorar sus propiedades físicas, químicas y biológicas para el cultivo siguiente (Campos et al. 1995; Furlani et al. 2008).

Sensores remotos: Según Schowengerdt (1997) un sensor remoto es el conjunto de dispositivos que aprovechan el reflejo de la luz de un objeto en la superficie de la tierra para capturar sus propiedades espectrales, lo cual se logra por medio de mediciones hechas desde aeroplanos y satélites. Estas medidas son datos obtenidos a distancia que quedan capturados en fotografías aéreas o imágenes satelitales.

Sistemas de Información geográfica: El sistema de información geográfica proporciona un medio para mantener bases de datos geográficos, como una herramienta capaz de hacer un análisis espacial, para proporcionar información a un sistema de apoyo a las decisiones gerenciales (McDaniel & Gates, 2011).

Clasificación de imágenes satelitales:

Estudios multitemporales: Son análisis de tipo espacial realizados mediante la comparación de las coberturas interpretadas en imágenes de satélite, fotografías aéreas o mapas de una misma zona para diferentes periodos de tiempo. Permite evaluar los cambios en la situación de las coberturas que han sido

clasificadas, deduciendo la evolución del medio natura o las repercusiones de la acción humana sobre ese medio (Chuvienco, 1990)

Metodología *Corine Land Cover*: El esquema metodológico *Corine Land Cover* contempla las siguientes etapas: adquisición y preparación de la información, análisis e interpretación de las coberturas, verificación de campo, control de calidad y generación de la capa temáticas a diferentes escalas (Melo y Camacho, 2005)

Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI): El índice de vegetación normalizado (NDVI) es un indicador numérico que utiliza las bandas visible e infrarroja cercana del espectro electromagnético, y es adoptado para analizar las mediciones de sensores remotos y evaluar si el objetivo que se observa contiene vegetación verde viva o no (Rouse et al., 1974). El NDVI es también un parámetro importante en varios tipos de modelos a escala local, regional y global (Maskova et al., 2008). Por tanto el índice de vegetación que se utilizó en este trabajo, fue el NDVI, debido a ser un buen indicativo de la actividad fotosintética de las plantas (Bannari et al., 1995).

Minería aurífera aluvial en Colombia: Según la Oficina de las Naciones Unidas contra la droga y el delito (2022) los hallazgos del monitoreo llevado a cabo en el territorio nacional durante el 2021 reportan que 13 de los 32 departamentos presentan EVOA en tierra con un total de 98.567 ha; el 88 % se concentra en Chocó, Antioquia y Bolívar y 10 municipios concentran el 54 % de la presencia del fenómeno, de donde se extrae el 26 % de la producción de oro nacional. Vale anotar que solo una baja porción de las EVOA detectadas se encuentran dentro del marco legal: el 65 % corresponde a Explotación ilícita y cerca de la mitad de la EVOA en tierra se encuentra en Zonas excluibles de la minería.

De 101 municipios con EVOA en el país (9 % del total nacional), 10 de ellos concentran el 54 % de la detección nacional (52.859 ha): Zaragoza, Nechí, Nóvita, El Cantón de San Pablo, Cáceres, Istmina, El Bagre, Ayapel, Río Quito y Unión Panamericana. De estos municipios se obtiene el 26 % de la producción de oro nacional y se presenta alta explotación ilícita de oro (59 %) (Oficina de las Naciones Unidas contra la droga y el delito, 2022).

Minería aurífera aluvial en el Bajo Cauca Antioqueño: El Bajo Cauca Antioqueño es una zona de explotación aurífera, donde la actividad económica desarrollada en gran porcentaje es la minería aluvial

o a cielo abierto, la cual se lleva a cabo en las riberas, cause o terrazas de los ríos por parte de grandes, medianos y pequeños mineros a través de procesos industriales y artesanales en la obtención de un mineral de gran rentabilidad económica en el mercado. Esta zona de alto comportamiento productivo, presenta una problemática social y ambiental, reflejada en altos índices de desigualdad, NBI, pobreza, marginalidad, desempleo, contaminación acuifera, salubridad y demás factores dinamizadores de violencia, conflictividad social y criminalidad pues no solo convergen este tipo de problemas socioeconómicos (Gutierrez & Sarmiento, s.f.)

9. 5. Metodología

5.1. Enfoque metodológico

El presente estudio se denomina como cuantitativo, ya que parte de el se basa en mediciones numéricas y análisis para establecer patrones de comportamiento o cambios que se puedan generar en las coberturas por efectos de la minería de aluvión.

5.2. Tipo de estudio

El tipo de estudio de este proyecto se determina como descriptivo o Ex post facto de modo que se describirá las características de un área determinada, que se ve determinada por efectos que ya han sido generados y las causas de estos cambios están en el pasado.

5.3. Procedimiento



FASE I

Determinar los cambios en las coberturas en escalas de tiempo mediante un análisis multitemporal, definir los cambios, donde ocurren y si se concentran en municipios en específico

5.3.1. Búsqueda de imágenes satelitales

Como actividad principal, se buscó obtener las mejores imágenes satelitales por medio de diferentes plataformas con el objetivo de que tuvieran la menor cantidad de porcentaje de nubosidad posible correspondientes a lapso de tiempo determinado para la presente investigación (2014-2023). Para la obtención de imágenes de la zona de estudio, se realizó la búsqueda mediante el visor de datos de imágenes espaciales *Earth Engine Explorer* (<https://earthexplorer.usgs.gov/>).

5.3.2. Desarrollo de trabajo mediante imágenes Landsat 8 y 9 Nivel 2

Este tipo de imágenes “Landsat nivel dos”, son imágenes de teledetección que han sido procesadas para corregir las distorsiones atmosféricas y geométricas. Esto las hace más precisas y confiables para su uso en aplicaciones científicas y de gestión. Dichas imágenes tienen las siguientes características principales:

- **Corrección atmosférica:** Estas imágenes han sido corregidas para eliminar los efectos de la atmósfera, como la dispersión de la luz y la absorción, permitiendo que los datos de la imagen representen con mayor precisión la reflectancia de la superficie terrestre.
- **Corrección geométrica:** Las imágenes Landsat nivel dos han sido corregidas para las distorsiones geométricas causadas por la órbita del satélite. Esto permite que las imágenes se superpongan con mayor precisión y se utilicen para crear mapas precisos.
- **Integración de bandas:** Las imágenes Landsat nivel dos combinan datos de varias bandas espectrales para crear imágenes multiespectrales. Esto permite a los usuarios identificar diferentes tipos de cobertura del suelo y objetos.

5.3.3. Procesos y análisis

En el presente estudio se buscó realizar un mosaico de imágenes satelitales Landsat, los cuales se hicieron para crear una imagen continua de un área amplia como lo es en este caso el área de estudio, la cual abarca un total de 5 municipios. Esto permitió ver los cambios en la cobertura del suelo, los recursos naturales y el medio ambiente a lo largo del tiempo, una vez el mosaico fue un producto óptimo para la interpretación visual, se procedió a interpretar las coberturas, una vez fueron realizadas las composiciones de color (RGB), uso de filtros digitales, ajustes de contraste y realces para una mejor visualización, etc.

5.3.4. Determinación de cambios en las coberturas

- **(Interpretación digital)**

En esta fase se interpretó de manera visual la imagen alternando las bandas para resaltar ciertos aspectos importantes en las coberturas, destacando algunas características como el tono, textura, ubicación de caracteres importantes tales como cuerpos de agua (ríos, lagos), caminos, tejidos urbanos, etc.

5.3.5. Clasificación supervisada

Se realizó una identificación y selección de regiones de interés, a las cuales se les asignó un valor numérico para cada punto, se crearon las firmas espectrales, cada píxel fue categorizado y asociado a una determinada categoría de la leyenda de acuerdo a su mayor semejanza. En el caso que el píxel fuese insuficientemente similar, este se catalogó como “desconocido”. Además se utilizaró un clasificador de máxima verosimilitud, donde por último se realizó el respectivo cálculo de la separabilidad espectral.

5.3.6. Análisis multitemporal

Se realizó el análisis multitemporal mediante la comparación visual de modo que se compararon las imágenes de satélite visualmente para identificar cambios en la superficie terrestre. Además mediante dos métodos fue calculada la variabilidad en áreas para los años de interés, en donde en primera instancia se multiplicó **Area cobertura clasificada= Numero de los pixeles*Resolucion espacial²**, mientras que el otro método se basó en hacer uso de la herramienta *change detection* de ArcGIS Pro.

FASE II***Generación de cartografía temática con los cambios de coberturas a través del tiempo.***

Una vez realizado el análisis multitemporal, se procedió a generar los mapas de los años de interés y la respectiva diferencia a través de los años por medio de “*Raster calculator*”, generando un mapa equivalente al cambio en coberturas.

FASE III***Validar la existencia de impacto en el recurso forestal y monitorear el estado de la cobertura vegetal de los años 2014 y 2023 mediante el NDVI***

Posteriormente, se validó la existencia de impacto en el recurso forestal haciendo uso de la herramienta *change detection*, en la cual se determinó el cambio de la cobertura de bosque denso a que otro tipo de cobertura se convirtió, por ejemplo: *extensión de variación de área en el año 2023 de bosque denso convertida en pastos limpios*.

5.3.7. Implementación de Indicador de índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

Para el cálculo del NDVI, se obtuvieron datos espectrométricos en dos bandas específicas: rojo y cerca del infrarrojo. Una vez que se dispuso de los datos espectrométricos, se pudo calcular los valores de NIR y R. A continuación, se logró sustituir estos valores en la fórmula del NDVI para calcular el índice.

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{R}) / (\text{NIR} + \text{R})$$

donde:

- NIR es la reflectancia de la luz cerca del infrarrojo
- R es la reflectancia de la luz roja

FASE IV

Evaluar la cobertura de zona de extracción minera en la zona de influencia del río Nechi

Concluir si los cambios de cobertura guardan relación espacial con fuentes hídricas, actividades antrópicas y zonas urbanas.

5.3.8 Change detection

Para llevar a cabo esta fase, se implementó la herramienta *Change detection* del software ArcGIS Pro, la cual permitió calcular la diferencia restando dos rásteres para identificar cambios en los valores de píxel, utilizando los ráster de los años 2014 y 2023 creando un ráster de cambio que muestra la ubicación y el tipo de cambio que se generó, es decir, especifica la cobertura que tenía en años anteriores y cuál es la actual, además de su área (este caso específicamente aplicará para evaluar la cobertura de río a que otra cobertura pasó del 2014 al 2023 o si se mantuvo en una misma cobertura en determinado municipio). Por otro lado, con la información de tejidos urbanos para los cinco municipios objeto de interés, se evaluó las coberturas existentes en el área de influencia de dichas cabeceras municipales realizando un buffer 2 kilómetros.

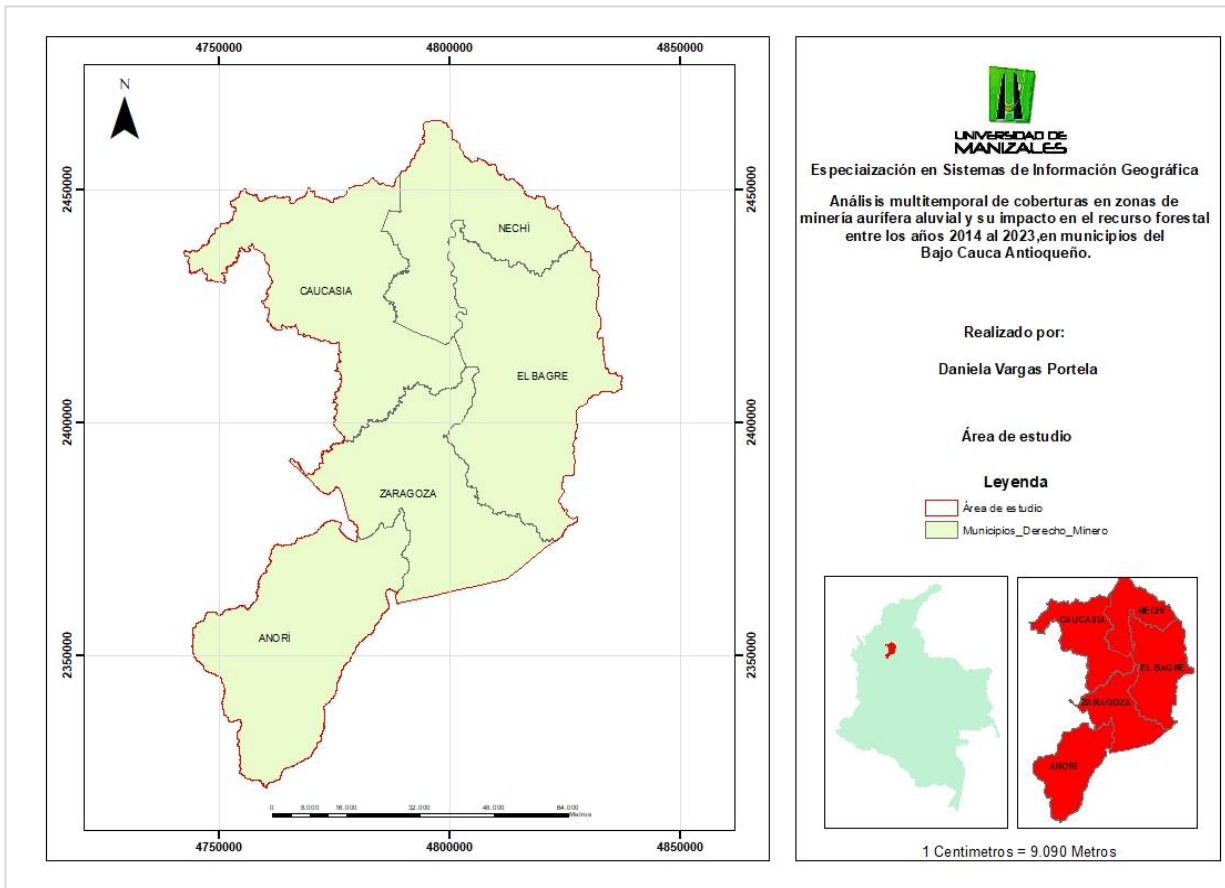
6. Resultados

Objetivo 1: Determinar los cambios en las coberturas en escalas de tiempo mediante un análisis multitemporal, definir los cambios, donde ocurren y si se concentran en municipios en específico

6.1. Área de estudio

En primera instancia se realizó búsqueda de cartografía e información documental, la cual permitió conocer posibles focos de minería en el Bajo Cauca Antioqueño, por lo cual, se seleccionó 4 municipios (Figura 1) en donde opera una de las empresas más grandes de minería que existe en Colombia, la cual tiene derecho minero en Zaragoza, El Bagre, Caucaasia, Nechí y Anorí.

Figura 1. Área de estudio



Fuente: Autor

6.2. Imágenes satelitales

Para el desarrollo de este estudio se hizo uso de imágenes satelitales Landsat 8 para el año 2014 y Landsat 9 para el año 2023, las cuales cuentan con las siguientes características (**Tabla 1**):

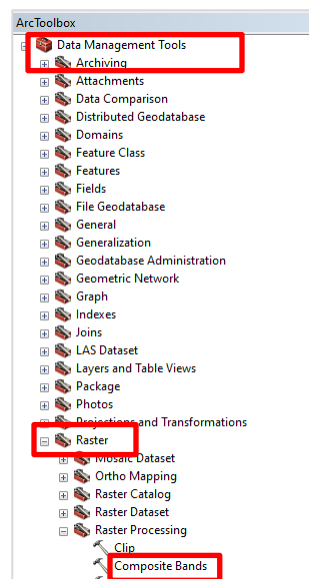
Tabla 1. Características imágenes Landsat

ID_Producto	Año	Formato	Profundidad Pixel (Bit)
LC08_L2SP_009054_20141226_20200910_02_T1	2014	TIFF	30
LC08_L2SP_009055_20141226_20200910_02_T1			
LC09_L2SP_009054_20230805_20230808_02_T1	2023	TIFF	16
LC09_L2SP_009055_20230805_20230808_02_T1			

6.3. Composición de bandas

En primera instancia, se procedió a realizar una composición de bandas para cada una de las imágenes (4) para los años 2014 y 2023 (**Figura 2**).

