
**ANÁLISIS DE CAMBIOS DE LAS COBERTURAS EN LA
CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RIO BERMELLÓN,
TOLIMA, COLOMBIA**

**Laura Patricia Corchuelo Avila
Patricia Alexandra Vargas Salinas**

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de Especialista
en Sistemas de Información Geográfica

Línea de Investigación
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 cuenca hidrográfica es una unidad esencial para comprender la relación entre sociedad y naturaleza, especialmente en la gestión del espacio y la toma de decisiones ambientales; La presente investigación muestra los resultados de un análisis multitemporal de la cuenca del río Bermellón, Tolima, Colombia, ecosistema que presenta presión demográfica, ampliación de la frontera agrícola y contaminación de fuentes hídricas.

Para determinar los cambios de coberturas del suelo en dicha zona, durante los últimos 21 años, se utilizaron imágenes Landsat tomadas en los años 2002 y 2023. Se llevó a cabo una clasificación supervisada a partir del algoritmo Maximum Likelihood para calcular y analizar las áreas de cambio. Además, este resultado se integra con información de Registro Único Nacional de Áreas Protegidas- RUNAP y áreas protegidas bajo la Ley 2da del año 1959.

De acuerdo con los resultados obtenidos, en la cuenca del río Bermellón se han evidenciado procesos de recuperación forestal en un contexto que anteriormente predominaba coberturas de pastos y cultivos, en donde se ha observado una disminución 23,37% en pastos limpios. Además, se ha registrado un incremento del 44,63%. en las áreas de herbazal (páramos) y un aumento del 5,03% en bosque, lo que indica una regeneración natural y una contribución positiva a la conservación de la biodiversidad y los recursos naturales.

Este trabajo aportará información valiosa para la gestión sostenible de los recursos naturales en la región, ayudando a mitigar los impactos negativos sobre los ecosistemas y la calidad del agua.

Palabras clave: Teledetección, Imágenes Landsat, Análisis Multitemporal, Corine Land Cover, Clasificación Supervisada, Cuenca Hidrográfica.

Abstract

The watershed is an essential unit for understanding the relationship between society and nature, especially in land management and environmental decision-making. This research presents the results of a multitemporal analysis of the Bermellón River basin in Tolima, Colombia, an ecosystem facing demographic pressure, agricultural expansion, and water source pollution.

To determine the land cover changes in this area over the last 21 years, Landsat images from 2002 and 2023 were used. A supervised classification was performed using the Maximum Likelihood algorithm, and the areas of change were calculated and analyzed. Additionally, the results were integrated with information from the National Register of Protected Areas (RUNAP) and protected areas designated under Law 2 of 1959.

According to the results, the Bermellón River basin has shown forest recovery processes in an area that was previously dominated by pastures and crops, with a 23.37% decrease in clean pastures. Furthermore, there was a 44.63% increase in shrubland (paramo) and a 5.03% increase in forested areas, indicating natural regeneration and a positive contribution to the conservation of biodiversity and natural resources.

This work will provide valuable information for the sustainable management of natural resources in the region, helping to mitigate the negative impacts on ecosystems and water quality.

Keywords: (Remote Sensing, Landsat Images, Multitemporal Analysis, Corine Land Cover, Supervised Classification, Watershed).

Contenido

	Pág.
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN Y SU JUSTIFICACIÓN	8
1.1 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA PROBLEMÁTICA	8
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	11
1.3 JUSTIFICACIÓN	15
2. OBJETIVOS	18
2.1 OBJETIVO GENERAL	18
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
3. ANTECEDENTES.....	19
4. REFERENTE NORMATIVO Y LEGAL.....	31
5. REFERENTE TEÓRICO.....	35
5.1 COBERTURAS Y USOS DE LA TIERRA.....	35
5.2 ECOSISTEMAS ESTRATÉGICOS	37
5.3 CLASIFICACIÓN DE LAS COBERTURAS.	38
5.4 CORINE LAND COVER.....	39
5.5 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.....	40
5.6 PROGRAMAS DE PROCESAMIENTO ESPACIAL	41
5.6.1 ArcGIS.....	41
5.6.2 Envi.....	42
5.7 TELEDETECCIÓN	42
5.7.1 Características de Landsat 7.	44
5.7.2 Características de Landsat 9.	45