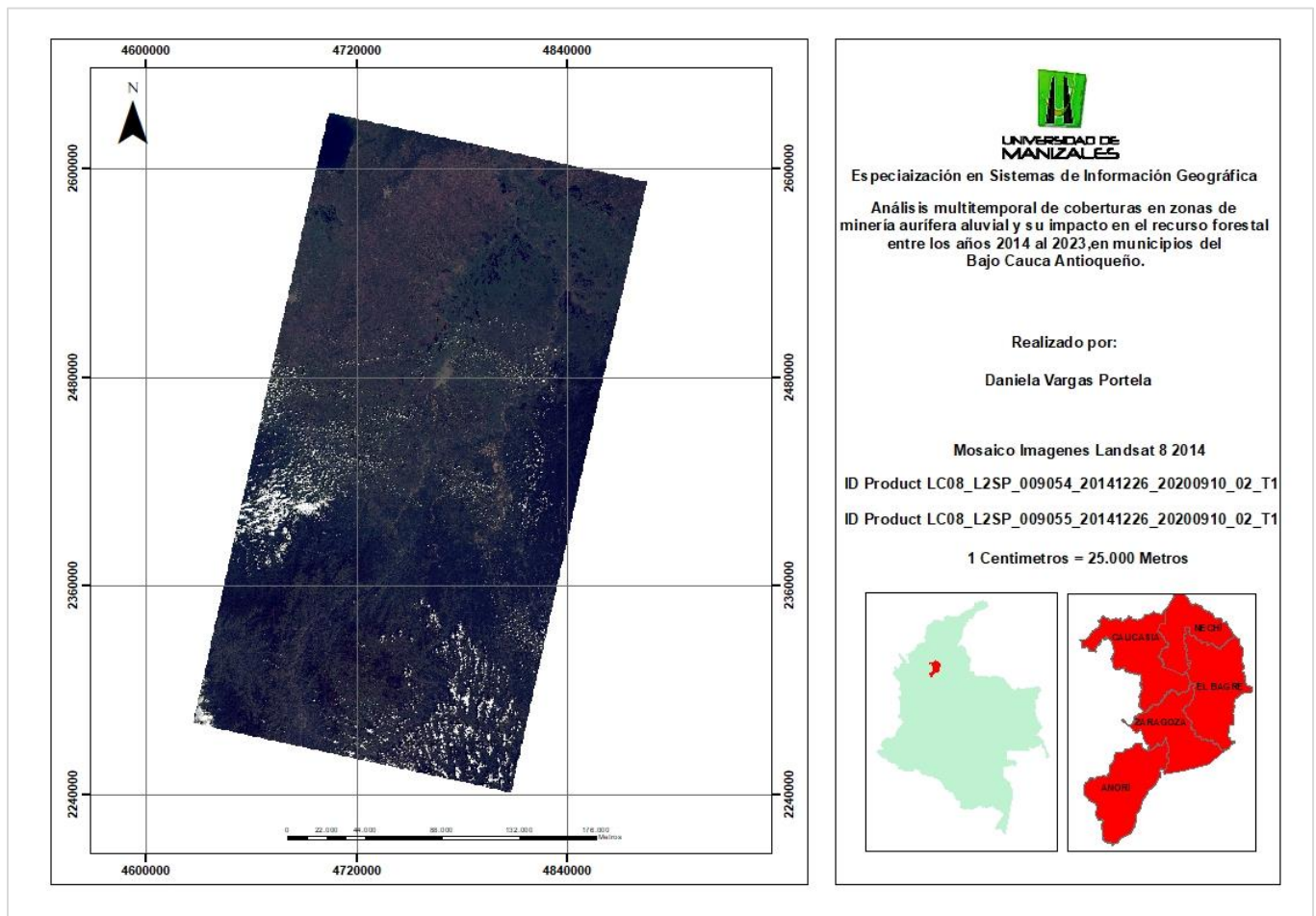
Figura 2. Arctoolbox > Datamanagement tools > Raster > Composite bands



6.4. Mosaico

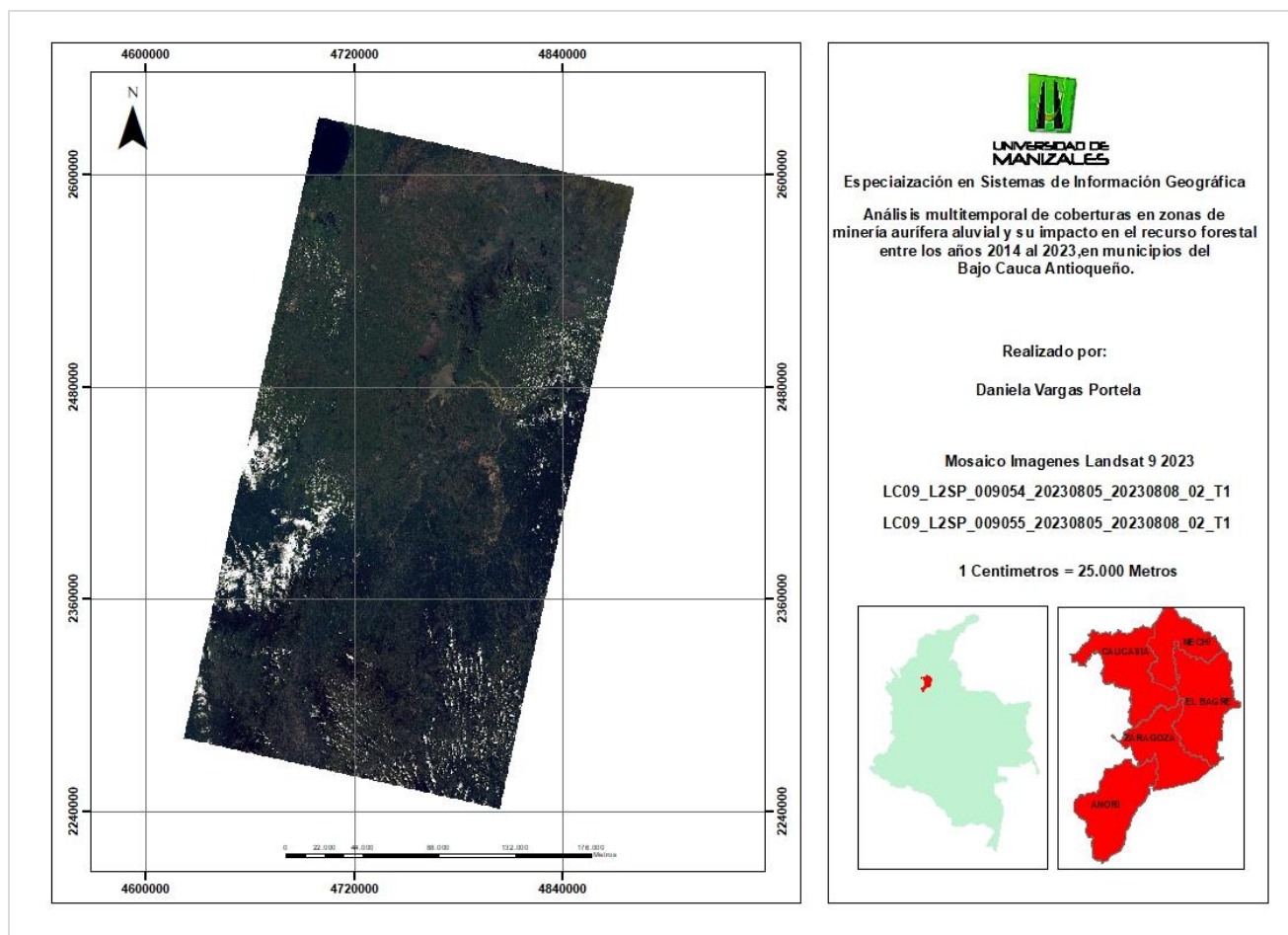
Una vez realizadas las composiciones para las 4 imágenes satelitales, se realizaron dos mosaicos, por medio de la herramienta *Mosaic to new raster*, por los cuales se obtuvieron mosaicos de los años 2014 (1) (Figura 3) y 2023 (1) (Figura 4).

Figura 3. Mosaico año 2014



Fuente: Autores

Figura 4. Mosaico año 2023

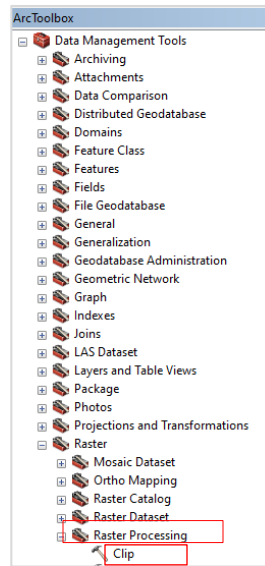


Fuente: Autores

6.5. Clip

Una vez realizados los mosaicos, se procedió a realizar un *clip* para ambos periodos de tiempo, mediante la herramienta *Raster processing* (Ver **Figura 5**, **Figura 6** y **Figura 7**)

Figura 5. Data management tools> Raster processing> Clip



Fuente: Autores

Figura 6. Clip área de estudio año 2014

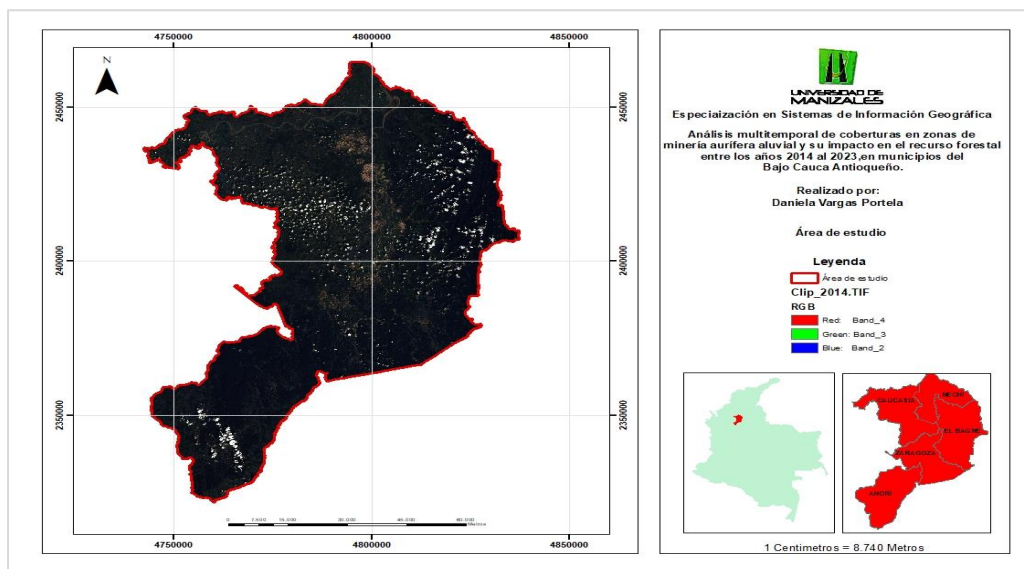
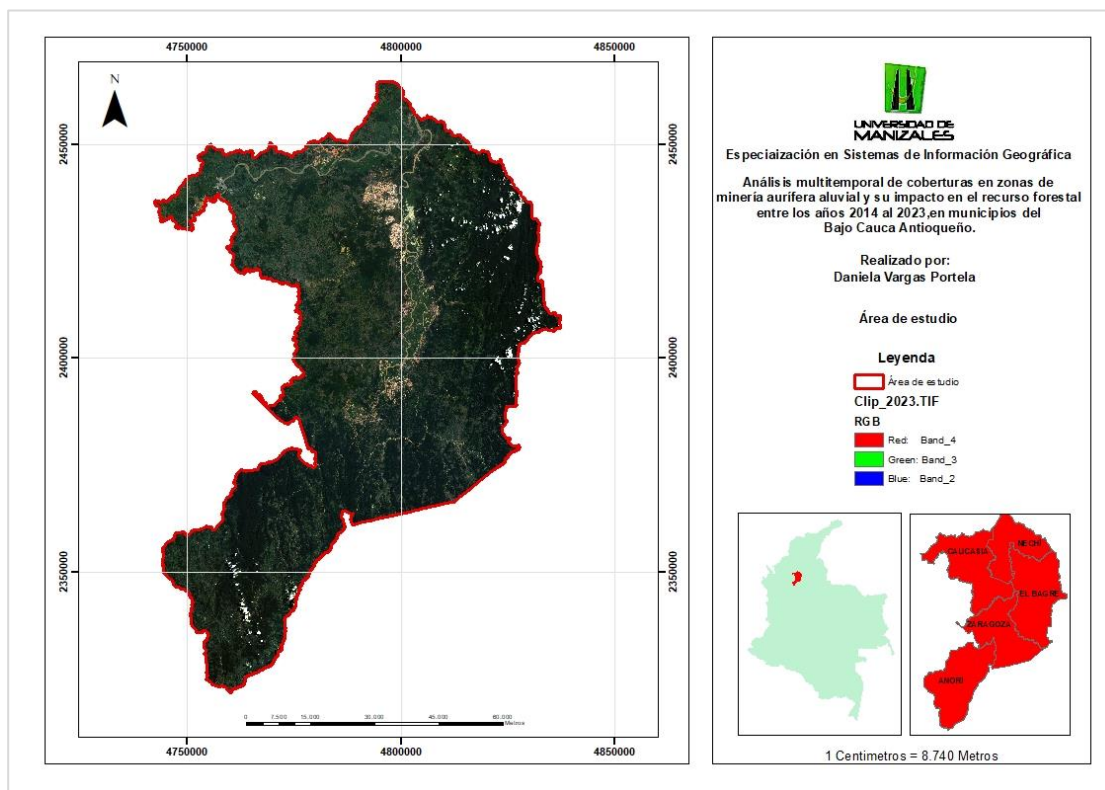


Figura 7. Clip área de estudio año 2023



6.6. Clasificación supervisada

6.6.1. Creación de *shapefile* para semillado según la región de interés (Año 2014)

En primera instancia, se creó un *shapefile* con el fin de hacer un semillado de puntos según las áreas de interés o coberturas, esto según la metodología *Corine Landcover* adaptada para Colombia, a excepción de nubosidad y sombras (Tabla 2).

Tabla 2. Valores asociados a las coberturas identificadas

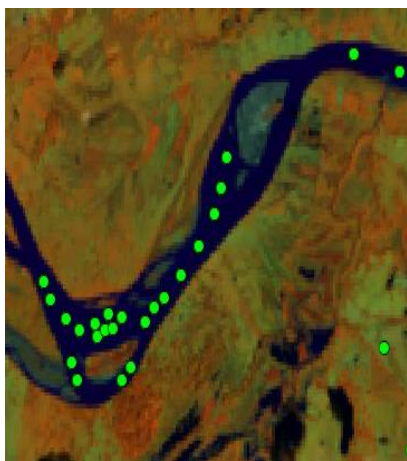
Cobertura	Combinación de bandas	Valor
Ríos	564	1
Lagunas, lagos y cienagas	564	2
Tejido urbano continuo	764	3
Bosque denso	543	4
Tierras desnudas y degradadas	753	5
Zona de extracción minera	432	6
Territorios agrícolas	753	7
Nubosidad	432	8

Cobertura	Combinación de bandas	Valor
Sombras	432	9

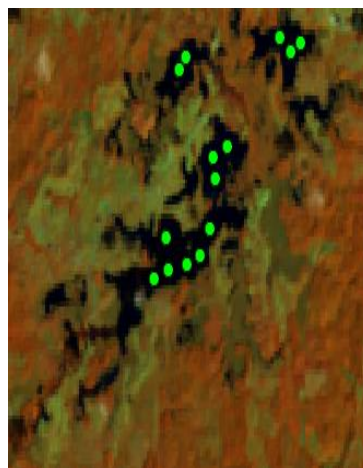
Para realizar dicho semillado, se procedió a realizar cambios en la combinación de las bandas de las imágenes para obtener una mejor visualización, por ejemplo, para la clasificación de los ríos, se trabajó haciendo uso de las bandas 5,6,4, las cuales permitieron definir mucho más estos cuerpos de agua en un color azul intenso. En cuanto a las lagunas, lagos y ciénagas, también se trabajó con la misma combinación de bandas, estos cuerpos de agua se reflejaron de un color azul mucho más oscuro. En cuanto al tejido urbano continuo se usaron las bandas 7,6,4 resaltándolo de colores grises y blancos. El bosque denso se trabajó con la combinación 5,6,4 reflejando los relictos de bosque de manera roja con negro. Las Tierras desnudas y degradadas se evidenciaron mediante la combinación 7,5,3 las cuales se podían apreciar de color rosado claro. Por otro lado, las zonas de extracción minera se visualizaron en color natural 4,3,2, pues mediante estas bandas se lograba apreciar de manera clara en colores beige. Finalmente, la cobertura de territorios agrícolas, se trabajó mediante las bandas 7,5,3 logrando apreciar estas áreas de pastos de color verde brillante, de textura lisa. Cabe resaltar, que también se realizó semillado para la nubosidad y elementos de sombras visualizados en las imágenes.

Figura 8. Semillado según su tipo de cobertura y combinación de bandas (2014)

Ríos 2014 (a)



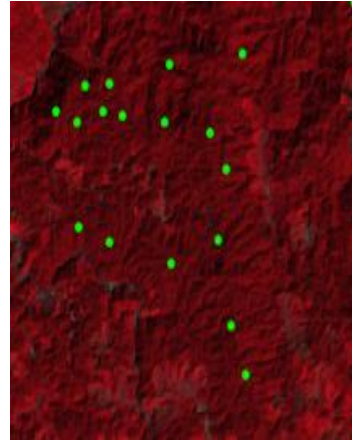
Lagunas, lagos y ciénagas 2014 (b)



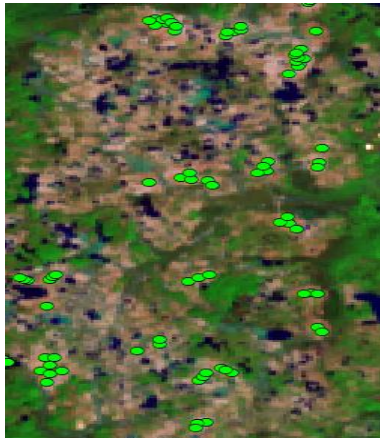
Tejido urbano continuo 2014 (c)



Bosque denso 2014 (d)



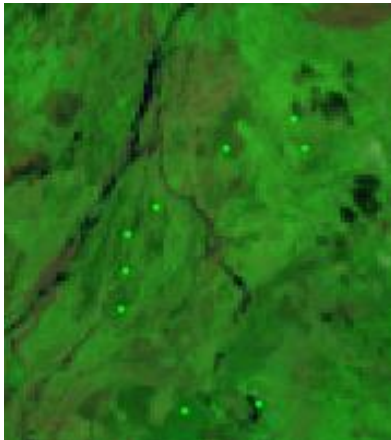
Tierras desnudas y degradadas 2014 (e)



Zona de extracción minera 2014 (f)



Territorios agrícolas 2014 (g)



Nubosidad (h)

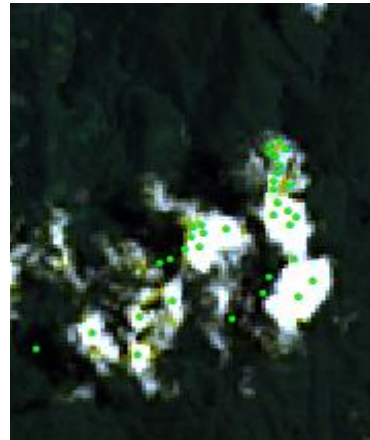
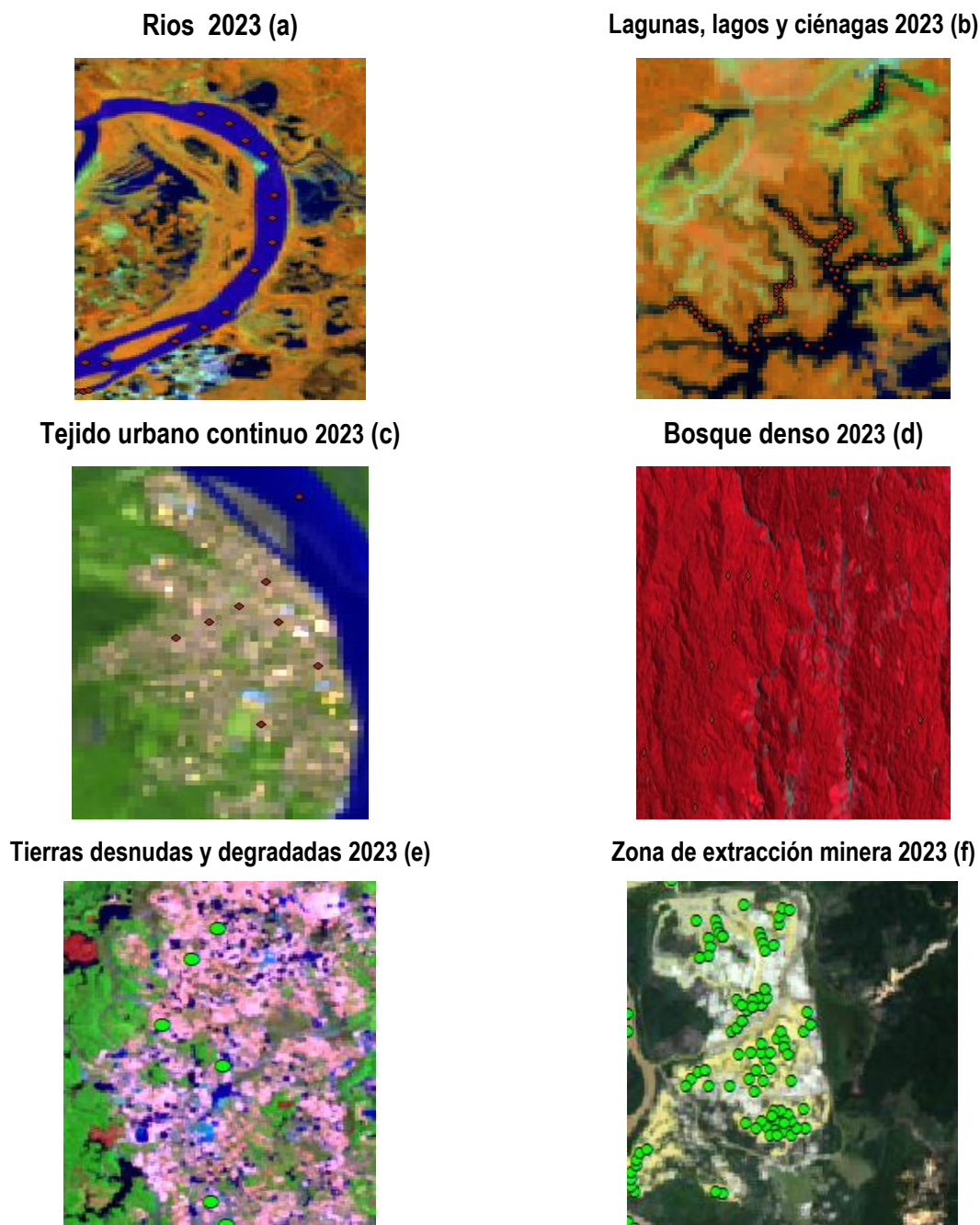


Figura 9. Semillado segun su tipo de cobertura y combinación de bandas (2023).



6.6.2. Creación de firmas espectrales

Mediante la herramienta *Create signatures*, se procedió a crear un archivo con las firmas espectrales, permitiendo seleccionar regiones de interés en la imagen. Para correr esta herramienta se

hizo uso del raster y el shapefile de puntos, dependiendo del año en el cual se iba a trabajar (sea 2014 o 2023).

10.6.3. Clasificador de máxima verosimilitud

Al crear las firmas espectrales, se utilizó el clasificador de máxima verosimilitud, para poder desarrollarse necesitó el *shapefile* de puntos del año de interés y el raster 2014 o 2023.

10.6.4. Analisis de precisión

Con el fin de evaluar los resultados obtenidos en la clasificación supervisada, se realizó una comparación visual comparando la imagen satelital para ambos años del caso de estudio, con respecto a los raster de las clasificaciones supervisadas obtenidas. Por lo cual, se obtuvo que para la clasificación del 2014 un 94,44% corresponde a una clasificación acertada, mientras que el 5,55% fue errónea (**Tabla 3**).

Tabla 3. Analisis de precisión 2014

Cobertura	NO	SI	Total general
Bosque denso	-	10	10
Lagunas, lagos y cienagas	1	9	10
Nubosidad	-	10	10
Ríos	1	9	10
Sombras	-	10	10
Tejido urbano continuo	2	8	10
Territorios Agrícolas	-	10	10
Tierras desnudas y degradadas	-	10	10
Zona de extracción minera	1	9	10
Total general	5	85	90

En la (**Tabla 4**) se representa el análisis de visualización obtenido para el año 2023, donde al igual que el 2014, un 94,44% corresponde a una clasificación acertada, mientras que el 5,55% fue errónea.

Tabla 4. Analisis de precisión 2023

Cobertura	NO	SI	Total general
Lagunas, lagos	1	9	10
Ríos	-	2	2
Bosque denso	-	10	10
Nubosidad	-	10	10

Cobertura	NO	SI	Total general
Ríos	1	7	8
Sombras	-	10	10
Tejido urbano	3	7	10
Terr. Agrícolas	-	10	10
Tierras denudas	-	10	10
Zona de extrac	-	10	10
Total general	5	85	90

Generación de cartografía temática con los cambios de cobertura a través del tiempo

10.6.5. Resultados clasificación de máxima verosimilitud 2014 vs. 2023

10.6.5.1. Metodo 1: Calculo de variación en áreas 2014 vs. 2023

$$\text{Área cobertura clasificada} = \text{Número de los píxeles} * \text{Resolución espacial}^2$$

A continuación, se presentan los resultados obtenidos mediante a clasificación supervisada realizada para el año 2014 (Ver **Tabla 5**) donde se evidencia que las coberturas que mas predominan en la imagen satelital son las de territorios agrícolas con 46,8% y bosque denso abarcando el 38,7% de la imagen satelital.

Tabla 5. Resultados clasificación supervisada 2014

Cobertura clasificada	Acronimo	Nº de píxeles	Área (m ²)	Área (km ²)	Área (ha)	Área (%)	Año
Ríos	R	185675	167107500	167,11	16710,75	2,6%	2014
Lagunas, lagos y cienagas	LI	18137	16323300	16,32	1632,33	0,3%	
Tejido urbano continuo	Tuc	11478	10330200	10,33	1033,02	0,2%	
Bosque denso	Bd	2798185	2518366500	2518,37	251836,65	38,7%	

Cobertura clasificada	Acronimo	Nº de pixeles	Àrea (m ²)	Àrea (km ²)	Àrea (ha)	Àrea (%)	Año
Tierras desnudas y degradadas	Tdd	164353	147917700	147,92	14791,77	2,3%	
Zona de extracción minera	Zem	8245	7420500	7,42	742,05	0,1%	
Territorios Agrícolas	TA	3377732	3039958800	3039,96	303995,88	46,8%	
Nubosidad	-	412944	371649600	371,65	37164,96	5,7%	
Sombras	-	246002	221401800	221,40	22140,18	3,4%	
TOTAL		7222751	6500475900	6500,48	650047,59	100%	

A continuación, se presentan los resultados obtenidos mediante a clasificación supervisada realizada para el año 2023 (Ver **Tabla 6**) donde se evidencia que las coberturas que mas predominan en la imagen satelital al igual que en el año 2014 son las de territorios agrícolas con 48,6% y bosque denso abarcando el 42,4% de la imagen satelital.

Tabla 6. Resultados clasificación supervisada 2023

Cobertura clasificada	Acronimo	Nº de pixeles	Àrea (m ²)	Àrea (km ²)	Àrea (ha ²)	Àrea (%)	Año
Rios	R	114413	102971700	102,9717	10297,17	1,6%	2023
Lagunas, lagos y cienagas	LI	110822	99739800	99,7398	9973,98	1,5%	
Tejido urbano continuo	Tuc	14766	13289400	13,2894	1328,94	0,2%	

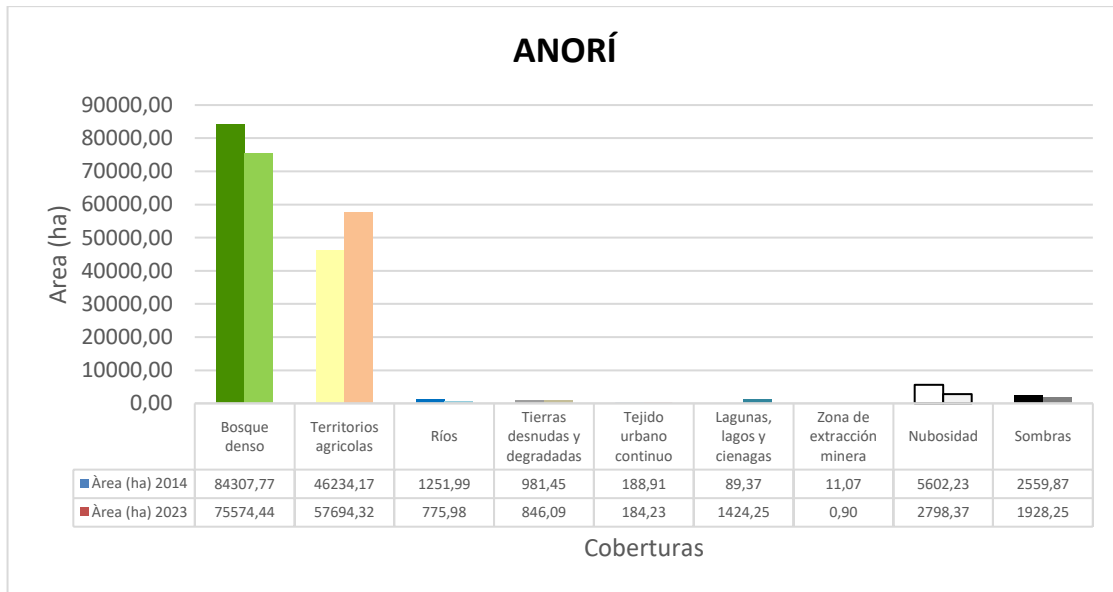
Cobertura clasificada	Acronimo	Nº de pixeles	Àrea (m ²)	Àrea (km ²)	Àrea (ha ²)	Àrea (%)	Año
Bosque denso	Bd	3060219	2754197100	2754,1971	275419,71	42,4%	
Tierras desnudas y degradadas	Tdd	203833	183449700	183,4497	18344,97	2,8%	
Zona de extracción minera	Zem	8809	7928100	7,9281	792,81	0,1%	
Territorios Agrícolas	TA	3513736	3162362400	3162,3624	316236,24	48,6%	
Nubosidad	-	124772	112294800	112,2948	11229,48	1,7%	
Sombras	-	71381	64242900	64,2429	6424,29	1,0%	
TOTAL		7222751	6500475900	6500,48	650047,59	100%	

Resultados clasificación de máxima verosimilitud 2014 vs. 2023 (Anorí)

En el municipio de Anorí, se obtuvo un área total de estudio de 141226,83 ha , donde se logro concluir que (Ver Ilustración 1):

- El bosque denso, tuvo una **disminución** de 8733,33 ha de 2014 al 2023
- El área como territorios agrícolas, tuvo un **aumento** de 11460,15 ha de 2014 a 2023
- Los Ríos tuvieron una **disminución** de 476,01 ha entre los años de estudio
- Las tierras desnudas y degradadas **disminuyeron** en 135,36 ha de 2014 a 2023
- Tejidos urbanos, presenta una **disminución** de 4,68 ha de 2014 a 2023
- En cuanto a lagunas, lagos y ciénagas, se presenta como la cobertura con mayor variabilidad, con un **aumento** en área de 1334,88 ha de 2014 a 2023
- Finalmente, las zonas de extracción minera tuvieron una **disminución** de 10,17 ha de 2014 a 2023

Ilustración 1. Área (ha) 2014 vs. 2023 en el municipio de Anorí

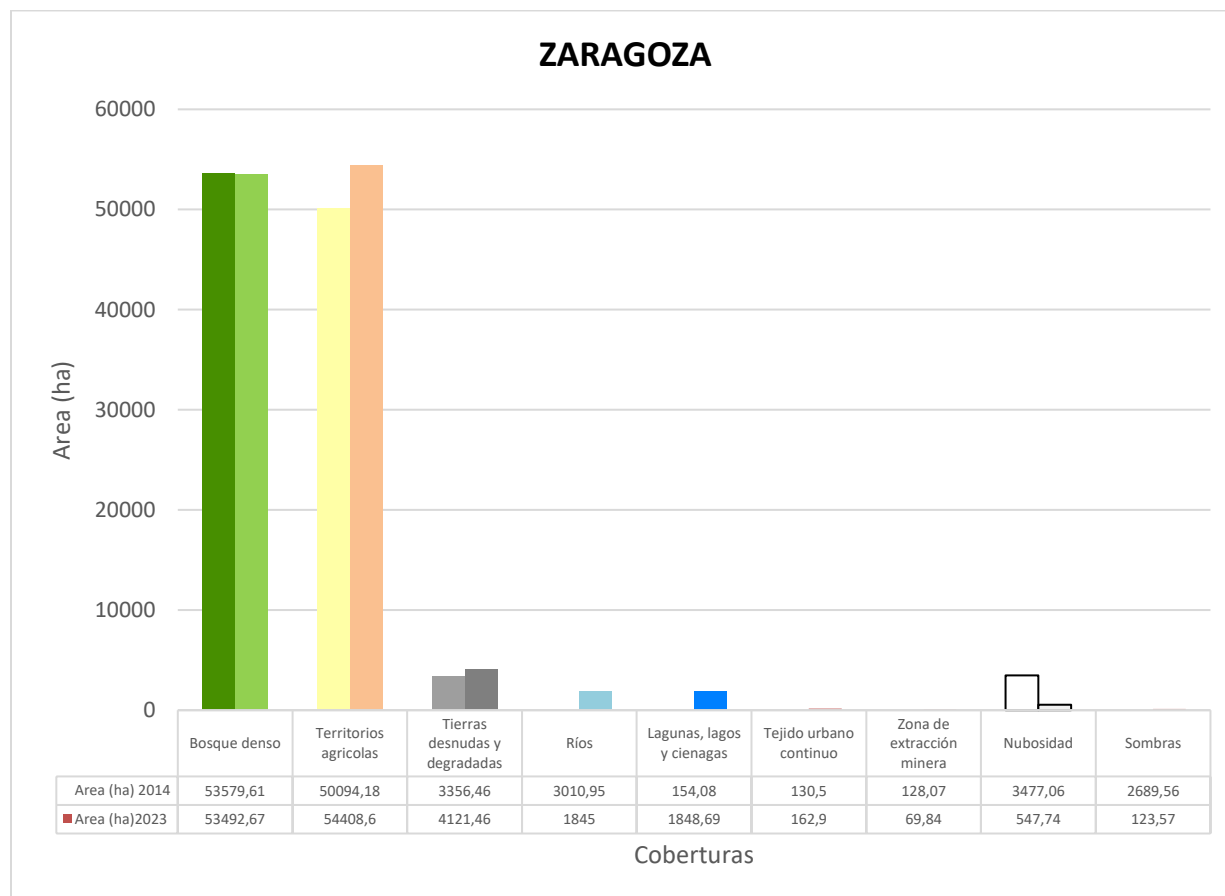


🚧 Resultados clasificación de máxima verosimilitud 2014 vs. 2023 (Zaragoza)