5.7.3	<i>Identificación de coberturas en imágenes Landsat</i>	46
5.8	ANÁLISIS MULTITEMPORAL	47
5.9	EVALUACIÓN DE LA EXACTITUD TEMÁTICA	48
6.	METODOLOGÍA	50
6.1	ENFOQUE METODOLÓGICO	50
6.2	TIPO DE ESTUDIO	50
6.3	PROCEDIMIENTO	50
6.3.1	<i>Fase 1. Identificación y clasificación de coberturas de la cuenca del Rio Bermellón</i>	51
6.3.2	<i>Fase 2. Determinar la tasa de cambio</i>	67
6.3.3	<i>Fase 3. Análisis de coberturas</i>	67
6.3.4	<i>Fase 4. Productos cartográficos</i>	68
7.	RESULTADOS	69
8.	DISCUSION	80
9.	CONCLUSIONES	82
10.	RECOMENDACIONES	85
11.	REFERENCIAS	87

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. <i>Ubicación general de la cuenca del Rio Bermellón</i>	9
Figura 2. <i>Ubicación de la cuenca del Rio Bermellón, y áreas de importancia ambiental.</i>	10
Figura 3. <i>Ubicación de la cuenca del Rio Bermellón, y áreas de importancia ambiental.</i>	53
Figura 4. <i>Clasificación de coberturas del Río Coello de acuerdo con el POMCA.</i>	55
Figura 5. <i>Áreas de entrenamiento 2002</i>	60
Figura 6. <i>Áreas de entrenamiento 2023</i>	60
Figura 7. <i>Separabilidad de los ROI 2002.</i>	62
Figura 8. <i>Separabilidad de los ROI 2023.</i>	62
Figura 9. <i>Clasificación Supervisada 2002.</i>	63
Figura 10. <i>Clasificación Supervisada 2023.</i>	63
Figura 11. <i>Majority 2002.</i>	64
Figura 12. <i>Majority 2023.</i>	65
Figura 13. <i>Matriz de confusión e Índice Kappa 2002</i>	66
Figura 14. <i>Matriz de confusión e Índice Kappa 2023.</i>	66
Figura 15. <i>Mapa de coberturas terrestres, 2002.</i>	69
Figura 16. <i>Mapa de coberturas terrestres, 2023.</i>	70
Figura 17. <i>Mapa de coberturas terrestres en área de ley 2^a tipo A, 2002.</i>	72
Figura 18. <i>Mapa de coberturas terrestres en área de ley 2^a tipo A, 2023.</i>	73
Figura 19. <i>Mapa de coberturas terrestres en área de RUNAP, 2002</i>	76
Figura 20. <i>Mapa de coberturas terrestres en área de RUNAP, 2023</i>	76

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1 <i>Ecosistemas Estratégicos en Colombia.</i>	37
Tabla 2. <i>Características de las imágenes Landsat 7.</i>	44
Tabla 3. <i>Distribución de las bandas en OLI y TIRS en imágenes Landsat 9.</i>	46
Tabla 4. <i>Clasificación del índice de Kappa</i>	49
Tabla 5 <i>Imágenes Seleccionadas.</i>	52
Tabla 6 <i>Coberturas de la cuenca del río Bermellón de acuerdo con el POMCA.</i>	54
Tabla 7. <i>Combinaciones de banda en imagen satelital</i>	55
Tabla 8 <i>Análisis visual y combinaciones de banda RGB</i>	56
Tabla 9. <i>Matriz de cambios (ha) en las coberturas y probabilidades de transición en la cuenca del río Bermellón, Tolima, 2002-2023.</i>	70
Tabla 10. <i>Matriz de cambios (ha) en las coberturas en las áreas de Ley 2ª Tipo A, presentes en la cuenca del río Bermellón, Tolima, 2002-2023.</i>	73
Tabla 11. <i>Matriz de cambios (ha) en las coberturas en las áreas de RUNAP presentes en la cuenca del río Bermellón, Tolima, 2002-2023.</i>	77