En el municipio de Zaragoza, se obtuvo un área total de estudio de 116620,47 ha, donde se logro concluir que (Ver **Ilustración 2**):

- El bosque denso, tuvo una **disminución** de 86,94 ha de 2014 al 2023
- El área como territorios agrícolas, tuvo un **aumento** de 4314,42 ha de 2014 al 2023
- Los Ríos tuvieron una **disminución** de 1165,95 ha de 2014 a 2023
- Las tierras desnudas y degradadas tuvo un **aumento** de 765 ha de 2014 a 2023
- Tejidos urbanos tuvo un **aumento** de 32,4 ha de 2014 a 2023
- En cuanto a lagunas, lagos y ciénagas, se presenta como la cobertura con mayor variabilidad, con un **aumento** en área de 1694,61 ha de 2014 a 2023
- Finalmente, las zonas de extracción minera tuvieron una **disminución** de 0,58 km²

Ilustración 2. Área (ha) 2014 vs. 2023 en el municipio de Zaragoza

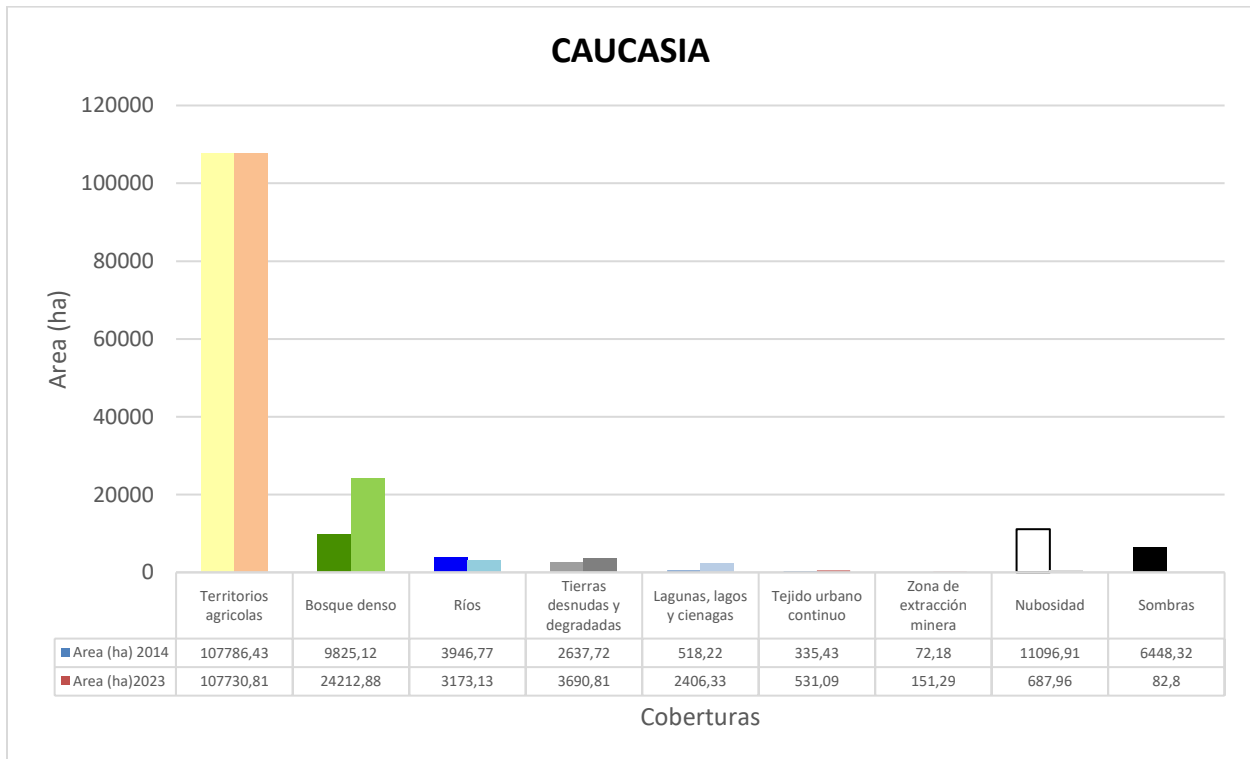


Resultados clasificación de máxima verosimilitud 2014 vs. 2023 (Caucasia)

En el municipio de Caucasia, se obtuvo un área total de estudio de 142667,1 ha donde se logró concluir que (Ver Ilustración 3):

- Los territorios agrícolas tuvieron una **disminución** de 55,62 ha de 2014 a 2023
- El bosque denso, tuvo un **aumento** de 14387,76 ha de 2014 a 2023
- Los Ríos tuvieron una **disminución** de 773,64 ha de 2014 a 2023
- Las tierras desnudas y degradadas **augmentaron** 1053,09 ha de 2014 a 2023
- Tejidos urbanos, presenta un **aumento** de 196,66 ha de 2014 a 2023
- En cuanto a lagunas, lagos y ciénagas, se presenta como la cobertura con mayor variabilidad, con un **aumento** en área de 1888,11 ha de 2014 a 2023
- Finalmente, las zonas de extracción minera tuvieron un **aumento** de 79,11 ha de 2014 a 2023

Ilustración 3. Área (ha) 2014 vs. 2023 en el municipio de Caucasia

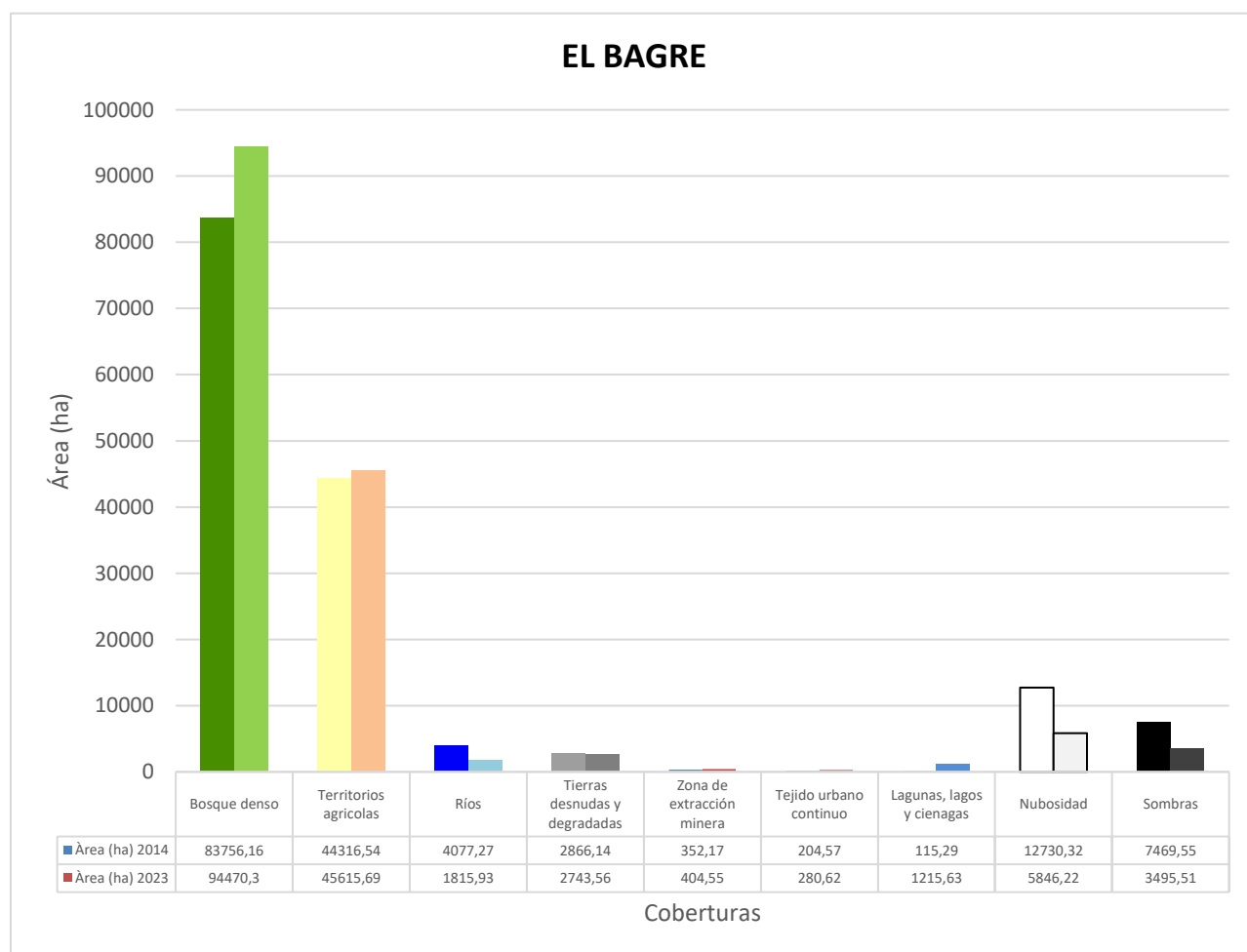


🚧 Resultados clasificación de máxima verosimilitud 2014 vs. 2023 (El Bagre)

En el municipio de El Bagre, se obtuvo un área total de estudio de 155888,01 ha, donde se logro concluir que (Ver Ilustración 4):

- El bosque denso, tuvo un **aumento** de 10714,14 ha de 2014 al 2023
- El área como territorios agrícolas, tuvo un **aumento** de 1299,15 ha de 2014 a 2023
- Los Ríos tuvieron una **disminución** de **2261,34** ha entre 2014 y 2023
- Las tierras desnudas y degradadas tienen una **disminución** de 122,58 ha de 2014 a 2023
- Tejidos urbanos, presenta un **aumento** de 76,06 ha de 2014 a 2023
- En cuanto a lagunas, lagos y ciénagas, se presenta como la cobertura con mayor variabilidad, con un **aumento** en área de 1100,34 ha entre 2014 a 2023
- Finalmente, las zonas de extracción minera tuvieron un **aumento** de 52,38 ha 2014 a 2023

Ilustración 4. Área (ha) 2014 vs. 2023 en el municipio de El Bagre

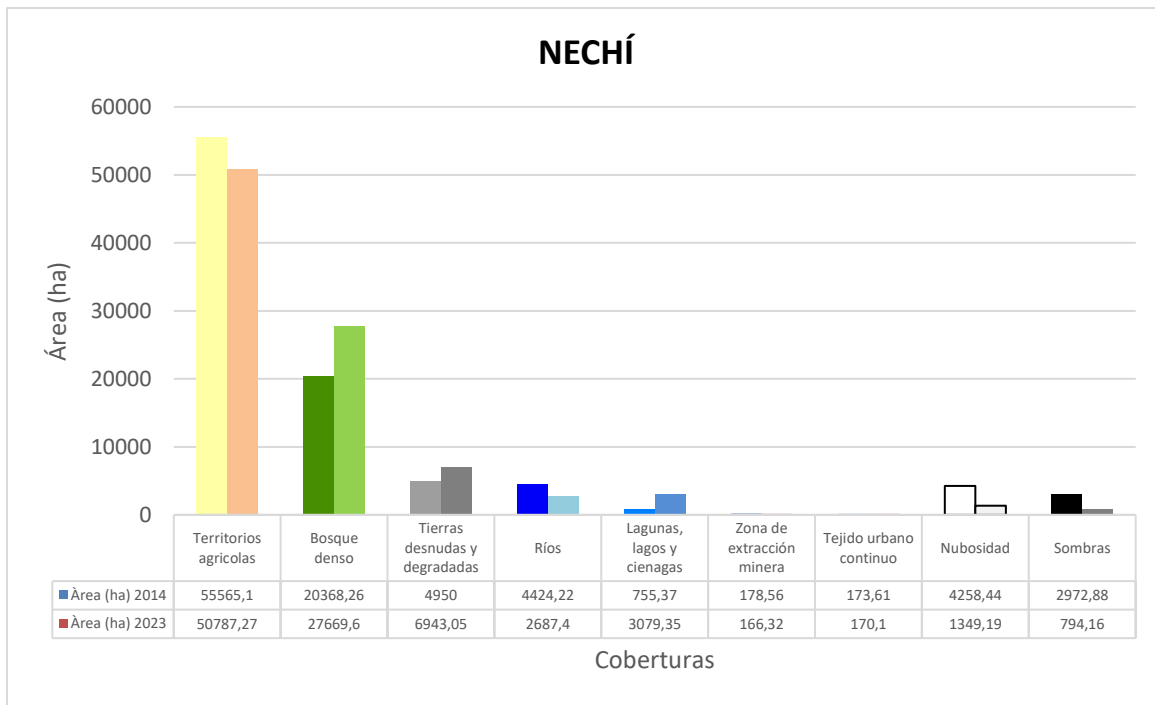


Resultados clasificación de máxima verosimilitud 2014 vs. 2023 (Nechí)

En el municipio de Nechí, se obtuvo un área total de estudio de 93646,44 hectareas, donde se logro concluir que (Ver Ilustración 5):

- El bosque denso, tuvo un **aumento** de 7301,34 ha de 2014 al 2023
- El área como territorios agrícolas, tuvo una **disminución** de 4777,83 ha de 2014 a 2023
- Los Ríos tuvieron una **disminución** de 1736,82 ha entre los años de estudio
- Las tierras desnudas y degradadas tienen un **aumento** de 1993,05 ha de 2014 a 2023
- Tejidos urbanos, presenta una **disminución** de 3,51 ha de 2013 a 2023
- En cuanto a lagunas, lagos y ciénagas, se presenta como la cobertura con mayor variabilidad, con un **aumento** en área de 2323,98 ha de 2014 a 2023
- Finalmente, las zonas de extracción minera tuvieron una **disminución** de 12,24 ha de 2014 a 2023

Ilustración 5. Área (km²) 2014 vs. 2023 en el municipio de Nechí



6.6.5.2. Metodo 2: Calculo de variación en áreas 2014 vs. 2023

Haciendo uso del software ArcGIS Pro, mediante la herramienta *Change detection*, se utilizaron los dos raster obtenidos en la clasificación supervisada para los años de interés, la cual determinó el cambio que hubo en las áreas de las coberturas. Por lo cual, la **Tabla 7** determina el cambio en dichas coberturas en hectáreas para los años 2014 vs. 2023 (Ver **Tabla 7**, **Figura 10** y **Figura 11**).

Tabla 7. Variación en área en ha para los años 2014 vs. 2023

Coberturas 2014/2023		2023 (ha)								
		Bd	LI	Nb	R	S	Tuc	TA	Tdd	Zme
2014	Bd	ZNC	1041.12	5009.31	107.19	3249.99	65.52	42665.13	786.69	7.83
	LI	3.96	ZNC	9.27	308.79	4.86	0.45	238.32	53.46	38.7
	Nb	15896.61	570.15	ZNC	447.84	1154.7	120.6	16493.58	701.46	38.16
	R	2149.74	1527.84	402.57	ZNC	125.19	172.44	4790.52	1335.69	160.47
	S	9681.03	637.56	764.73	199.62	ZNC	21.6	9984.24	259.56	10.26
	Tuc	126.9	10.62	56.34	62.82	24.48	ZNC	270.45	58.68	1.62
	TA	47554.92	5015.16	2906.28	2378.97	1229.04	256.95	ZNC	8291.61	381.24
	Tdd	1095.75	152.37	326.07	596.7	53.64	265.5	5634.45	ZNC	67.59
	Zme	6.93	44.64	13.05	148.95	0.81	4.77	177.84	258.12	ZNC

Siglas: Bosque denso (Bd), Lagunas, lagos y ciénagas (LI), Nubosidad (Nb), Rios (R), Sombras (S), Tejido urbano continuo (Tuc), Territorios Agrícolas (TA), Tierras desnudas y degradadas (Tdd), Zona de extracción minera (Zme).