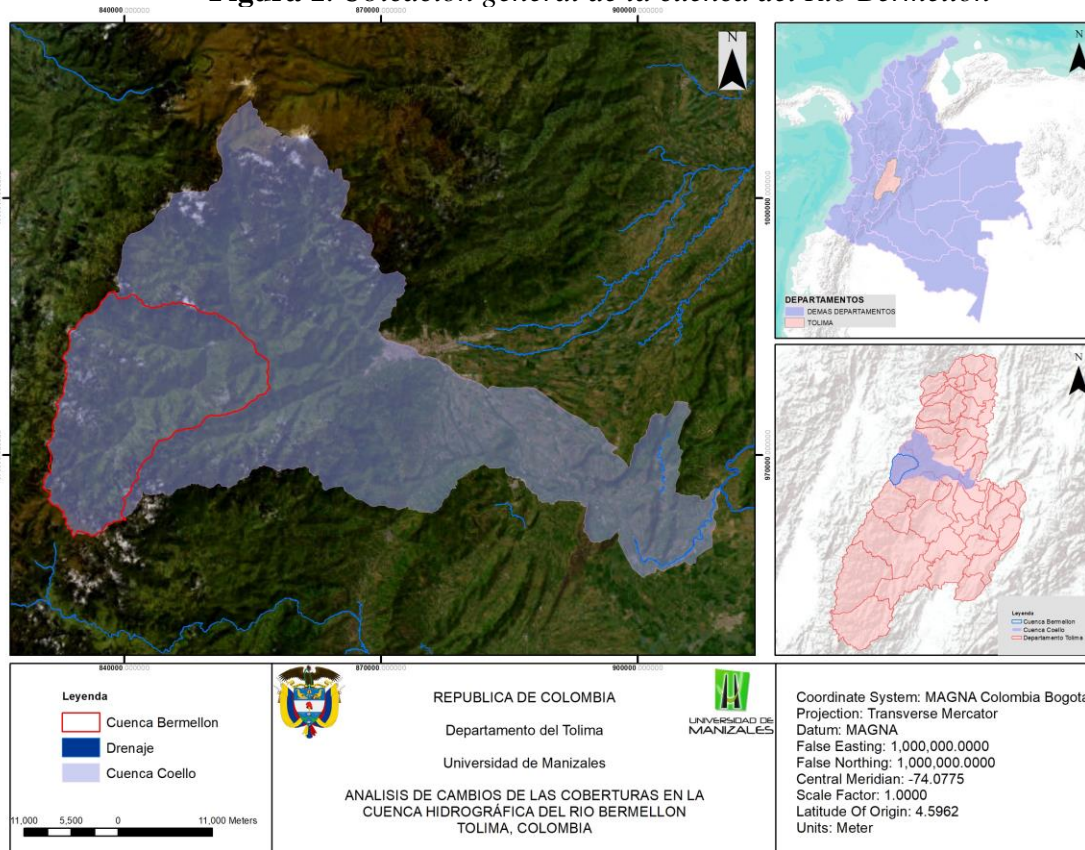
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN Y SU JUSTIFICACIÓN

1.1 Descripción del área problemática

El área de estudio está en el municipio de Cajamarca, del departamento del Tolima, el área urbana del municipio, a 33 km de la capital del departamento del Tolima. Tiene una altura promedio de 1.814 msnm y una temperatura promedio de 19°C; e hidrológicamente es de gran importancia para la ciudad de Ibagué y los municipios cercanos, ya que la cuenca del río Bermellón, es un aportante tributario para la subzona hidrográfica del río Coello. (MOLINA RÍOS & RODRÍGUEZ NÚÑEZ, 2020).