Dado a lo anterior, se determina que las coberturas que tuvieron un mayor cambio en su área fueron Bosque denso a territorios agrícolas y territorios agrícolas a tierras desnudas y degradadas, mientras que coberturas como lagunas, lagos y ciénagas fue de las coberturas con un menor porcentaje de cambio seguido de tejido urbano continuo a zona de extracción minera. Por otro lado, se obtuvo un total de 5014862 pixeles como zona de no cambio, para un total de 451337,58 hectareas.

Figura 10. Clasificación supervisada año 2014

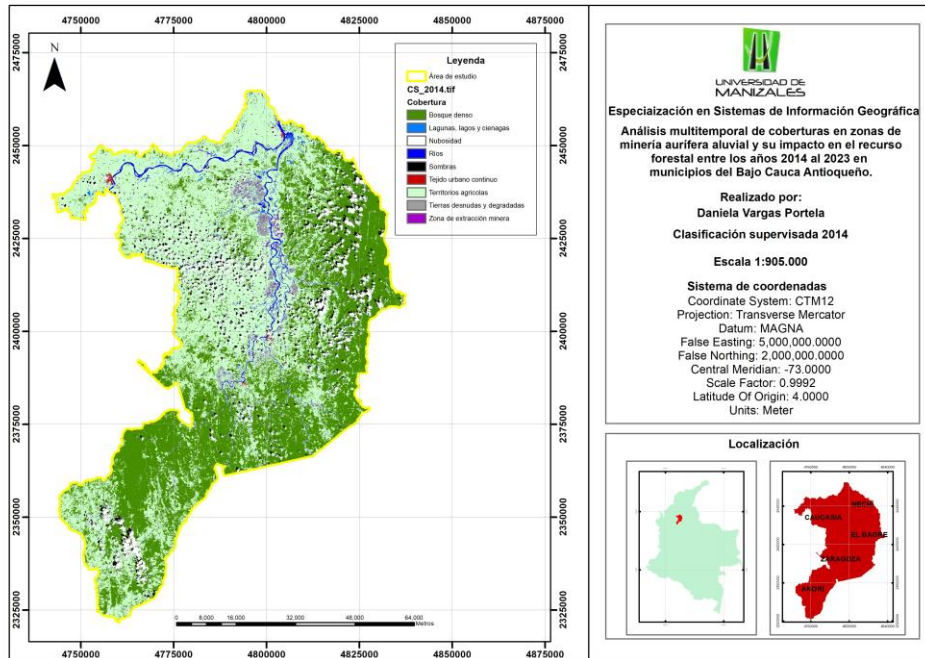
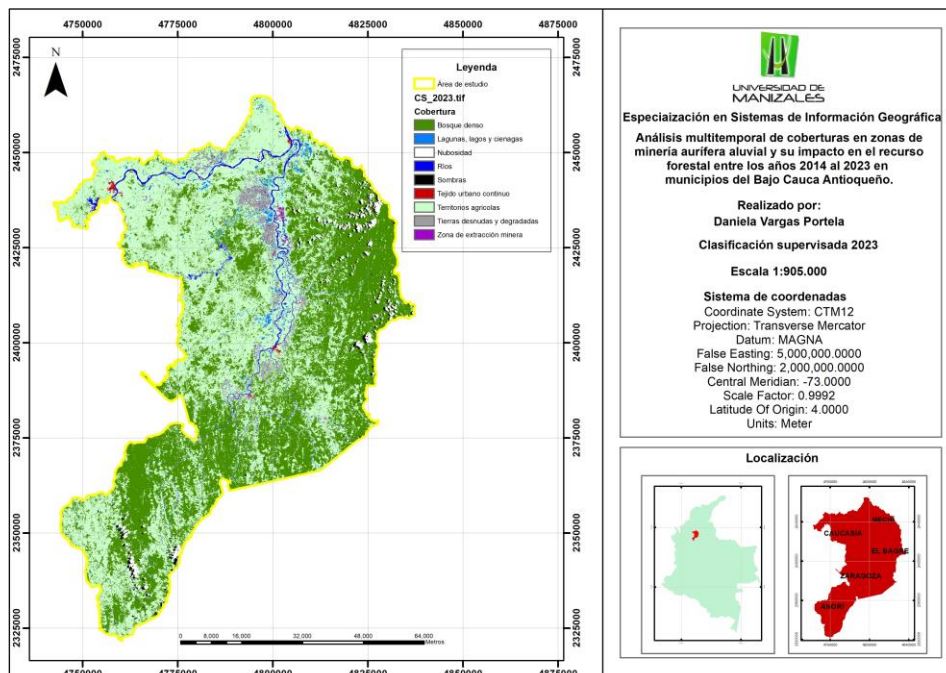


Figura 11. Clasificación supervisada año 2023



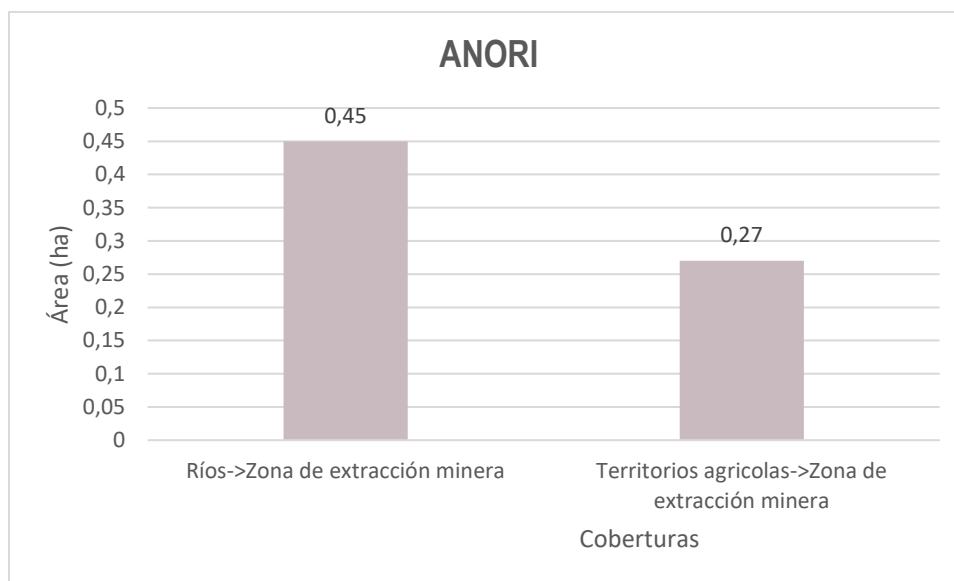
10.7. Calculo de variación en áreas 2014 vs. 2023 a nivel municipal en coberturas de zona de extracción minera

Una vez obtenidos los resultados con respecto a la variación en áreas en los cinco municipios, se procedió a calcular el cambio de las coberturas de interés a zona de extracción minera, mediante la herramienta *change detection* haciendo uso de ArcGIS Pro solo enfocándose en dicha cobertura.

Cambio de coberturas a zona de extracción de minera en Anorí

En el municipio de Anorí se determinó que el mayor cambio en área se presentó en la cobertura de Río a zona de extracción minera con 0,45 hectáreas, seguido de territorios agrícolas a zona de extracción minera con 0,27 hectáreas (Ver **Ilustración 6**).

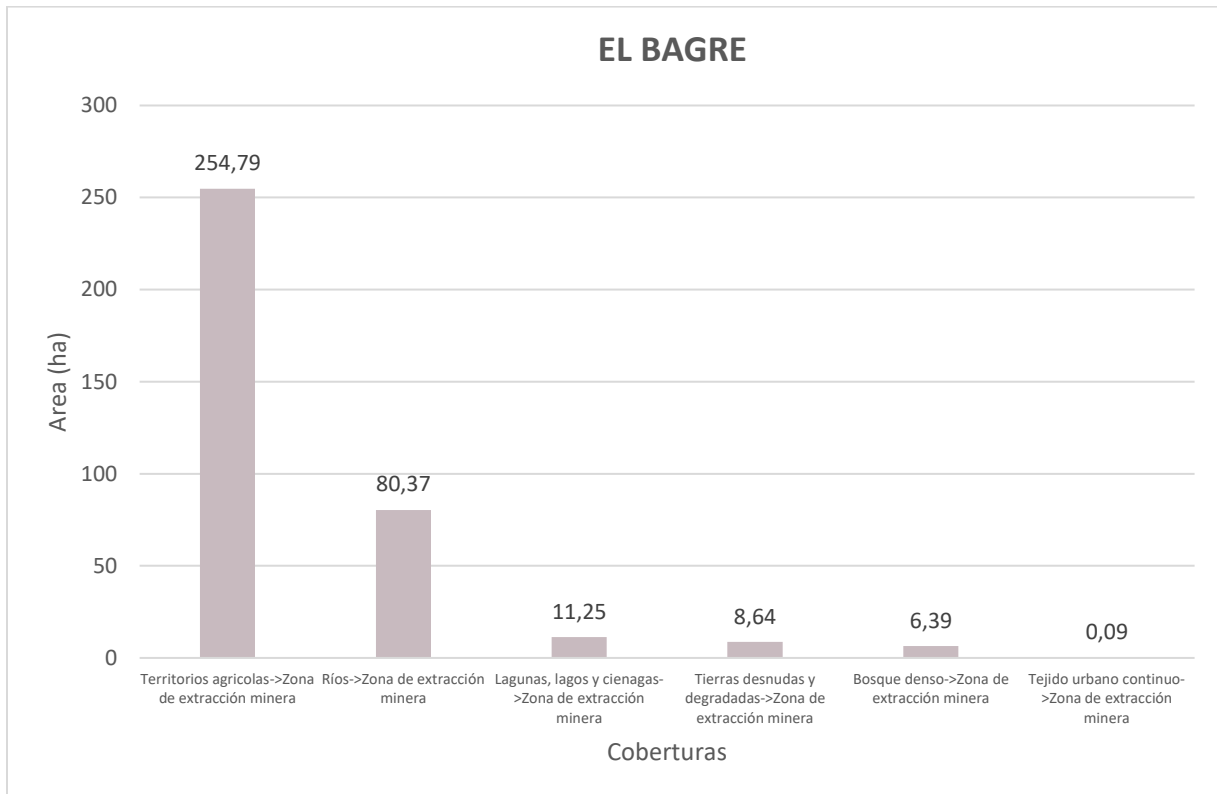
Ilustración 6. Cambio de cobertura a zona de extracción minera en Anorí, Antioquia.



Cambio de coberturas a zona de extracción de minera en El Bagre, Antioquia.

En el municipio de El Bagre se determinó que el mayor cambio en área se presentó en la cobertura de Territorios Agrícolas con 254,79 hectáreas, seguido de ríos con 80,37 hectáreas. En este municipio también se presentaron cambios en coberturas como lagunas, lagos y ciénagas, tierras desnudas y degradadas, bosque denso y tejido urbano continuo (Ver **Ilustración 7**).

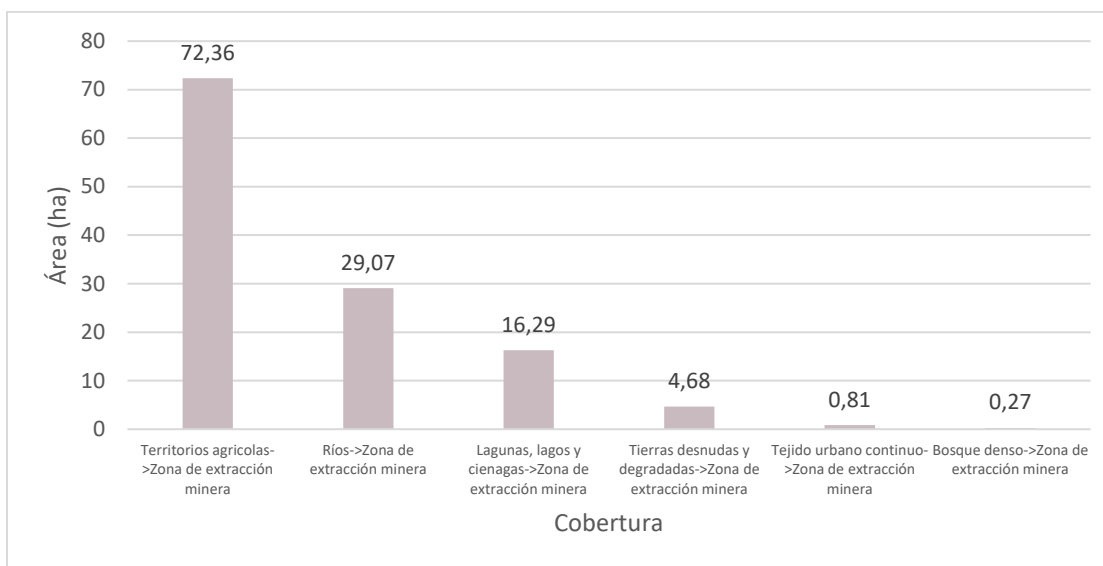
Ilustración 7. Cambio de cobertura a zona de extracción minera en El Bagre, Antioquia.



🚧 Cambio de coberturas a zona de extracción de minera en Caucasia, Antioquia.

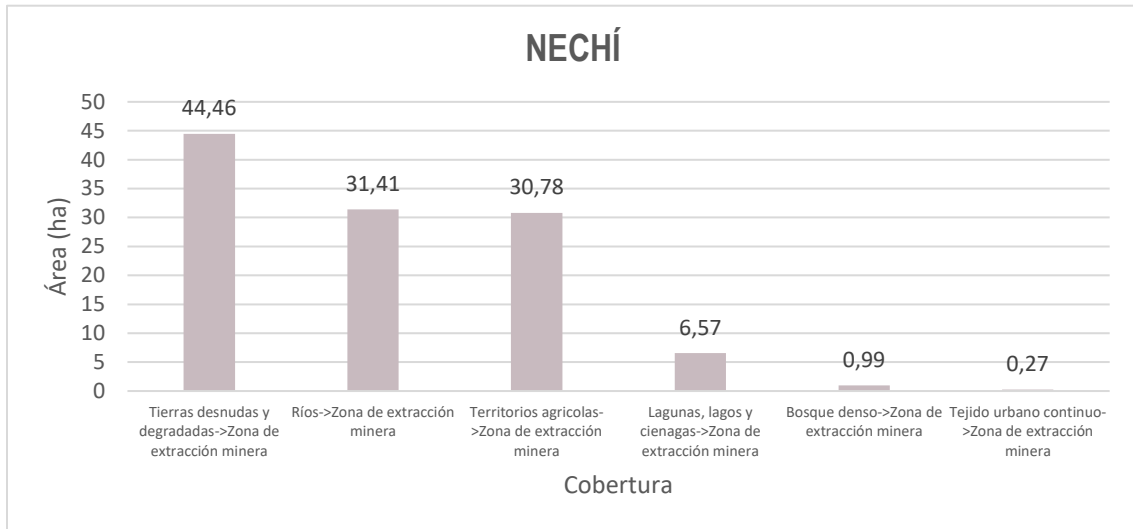
En el municipio de Caucasia se determinó que el mayor cambio en área se presentó en la cobertura de territorios agrícolas con 72,36 hectareas, seguido de ríos con 29,07 hectareas. De igual forma, hubo cambios en coberturas tales como lagunas, lagos y ciénagas, tierras desnudas y degradadas, tejido urbano continuo y por ultimo, bosque denso (Ver **Ilustración 8**).

Ilustración 8. Cambio de cobertura a zona de extracción minera en Caucasia, Antioquia.



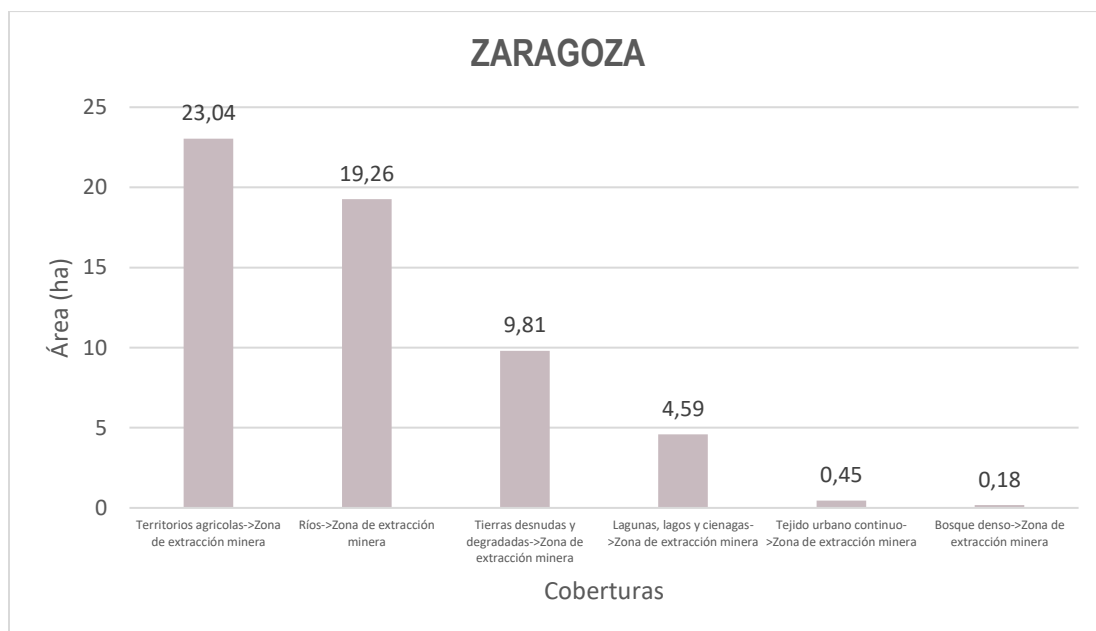
🚧 Cambio de coberturas a zona de extracción de minera en Nechí, Antioquia.

En el municipio de Nechí se determinó que el mayor cambio en área se presento en la cobertura de tierras desnudas y degradadas con 44,46 hectareas, seguido de ríos con 31,41 hectareas. Además, también se tuvieron cambios en coberturas tales como territorias agrícolas, lagunas, lagos y ciénagas, bosque denso y tejido urbano continuo (Ver **Ilustración 9**).

Ilustración 9. Cambio de cobertura a zona de extracción minera en Nechí, Antioquia.

Cambio de coberturas a zona de extracción de minera en Zaragoza, Antioquia.

En el municipio de Zaragoza se determinó que el mayor cambio en área se presentó en la cobertura de territorios agrícolas con 23,04 hectáreas, seguidos de ríos con 19,26 hectáreas. También se presentaron cambios en cobertura de tierras desnudas y degradadas, tejido urbano continuo y por último, bosque denso (Ver **Ilustración 10**).

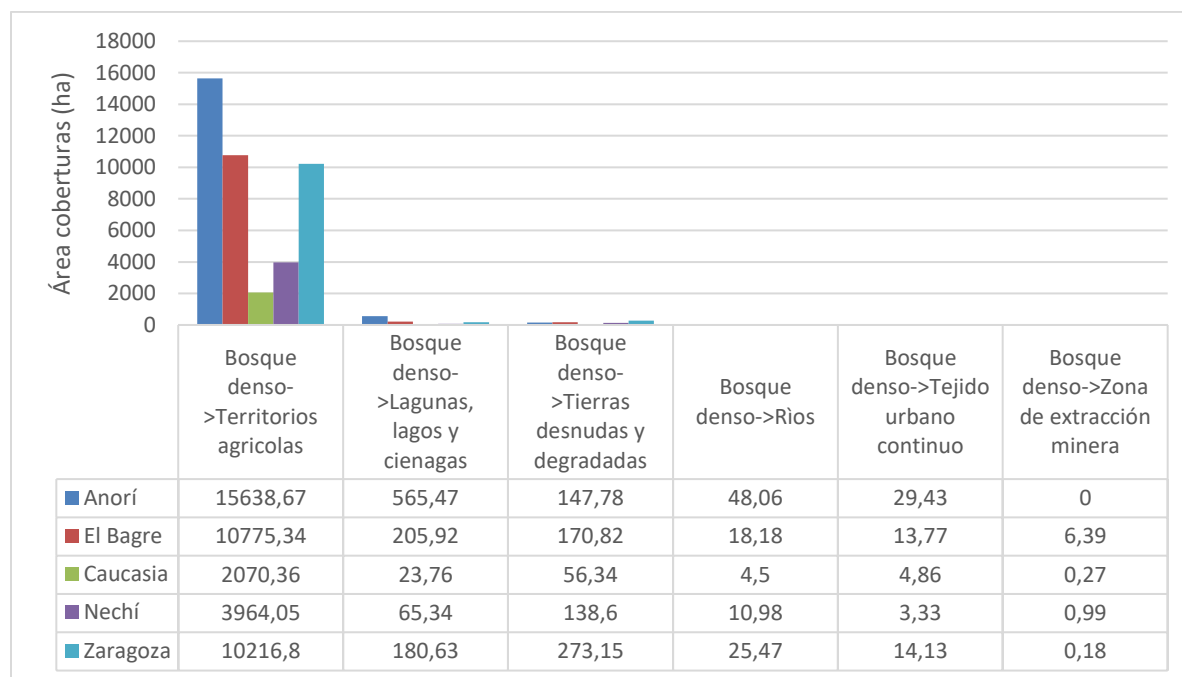
Ilustración 10. Cambio de cobertura a zona de extracción minera en Zaragoza, Antioquia.

Objetivo: Validar la existencia de impacto en el recurso forestal

10.8. Impacto en el recurso forestal

La minería aurífera luvial requiere de grandes extensiones de tierra para la extracción del oro. Esto implica la necesidad de tener que talar árboles y por ende en su mayoría una reducción de los hábitats naturales, lo que conduciría a la pérdida de biodiversidad y a la fragmentación del bosque. Por lo cual, por medio de la herramienta *change detection*, se calculó la variabilidad de áreas en la cobertura de bosque denso a otro tipo de cobertura (**Ilustración 11**). Por lo cual se obtuvo que:

Ilustración 11. Impacto en el recurso forestal por minería aurífera aluvial



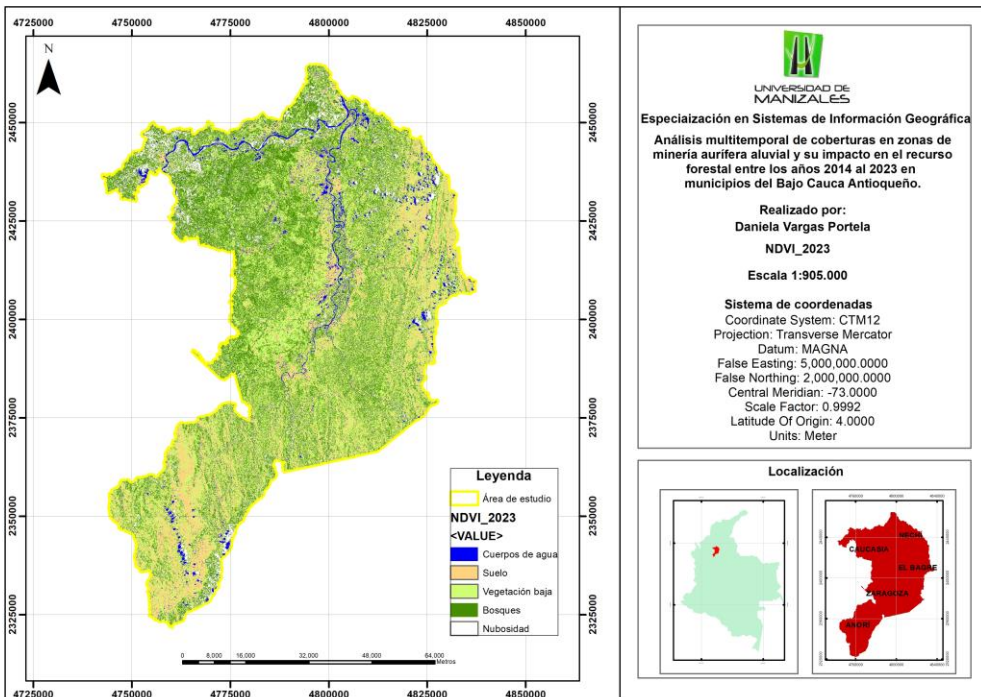
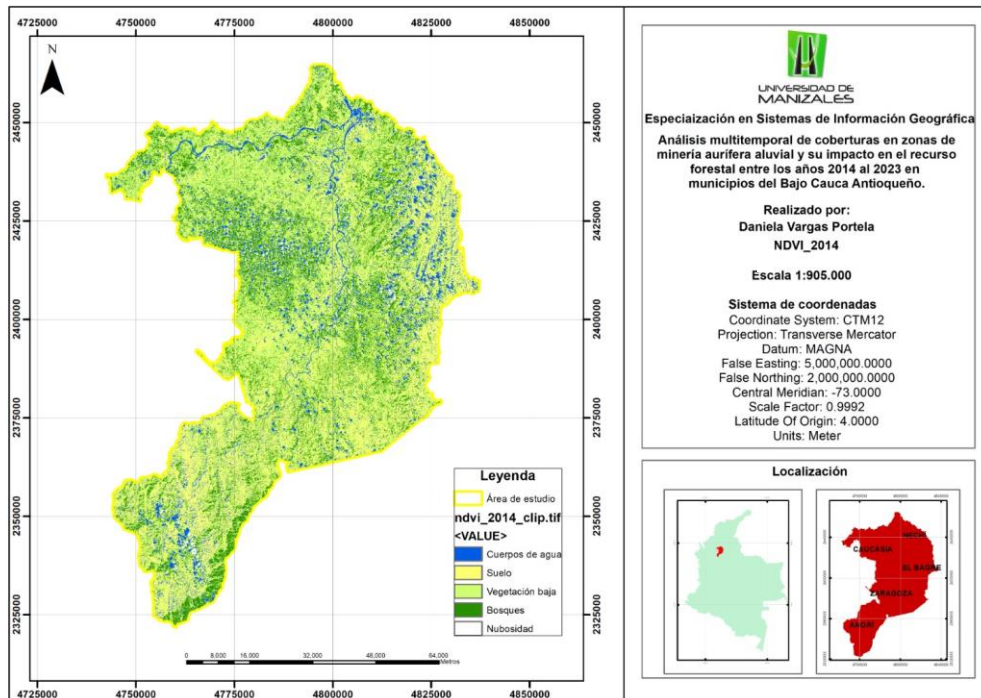
Mediante el análisis realizado, se pudo determinar que la concentración de los cambios se da en las coberturas de bosque denso a territorios agrícolas, principalmente en el municipio de Anorí con 15638,67 hectareas, seguido del Bagre con 10775,34 hectareas Zaragoza con 10216,8, Nechí con 3964,05 y finalmente Caucasia con 2070,36 hectareas. Por otro lado, también se identificarón cambios en la cobertura de bosque denso pero en una menor proporción, a coberturas tales como lagunas, lagos y cienadas, tierras desnudas y degradadas, ríos, tejido urbano continuo y por ultimo zona de extracción minera.

Objetivo: Monitorear el estado de la cobertura vegetal de los años 2014 y 2023 mediante el NDVI

10.9. Estado de la cobertura vegetal de los años 2014 y 2023 mediante el Índice de Vegetación Normalizada (NDVI)

Con el fin de evaluar la densidad y los cambios en la salud de las plantas o áreas con vegetación en el área de estudio, se procedió a realizar una relación del rojo visible e infrarrojo cercano (bandas 4 y 5), además se procedió a calcular el NDVI mediante la herramienta *Map Algebra* de ArcGIS. Por lo cual, se tuvo como resultado que en municipios como Anorí, se ve una mayor densidad de bosque en el 2014 que en el 2023, mientras que en municipios como Caucasia y Nechí se evidencia más denso para el año 2024 que para el 2014. Por otro lado, aunque en el presente estudio prevalecen los territorios agrícolas o pastos en el 2023, por medio del índice se evidencia que una mayor área de dicha cobertura en el 2014 (Ver **Figura 12**).

Figura 12. NDVI 2014 vs. 2023



Objetivo: Evaluar la cobertura de zona de extracción minera en la zona de influencia del río Nechí

10.10. Cobertura de “zona de extracción minera” en zona de Influencia del Río Nechí.

Establecer un área de estudio clara y delimitada que abarque el río y sus riberas, considerando la zona potencialmente afectada por la actividad minera y las actividades antrópicas relacionadas permitió enfocar el análisis en las áreas que tienen mayor probabilidad de experimentar impactos ambientales.

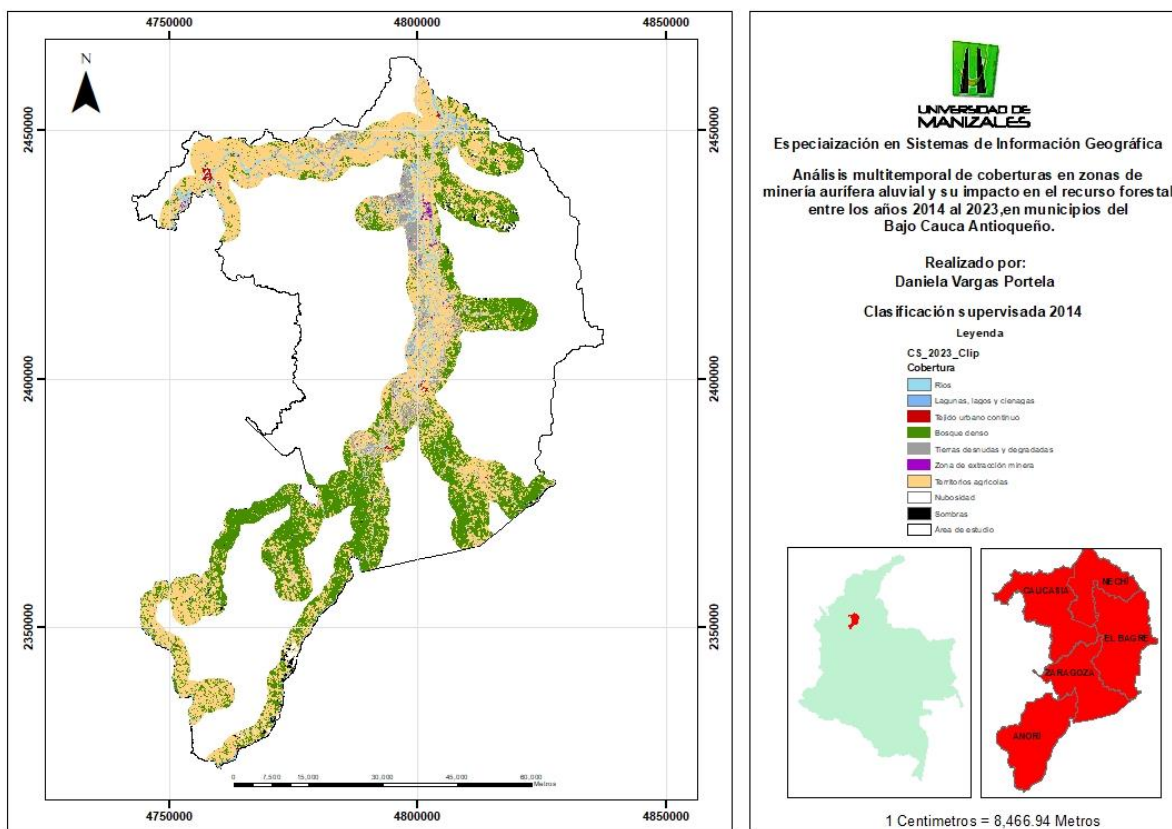
Al analizar el área del buffer, se pudo identificar y evaluar los posibles impactos ambientales de la actividad minera y las actividades antrópicas en los ecosistemas ribereños, el impacto en los recursos culturales y las comunidades locales. Dado a lo anterior, en la tabla **Tabla 8** se reflejan las áreas de las coberturas del área de influencia del río Nechí. Proceso el cual, se llevo a cabo mediante el uso de la capa de drenajes dispuesta en “Colombia en mapas”, se procedio a realizar un clip de los drenajes para el área estudio con un área de 3 km (**Figura 13**), por consiguiente se realizó un clip a la clasificación supervisada resultante del año 2023, por lo cual, se logro conocer el área total de cobertura de “Zona de extracción minera”.