La cuenca del río Bermellón nace al Occidente del municipio de Cajamarca en la Cordillera Central, a los 3200 msnm, formando parte de la cuenca mayor del río Coello, tal y como se observa en la **Figura 1**, la cuenca recibe los tributarios de las quebradas Cristales, La Julia, el Violín, Perales y La Estrella y por la margen izquierda el de las quebradas La Guala, Chorros Blancos y El Espejo. Tras recoger en su caudal todo el volumen de aguas del municipio de Cajamarca, cambia de nombre y se le conoce como río Coello a los 1700 msnm. (Alcaldía de Cajamarca, Sin Fecha)

Figura 1. Ubicación general de la cuenca del Rio Bermellón



Fuente: (Propia, 2024)

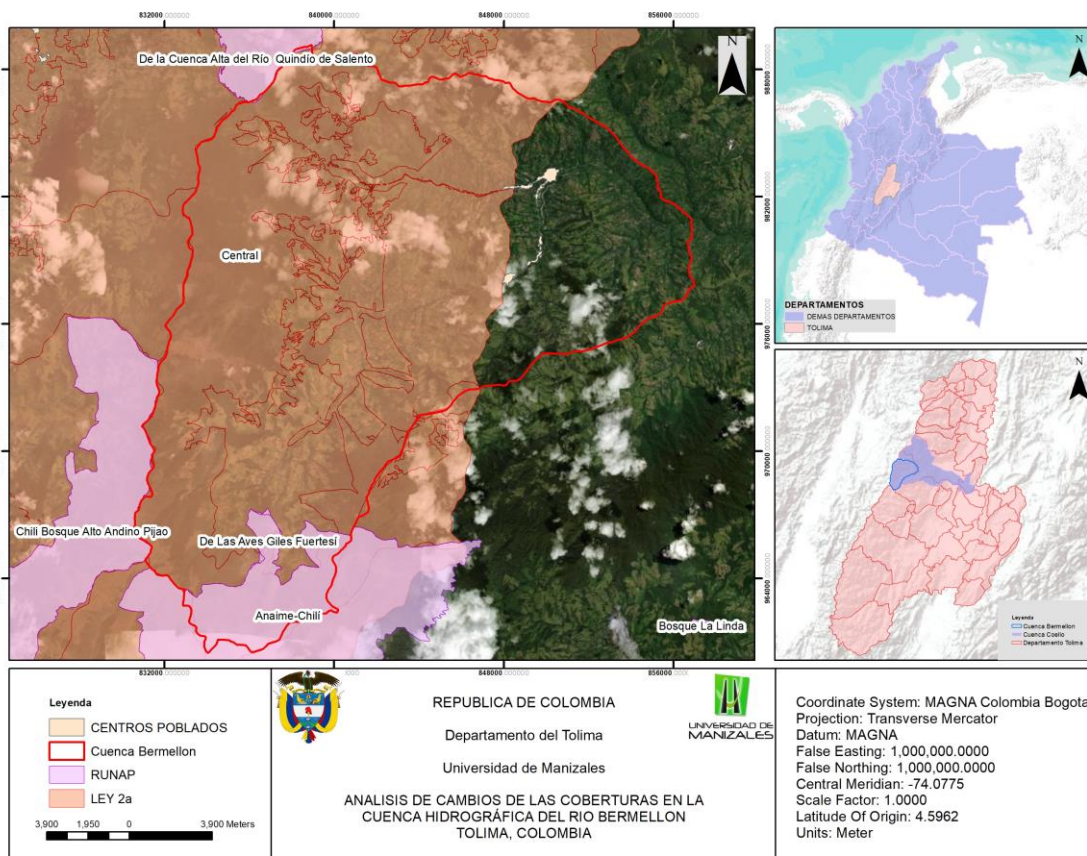
El presente estudio se enfocará en analizar los cambios de la cobertura forestal de la unidad hidrográfica del Rio Bermellón, uno de los afluentes más importantes del rio Coello; este enfoque se justifica por ser la segunda unidad más grande dentro de la cuenca del rio Coello con 42.039,33 ha o 23,13%, además, en esta área se presenta el casco urbano y veredas del municipio de Cajamarca y el centro poblado de Anaime. (CORTOLIMA, 2018)