Tabla 8. Área de coberturas en zona de influencia (3 km) del Río Nechí

Cobertura	Cuenta pixeles	Área (m2)	Área (km2)	Área (ha)
Territorios agrícolas	1528035	1375231500	13.752.315	1.375,232
Bosque denso	1028701	925830900	9.258.309	925,831
Tierras desnudas y degradadas	139708	125737200	1.257.372	125,737
Rios	99751	89775900	897.759	89,776
Nubosidad	36746	33071400	330.714	33,071
Sombras	17887	16098300	160.983	16,098
Tejido urbano continuo	12405	11164500	111.645	11,165
Lagunas, lagos y cienagas	77150	69435000	69.435	6,944
Zona de extracción minera	7640	6876000	6.876	0,688
TOTAL AREA	2948023	2653220700	26.532.207	2.585

Por lo cual, se lo logra determinar que la cobertura de territorios agrícolas es la cobertura con mayor extensión en la zona de influencia del río Nechí (53,2%), seguido de bosque denso (35,8%), tierras desnudas y degradadas (4,9%), también pixeles clasificados como ríos (3,5%), lagunas lagos y ciénagas (0,3%) y tejido urbano continuo (0,4%). Por otro lado, la nubosidad y sombras representaron el 1,9% del buffer del área de influencia de río (Ver Figura 13).

Figura 13. Buffer 3 km zona de influencia Río Nechí



Objetivo: Concluir si los cambios de cobertura guardan relación espacial con fuentes hídricas, actividades antrópicas y zonas urbanas

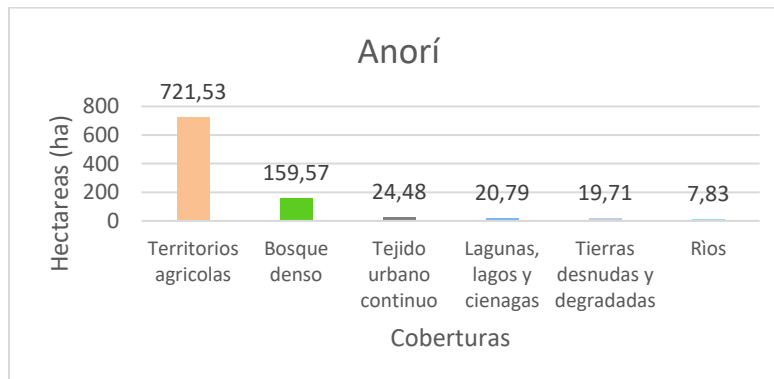
10.11. Análisis de relación entre coberturas y zonas urbanas

Con el fin de evaluar el tipo de coberturas en cercanía a los tejidos urbanos de la zona de estudio, mediante el software ArcGIS, se realizó un buffer de 2 km con respecto a los cascos urbanos, en donde según los resultados obtenidos, se pretende que este tipo de interpretaciones de herramientas SIG permitan implementar de medidas de mitigación para reducir el impacto ambiental de las actividades antrópicas. El primer municipio a analizar fue Anorí, en el cual el proceso llevado a cabo consistió en realizar clips al raster de la clasificación supervisada, por lo cual se pudo obtener el conteo de píxeles según su cobertura, los cuales fueron multiplicados por la resolución espacial al cuadrado.

$$\text{Área cobertura clasificada} = \text{Número de los píxeles} * \text{Resolución espacial}^2$$

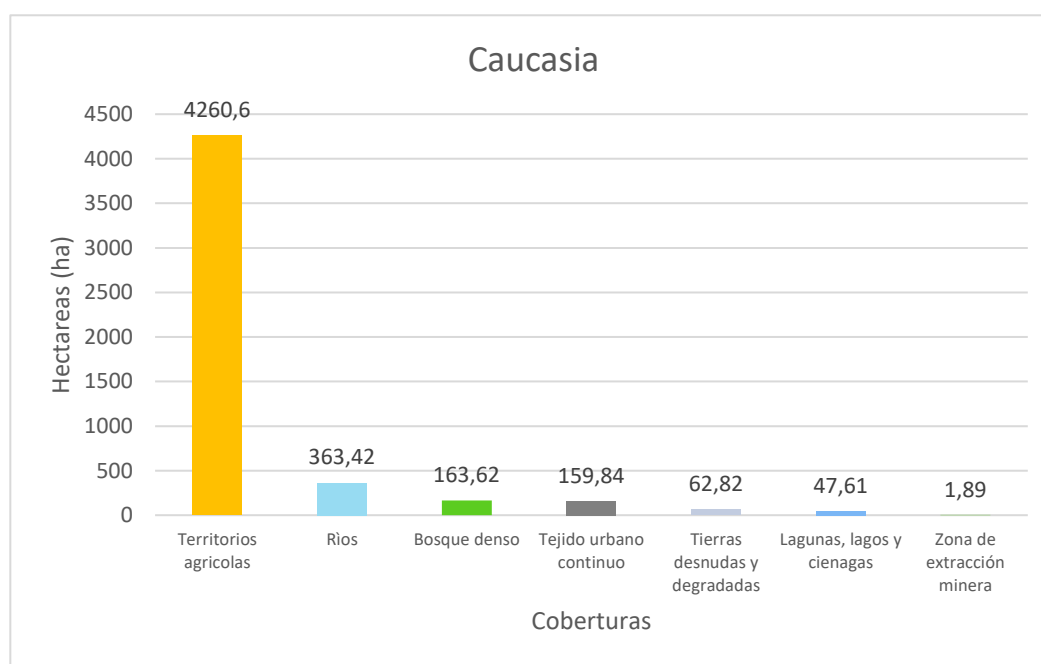
El primer municipio a analizar es Anorí, en el cual mediante la clasificación y el el buffer de 2 km externos al tejido urbano, logra clasificar en el 2023 con un total de área de 953,91 hectareas de las cuales el 75,6% corresponden a territorios agrícolas, seguido de bosque denso con el 16,7%, asimismo logra dentro de esta área localizar fragmentos de tejido urbano ocupando un 2,6%, seguido de lagunas, lagos y ciénagas con 2,2%, tierras desnudas y degradadas con 2,1% y ríos con 0,8%. Por lo cual, se determina con un departamento con alta actividad agrícola y por el contrario a sus alrededores no logra determinar coberturas de zona de extracción minera (**Ilustración 12** y **Figura 14**).

Ilustración 12. Zona de influencia de casco urbano Anorí



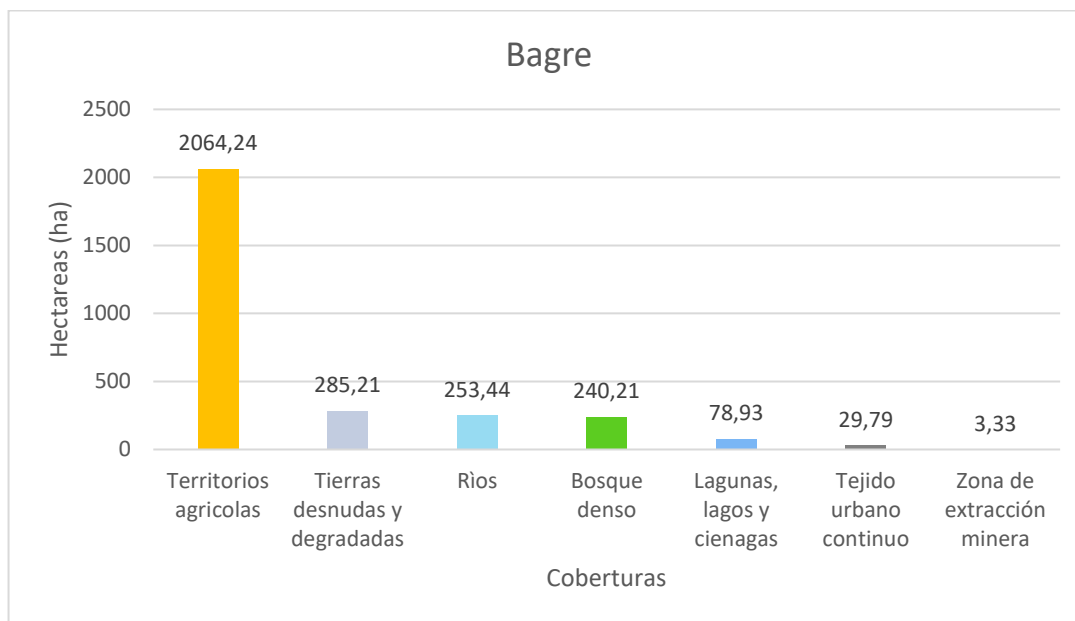
En el municipio de Caucasia, los territorios agrícolas abarcan un total de 84,2%, seguido de Rios con 7,2%, bosque denso y tejido urbano con 3,2% cada uno, tierras desnudas y degradadas 1,2%, Lagunas, lagos y ciénagas 0,09% y finalmente, zona de extracción minera con 0,04%. Lo cual permite determinar que en el municipio de Caucasia, hay gran influencia de actividades agrícolas, se identifica cobertura de Rio en zona cercana al caso urbano, asimismo se idéntica que en el área de influencia del municipio se realizan actividades de extracción *minera* (**Ilustración 13**).

Ilustración 13. Zona de influencia de casco urbano Caucasia



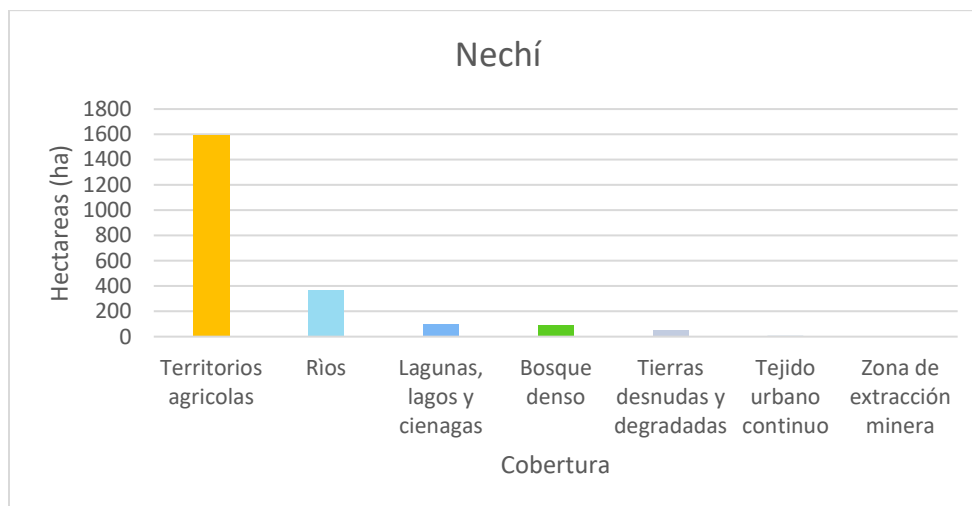
En cuanto al municipio del Bagre, se logró determinar que en su área de influencia el 69,9% pertenece a áreas de territorios agrícolas, un 9,7% a tierras desnudas y degradadas, 8,6% que corresponden a cobertura de río, bosque denso con 8,1%, lagunas, lagos y ciénagas con 2,7% , tejido urbano 1% y zona de extracción minera con 0,1% (*Ilustración 14 y Figura 16*).

Ilustración 14. Zona de influencia de casco urbano Bagre



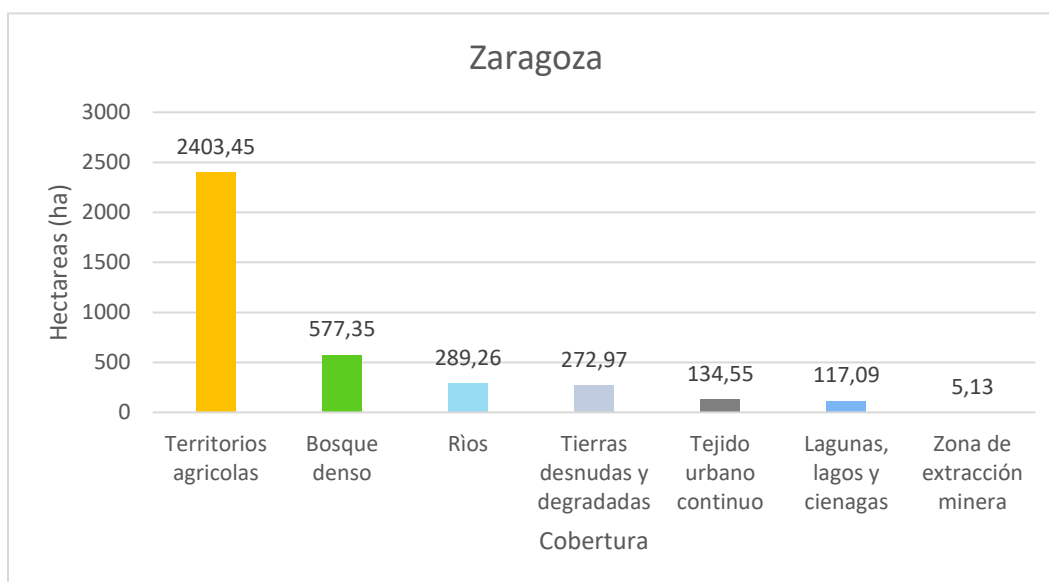
En el municipio de Nechí, se logró determinar que al igual que en los demás municipios, territorios agrícolas abarca gran parte de la zona de influencia del municipio con un porcentaje de 71,97%, ríos con 16,46%, Lagunas, lagos y ciénagas 4,62%, bosque denso 4,24%, tierras desnudas y degradadas 2,40%, tejido urbano continuo 0,30% y finalmente zona de extracción minera con 0,01% (*Ilustración 15 y Figura 17*).

Ilustración 15. Zona de influencia de casco urbano Nechí



Finalmente para el municipio de Zaragoza, se obtuvo que los territorios agrícolas abarcan el 63,25% del área de influencia del municipio, seguido de bosque denso con 15,19%, ríos con 7,61%, tierras desnudas y degradadas con 7,18, tejido urbano continuo con 3,54%, lagunas, lagos y ciénagas con 3,08% y zona de extracción minera con 0,14 hectareas (*Ilustración 16 y Figura 18*)

Ilustración 16. Zona de influencia de casco urbano Zaragoza



Dado a lo anterior, se puede concluir que Anorí es uno de los municipios con menor extensión de área a coberturas asociadas a la minería aurífera aluvial como lo son zona de extracción minera y tierras desnudas y degradadas, ya que por medio de la clasificación supervisada de 2023, no se logró identificar cobertura de tierras desnudas y degradadas y en cuanto a zona de extracción minera, determino una extensión de 19,17 hectareas. Por otro lado, El Bagre se ubica como el municipio con mayor afectación debido a la practica de minería, clasificando un total de 285,21 hectareas de zona de extracción minera y 3,33 hectareas de tierras desnudas y degradadas.