Las áreas de importancia ambiental con las que cuenta la cuenca son, la Reserva Forestal Ley Segunda de 1959 – Zona Central, (b. Zona de reserva forestal central, comprendida dentro de los siguientes limites generales: una zona de 15 kilómetros hacia el lado Oeste, otra 15

Análisis de Cambios de las Coberturas en la Cuenca Hidrográfica del Río Bermellón, Tolima, Colombia

kilómetro otra, 15 kilómetros hacia el este del divorcio de aguas de la Cordillera Central, desde Cerro Bordoncillo, aproximadamente a 20 kilómetros al Este de Pasto, hasta el Cerro de los Prados al Norte de Sonsón); áreas para la protección de suelos, agua, vida silvestre y desarrollo de la economía forestal. (Congreso de Colombia, 1959). También, se encuentra el complejo de páramos los Nevados en la parte noroccidental y Chili Barragán en la parte suroccidental de la cuenca. En la **Figura 2**, se puede observar las áreas de importancia ambiental que se encuentra dentro de la cuenca del Río Bermellón, las áreas de ley 2ª se muestran en color naranja^a, y las áreas de RUNAP con un tono morado, esto indica que las áreas de especial importancia abarcan una gran parte de la cuenca.

Figura 2. Ubicación de la cuenca del Río Bermellón, y áreas de importancia ambiental.



Fuente: (Propia, 2024)

Adicionalmente se encuentran zonas pertenecientes a áreas protegidas y ecosistemas estratégicos tales como Parques Naturales Regionales y Reservas Naturales de la Sociedad Civil, tales como Anaime-Chilí y De Las Aves Giles Fuertesí, respectivamente. (CORTOLIMA, 2018).

En esta unidad se presenta una riqueza hídrica con alrededor de 50 cuerpos de aguas permanentes, que presentan una variedad de conflictos como a la deforestación debido a la ampliación de la frontera agrícola, pecuaria y actividades mineras ilegales. (CORTOLIMA, 2018).

1.2 Formulación del Problema

La noción de cuenca hidrográfica ha mostrado un gran potencial para entender y organizar la relación entre la sociedad y la naturaleza en espacios geográficos específicos; ello ha propiciado el uso de esta unidad en la gestión del espacio y la toma de decisiones, dando lugar al manejo o gestión de cuencas. (Burgos, Bocco, & Sosa Ramírez, 2015).

La definición aplicada por el Banco Mundial para el manejo de cuencas es “el uso integrado de agua, tierra y vegetación en un área de drenaje geográficamente discreta para el beneficio de sus residentes, con el objetivo de proteger y conservar los servicios hidrológicos que la cuenca provee, y de reducir y evitar los impactos negativos aguas abajo y en el subsuelo”. (Burgos, Bocco, & Sosa Ramírez, 2015).

Los cambios de cobertura del suelo en las cuencas hidrográficas son muy relevantes en cuanto a conservación ambiental y sostenibilidad de los ecosistemas y de las sociedades. Algunas alteraciones impactan directamente la estructura ecológica de la cuenca, repercutiendo no solo en la salud y funcionalidad de esta, sino también a la fauna y flora, además, reduce significativamente los bienes y servicios ecosistémicos que estas ofrecen. La deforestación, la expansión de la frontera agrícola, la sobreexplotación de recursos naturales y/o los desastres naturales pueden disminuir la capacidad de la cuenca para regular el ciclo del agua y reducir la calidad del agua y de nutrientes, esto a su vez afecta la disponibilidad de recursos vitales como alimentos, materiales, agua potable y a los servicios como el control de inundaciones y la polinización.