Figura 14. Buffer tejido urbano Anorí, Antioquia

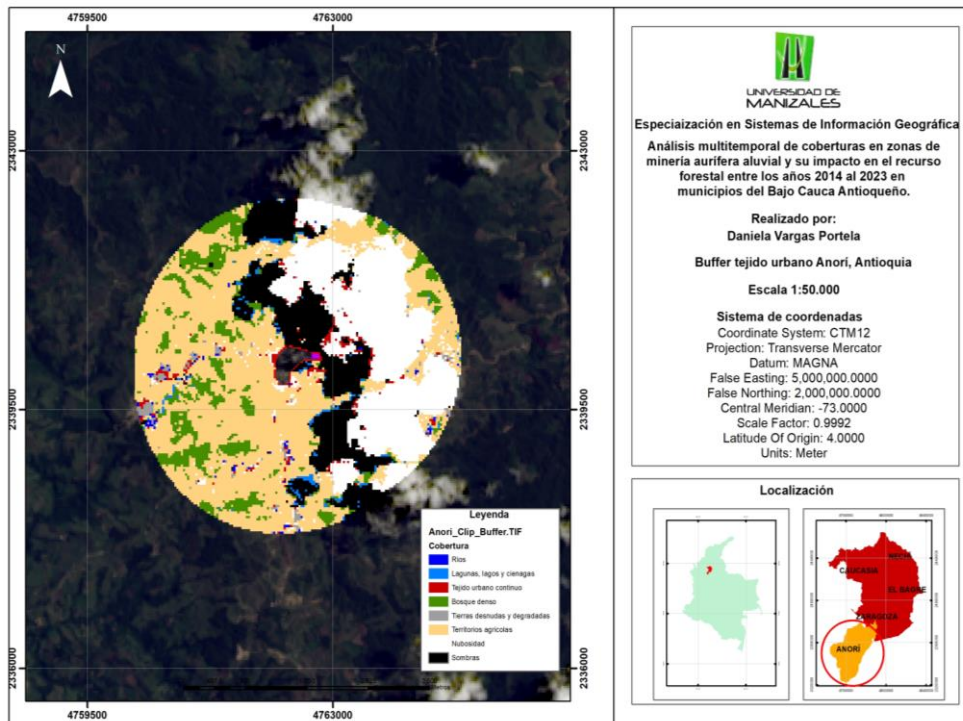


Figura 15. Buffer tejido urbano Caucasia, Antioquia

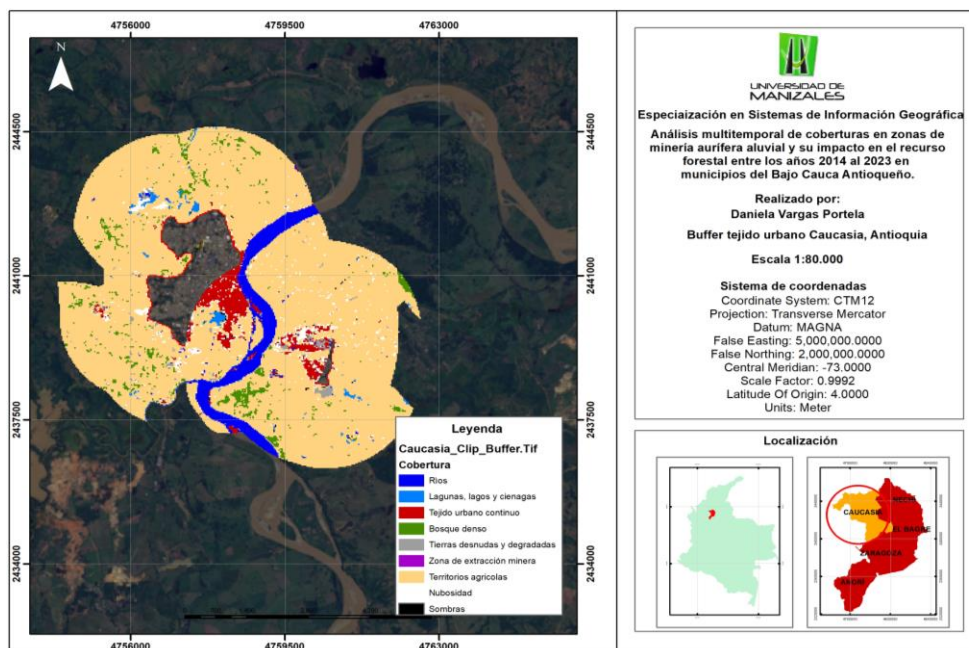


Figura 16. Buffer tejido urbano El Bagre, Antioquia

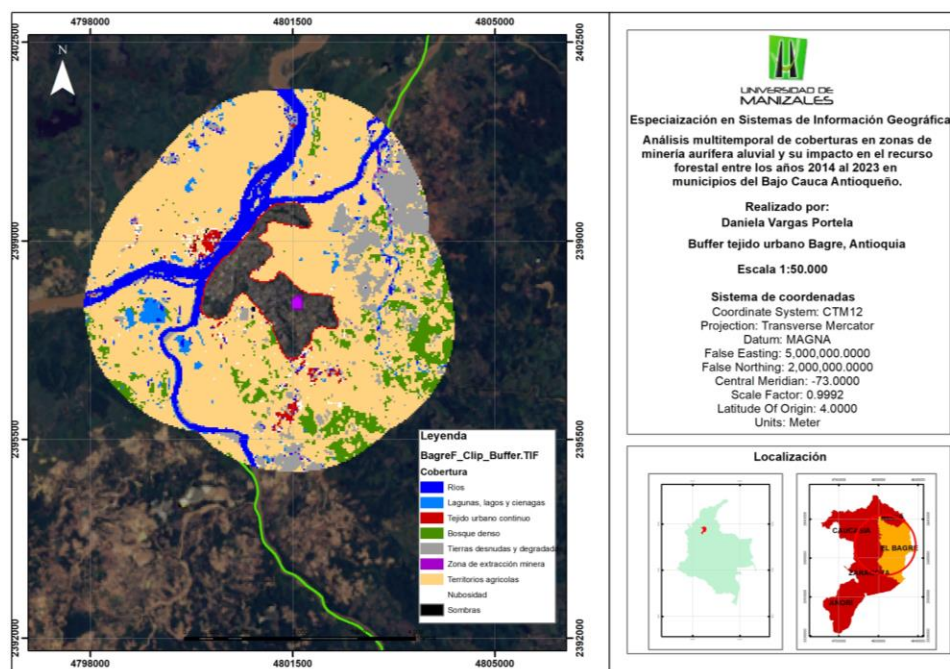


Figura 17. Buffer tejido urbano Nechí, Antioquia

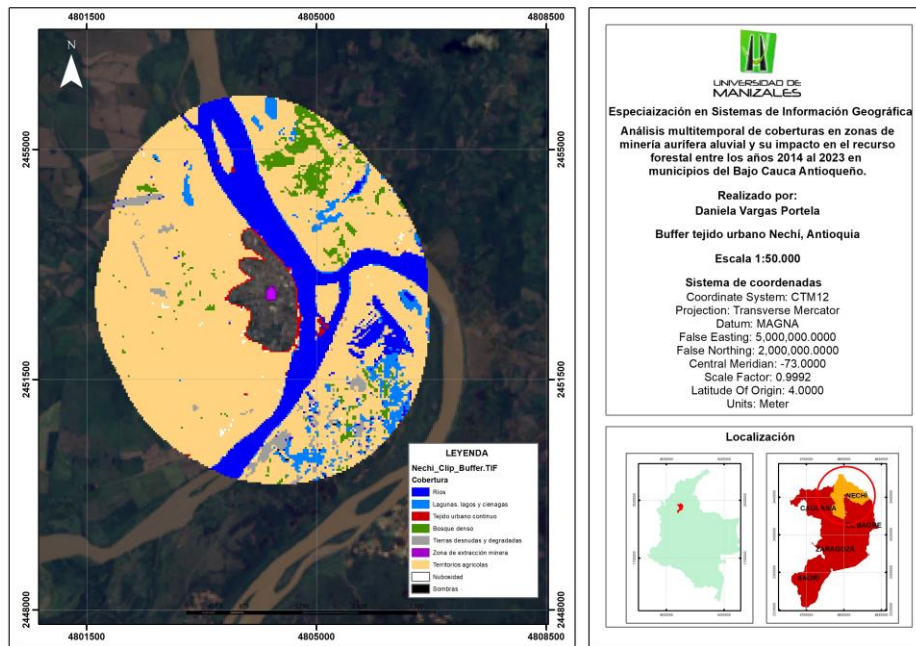
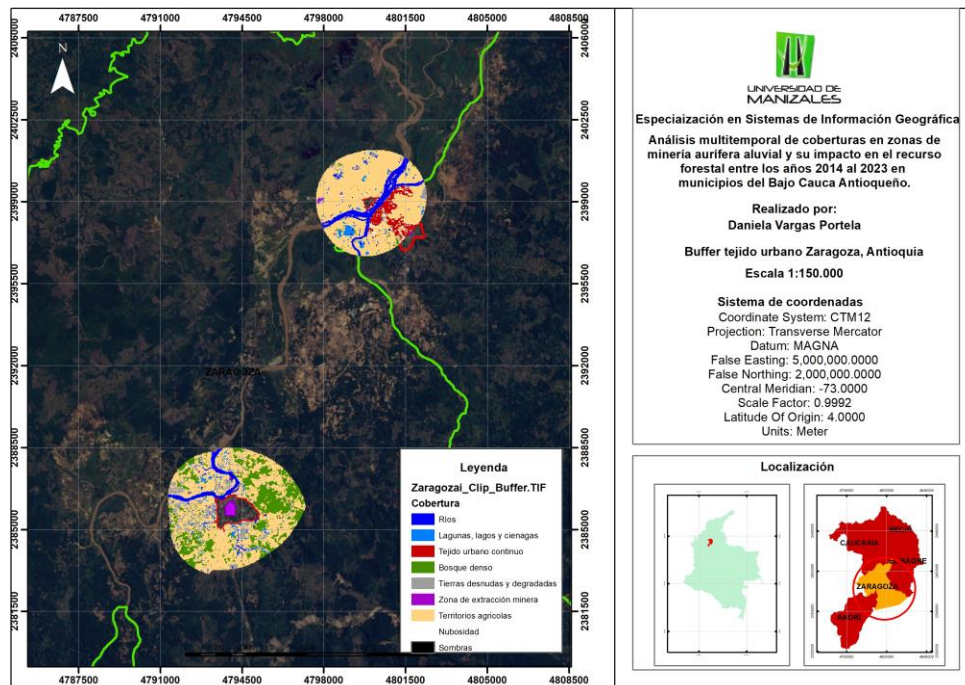


Figura 18. Buffer tejido urbano Zaragoza, Antioquia



11. Discusión

Dado a los resultados obtenidos, uno de los principales objetivos a la hora de plantear esta proyecto de grado, era el poder validar si las medidas de subsanación que utilizan las grandes empresas mineras en nuestro país, específicamente en el Bajo Cauca Antioqueño son suficientes para el impacto que generan al momento del desarrollo de sus actividades para la obtención de su materia prima, en este caso oro.

Una de las principales entidades que se dedican a mienra aurífera aluvial en la zona de estudio maneja dos métodos de “subsanación”:

1. **Programa de recuperación:** consiste en la contratación de mano de obra para producción de material vegetal y siembra del mismo, se trabaja parte ambiental social.
2. **Compensación:** Se trabaja en generar contratos de arrendamiento por un periodo de 15 años con predios que posean coberturas vegetales, en dichos predios se paga al poseedor por cuidar dichas coberturas, allí se refuerza con siembras para ampliar la brecha de cobertura vegetal, generando corredores para el Proyecto Jaguar.

Si bien el objetivo en ambos escenarios es el poder mantener o enriquecer las coberturas de bosques, mediante el presente estudio se logro determinar que municipios como Anorí y Zaragoza fueron municipios con la mayor variabilidad en área en sus coberturas de bosque, y en donde se determina una mayor necesidad de cuidado. Por otro lado, en municipios como el Bagre, fue evidente el cambio en las coberturas naturales a territorios que hoy en día son enfocados a la agricultura, siendo esta también la cobertura con mayor extensión de área en la zona de influencia del rio Nechí, permitiendo así determinar que todos los grandes cambios en el área de estudio obedecen en su mayoría a actividades antrópicas, siendo ellas la agricultura y la extracción minera. Por ende, por medio del presente estudio se logra determinar la existencia de municipios en que las medidas de manejo han permitido lograr un avance en la recuperación y crecimiento de sus coberturas naturales como lo son Nechi y Caucasia con un aumento en sus bosques densos y disminución en territorios agrícolas.

12. Conclusiones

1. Mediante el cálculo de área de coberturas clasificadas se determinó que:

- La cobertura de **ríos** tuvo disminución en su extensión de área clasificada en todos los municipios, principalmente de El Bagre con disminución de 2261,34 ha, seguido de Nechí con menos 1736,82 ha, Zaragoza con menos 1165,95 ha, Caucasia con menos 773,64 ha y finalmente, Anorí con 476,01 ha.
- La cobertura de **lagunas, lagos y ciénagas** tuvo aumento en su extensión de área clasificada en todos los municipios, principalmente en el municipio de Nechí con un aumento de 2323,98 ha, seguido de Caucasia con 1888,11 ha, Zaragoza con 1694,61 ha, Anorí con 1334,88 ha y finalmente el Bagre con 1100,34 ha.
- La cobertura de **Bosque denso** presentó aumento en su extensión de área en tres municipios, principalmente en Caucasia con un aumento de 14387,76 ha, seguido de El Bagre con 10714,14 ha y Nechí con 73301,34 ha más con respecto al 2014. Mientras que en Anorí hubo disminución de 8733,33 ha seguido de Zaragoza con menos 86,94 ha menos con respecto al 2014.
- La cobertura de **Territorios agrícolas** tuvo aumento en su extensión de área clasificada en tres municipios principalmente en Anorí con 11460,15 ha, seguido de Zaragoza con 4314,42 ha y el Bagre con aumento de 1299,15 ha. Por otro lado, municipios como Nechí disminuyeron 4777,83 ha y Caucasia disminuyó 55,62 ha.
- La cobertura de **tierras desnudas y degradadas** presentó aumento en su extensión de área en tres municipios, principalmente en Nechí con un aumento de 1993,05 ha, Caucasia con aumento de 1053 ha y Zaragoza con 765 ha. Mientras que, municipios como Anorí tuvieron reducción de dicha cobertura con 135,36 ha seguido de Bagre con 122,58 ha.
- **Tejido urbano continuo** tuvo aumento en extensión de área en tres municipios, siendo Caucasia principalmente con 196,66 ha, seguido de el Bagre con 76,06 ha y Zaragoza con 32,4 ha. Por otro lado, Anorí tuvo una reducción de 4,69 ha en esta cobertura y Nechí 3,51 ha.

- **Zona de extracción minera** tuvo aumento en su extensión de área para los municipios de Caucasia 79,11 ha y El Bagre con 52,38 ha, mientras que Nechi clasifico 12,24 ha menos que en el 2013, seguido de Anorí con 10,17 ha y Zaragoza con 0,58 ha.
2. Mediante la detección de cambios de extensión en área de una cobertura a otra, se determino que la cobertura con mayor área de cambio fue bosque denso a territorios agrícolas con 42665,13 ha seguido de territorios agrícolas a tierras desnudas y degradadas con 8291,61 ha.
 3. Se concluye que los cambios de coberturas guardan relación espacial con actividades antrópicas en su mayoría, específicamente actividades en coberturas agrícolas.

13. Referencias

- Acero (2022). Análisis multitemporal de los cambios del uso y cobertura del suelo en la Zona de la mina del Cerrejón, Guajira- Colombia
- Arriaga. (2009). Implicaciones del cambio de uso de suelo en la biodiversidad de los matorrales xerófilos: un enfoque multiescalar. Investigación Ambiental Ciencia y Política Pública, Vol. 1.
- Arenas (2021). Análisis multitemporal del impacto ambiental ocasionado por la deforestación generada por la minería ilegal en el Nordeste Antioqueño, sobre el Río Nechí y sus afluentes.
- Bannari, A., Morin, D. & Bonn, F. (1995). A review of vegetation indices. Remote Sensing Reviews, 13, pp. 95-120.
- Bonilla y Bonilla (Transformación de las coberturas vegetales y uso del suelo en la llanura amazónica colombiana: el caso de Puerto Leguizamo, Putumayo (Colombia)
- Campos, B.C. (1995) Estabilidade estrutural de um Latossolo Vermelho-Escuro distrófico após sete anos de rotação de culturas e sistemas de manejo de solo. Rev. Bras. Ciência do Solo (Campinas). 19(1):121-126.
- Chuvieco, E. (1990). "Fundamentos de Teledetección Espacial". Ediciones RALPH.
- Corredor et al., (2011) Aplicación de la metodología Corine Land Cover en la determinación de los cambios de cobertura en el parque natural los flamencos.
- Corporación Autónoma Regional del Tolima (2017). EL BOSQUE DE GALILEA", MAYOR RELICTO BOSCOLO NATURAL Y RESERVORIO DE CARBONO DEL TOLIMA CONVOCÓ EL INTERÉS DE TODOS LOS ACTORES PARA CONSERVARLO.
- Flores et al., (2016) Multitemporal analysis of the vegetation cover in the area of influence of the mines located in the high part of Maltería in Manizales, Colombia.
- Rueda (2010) Understanding deforestation in the southern Yucatan insights from a subregional, multi-temporal análisis.

-
- Maskova, Z., Zemek, F. & Kvet, J. (2008). Normalized difference vegetation index (NDVI) in the management of mountain meadows. *Boreal Env. Res.* 13: 417-432.
- Manrique y García (2019) Fragmentación del paisaje empleando análisis multitemporal de imágenes de satélite Landsat TM y ETM+ en el municipio de Montelíbano, Córdoba-Colombia
- McDANIEL, C.; GATES, R., 2011. Investigación de mercados Ed. Cenage Learning (México D.F.). 686p.
- Melo, H., Camacho, M. (2005) Interpretación visual de imágenes de sensores remotos y su aplicación en levantamientos de cobertura y uso de la tierra. Instituto geográfico Agustín Codazzi. 156 p.
- Oficina de las Naciones Unidas contra la droga y el delito (2022). Colombia. Explotación de oro de aluvión. Evidencias a partir de percepción remota.
- Rouse, J., Hass, R., Shell, J. & Deering, D. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: Fraden S. C., Marcanti E. P. & Becker M. A. (eds), Third ERTS-1 Symposium, 10-14 Dec. 1973, NASA SP351, Washington D.C. NASA, pp. 309-317.
- Sarumino (1997) O meio ambiente e o plantio direto. Ed. APDC (Goiânia). 18p.
- Cutipa-Luque, L., Alvaríño, L. y Iannacone, J. (2020). Situación actual de las áreas marinas protegidas en el Perú y propuestas de conservación. *Paideia XXI*, 10(2), 573–612. <https://bit.ly/3y7p8e0>
- Schowengerdt, R. (1997). Remote Sensing: Models and methods for image processing. Academic Press. Tucson, Arizona: 522p