La cuenca del río Bermellón, es un ecosistema vital, no solo por su biodiversidad, sino que también juega un papel crucial en temas de seguridad alimentaria y el desarrollo económico de las comunidades que dependen de ella. Sin embargo, en años anteriores en distintos sectores de la cuenca, se presentaban alteraciones por diferentes actividades antropogénicas como agricultura, ganadería, industria, extracción de material de arrastre, entre otros (Cortolima, 2002; Losada-Prado et al., 2005; Arias-Díaz et al., z et al., 2007, como se cita en (Guevara, 2014).

La cuenca tiene reporte de grandes extensiones de zonas cultivadas (e.g., aguacate hass, arroz, sorgo, algodón, maíz, café, banano, hortalizas y frutales), pastos para ganadería y áreas urbanas, los cuales se encuentran aledañas a las áreas de bosques tanto secundarios como naturales y a la vegetación de páramo de la cuenca (Losada-Prado et al., 2005 como se cita en

(Guevara, 2014). Además, la cuenca del río Bermellón, ha estado marcada por importantes desarrollos, como la construcción del Túnel de La Línea y los viaductos entre Ibagué y los límites con el departamento del Quindío, causando remoción, erosión del suelo y sedimentación en el río Bermellón (Peralta et al., 2006); Por otro lado, el controvertido proyecto de megaminería La Colosa, aunque este último fue prohibido por la consulta popular del 2017, estos proyectos cercanos al municipio de Cajamarca, han ejercido presión sobre la cuenca, intensificando las preocupaciones sobre la contaminación y el deterioro ambiental.

La cuenca hidrográfica recoge toda el agua superficial y subterránea hacia el lecho de un curso de agua, lo que puede arrastrar la contaminación generada en el área de la cuenca. Factores como el uso de pesticidas, contaminantes del aire, y vertidos de aguas residuales industriales y domésticas afectan la calidad del agua de los ríos dentro de la cuenca. Según un estudio sobre la calidad del agua para consumo humano, uno de los principales problemas en el departamento del Tolima es la limitada capacidad de tratamiento del sistema de agua potable. Este estudio encontró que el 63.83 % de los municipios presentan agua no potable, incluyendo Santa Isabel, Suárez, Valle de San Juan, Alpujarra, Anzoátegui, Ataco, Casabianca, Coyaima, Cajamarca, Fresno, Falan, Herveo, Venadillo y Villarrica (El Tiempo, 2023). Además, en una investigación previa, se identificó que en la categoría de "inviabile sanitariamente" se clasificaron los municipios de Ataco, Cajamarca, Planadas, Rovira, Valle de San Juan y Villarrica. (Briñez, Guarnizo, & Arias, 2012).

La ciudad de Ibagué, la capital del departamento del Tolima presenta una problemática general, y es la falta de suministro de agua para el consumo humano. El acueducto de la ciudad

Análisis de Cambios de las Coberturas en la Cuenca Hidrográfica del Río
Bermellón, Tolima, Colombia

se abastece del río Coello, que se origina en la cordillera central, se nutre de afluentes como el río Bermellón y el río Anaime que circundan al municipio de Cajamarca e irriga áreas de cultivo en el centro del Departamento a través del Distrito de Adecuación de Tierras de los Ríos Coello y Cucuana (Usocoello). (Delgado Esguerra, 2023)

Existe un estudio de la cobertura y uso del suelo para la cuenca del río Coello (CORTOLIMA, 2018), producto de la interpretación de imágenes satelitales del año 2017 a escala de 1:25.000; pero estos estudios tienen conceptualizaciones en sistemas de clasificación, diferentes fuentes de datos (fotografías aéreas, imágenes satelitales), y escalamiento de los resultados.

Con este trabajo de investigación se busca determinar los cambios en las coberturas del suelo en la cuenca del río Bermellón en los últimos 21 años, utilizando imágenes satelitales LANDSAT. Se busca identificar transformaciones en el uso del suelo y evaluar el impacto de la presión demográfica en el cambio de estas coberturas.

¿Cómo a través de un análisis multitemporal utilizando imágenes satelitales se puede determinar el cambio en las coberturas en la cuenca del Río Bermellón, Tolima, Colombia?

1.3 Justificación

De acuerdo con el decreto 1729 del 2020, en su artículo 1°, define la cuenca como el área de aguas superficiales o subterráneas, que vierten a una red natural con uno o varios cauces naturales, de caudal continuo o intermitente, que confluyen en un curso mayor que, a su vez, puede desembocar en un río principal, en un depósito natural de aguas, en un pantano o directamente en el mar.

Las cuencas hidrográficas son vitales para la sostenibilidad de los ecosistemas, ya que son importantes en la distribución y disponibilidad de las aguas, y una reserva importante de biodiversidad y hábitat de múltiples especies de fauna y flora. Las cuencas hidrográficas además de los beneficios ecológicos, brinda beneficios sociales, ya que por su estructura permite reservas forestales, donde se podrían realizar actividades de turismo ecológico; Los recursos naturales de la cuenca como, el agua, los nutrientes del suelo y minerales, sustentan los cultivos que sostienen la economía local; sin embargo, esta actividad puede comprometer el equilibrio de la cuenca si no se toman medidas para protegerla. Por ello es fundamental considerar las dinámicas asociadas a la cuenca y gestionar de manera sostenible los recursos para asegurar la preservación de este ecosistema y el bienestar de las comunidades dependientes.

Los estudios multitemporales son llevados a cabo con el objeto de detectar cambios en la cobertura del suelo entre distintas fechas, deduciendo de ahí la evolución del medio natural o las repercusiones de la acción humana sobre el medio (Guerrero Muñoz, Rodríguez

Montenegro, & Romero Hernandez), este tipo de estudio ha sido considerado un aspecto fundamental para los procesos de planificación del uso de las tierras en cuencas hidrográficas. Para el caso de la cuenca del río Bermellón, la intervención antrópica se evidencia a través del crecimiento urbano, la deforestación, la ampliación de la frontera agrícola y minera, y la erosión del suelo principalmente en zonas con relieves ondulados y de pendientes pronunciadas (Ramirez Chamorro & Ocampo Osorio, 2013), por lo que se considera necesario realizar este tipo de estudios y evidenciar que tipos de cobertura hay presentes y en las cuáles se han presentado los cambios sucedidos en los últimos 21 años; además, hay que considerar que la cuenca del río Bermellón, es uno de los principales afluentes de la Cuenca mayor del Río Coello, fuente abastecedora para el acueducto del municipio de Cajamarca y vital para la sostenibilidad de los ecosistemas de locales.

El agua, el suelo, el aire, la flora, la fauna son recursos naturales que se les da la connotación de renovables, pero hoy se considera que esta información es cuestionable; la forma inadecuada de su uso o explotación, son factores que alteran las condiciones naturales y por lo tanto condicionan su existencia dentro del planeta. (Fundacion Aquae, 2021). Conservar, defender y usar racionalmente los recursos es responsabilidad no sólo de los gobiernos sino de todos sin distinción alguna. La conservación del agua inmediatamente apunta hacia la protección y buen manejo de las cuencas hidrográficas, que son las “fábricas” naturales de este recurso indispensable. (Garcia Cobos, Lizarazo Sarmiento, & Romero Ramirez, 2017).

Desafortunadamente, las cuencas hidrográficas de países como Colombia no suelen recibir un manejo adecuado y a menudo enfrentan descuido y un deterioro extremo, esto ha provocado la desaparición de muchas fuentes de agua en verano, mientras que, en invierno, la recuperación

repentina de caudales puede causar inundaciones significativas, arrasando con cultivos, pastos, bosques, infraestructura y vidas humanas. (CORTOLIMA, 2009).

Esta situación de extremo desbalance destaca la necesidad realizar estudios que detallen el cambio en las coberturas del suelo; para abordar este desafío, se busca implementar mecanismos eficientes y rentables, como la teledetección que facilitan el análisis y monitoreo de en las cuencas hidrográficas.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Analizar los cambios de las coberturas presentes en la cuenca hidrográfica del río Bermellón mediante la metodología de análisis multitemporal y el procesamiento de imágenes Landsat por un periodo de 21 años como insumo para determinar estrategias efectivas de conservación y manejo sostenible de la cuenca.

2.2 Objetivos Específicos

- Delimitar a partir de imágenes Landsat y el procesamiento digital de imágenes las coberturas presentes en la cuenca del río Bermellón para su ubicación, identificación y descripción.
- Determinar mediante la metodología de análisis multitemporal la tasa cambios espaciales de las coberturas y las zonas de mayor presión demográfica en la cuenca del río Bermellón.
- Establecer la relación entre el comportamiento de las coberturas presentes en la cuenca del río Bermellón, las actividades antrópicas en el área de influencia de la cuenca que permitan proponer estrategias de planificación.
- Representar mediante salidas cartográficas la dinámica espacial y temporal de las coberturas terrestres presentes en la cuenca del río Bermellón.

3. ANTECEDENTES

El análisis de coberturas vegetales mediante imágenes satelitales y el uso de teledetección, se ha convertido en una técnica que permite evaluar y monitorear la distribución y cambios en la vegetación a lo largo del tiempo. Esto ha permitido considerar este análisis, como crucial para entender las dinámicas naturales y antrópicas de determinada zona de estudio.

Estos estudios acerca del cambio en el uso de suelos evalúan variables como la conversión de áreas naturales en zonas urbanas o la velocidad de la deforestación/reforestación. Estos datos ayudan a determinar la extensión geográfica de los cambios y a describir las causas sociales y económicas en escalas globales, regional y local (Skole et al. 1994, Ojima et al. 1994). Para poder analizar los avances realizados en este campo, es importante comprender el contexto de esta investigación y revisar los antecedentes que han abordado temas relacionados. A continuación, se presenta una revisión de la literatura a nivel internacional, nacional y regional.

Antecedentes Internacionales

Históricamente los análisis multitemporales de coberturas en cuencas hidrográficas utilizando metodologías de teledetección se realizaron finalizando el siglo XX.

Hashiba y otros (2000). Análisis del cambio de uso del suelo de la cuenca del río Tama con diferentes datos de sensores de resolución espacial mediante landsat/mss y tm

Plantearon que el mayor problema en términos de ingeniería y de planificación ambiental dentro de una cuenca ocurre cuando el proceso de cambio de uso del suelo no puede entenderse a lo largo del tiempo, por esta razón, utilizaron técnicas de supervisión clasificada para analizar el cambio de uso del suelo en la cuenca del Río Tama, ubicada en Tokio- Japón. Todo el análisis se realizó con ayuda de imágenes Landsat, sensor MSS (80m), TM (30m) y mapas topográficos, para un periodo 25 años desde 1972 hasta 1997; Se determinó que no hubo cambios significativos que afecten gravemente la planificación ambiental y la gestión sostenible de los recursos de esa región. (Hashiba, Kameda, Uesugi, & Tanaka, 2000)

El desafío más grande en esta investigación era analizar los datos desde dos sensores diferentes, sin embargo, la diferencia de clasificación entre uno y otro fue menos del 3%, esto gracias a la configuración adecuada de los datos de entrenamiento. (Hashiba, Kameda, Uesugi, & Tanaka, 2000)

Sarria A, Gomariz F. u Cánovas F, (2010) Análisis temporal de los cambios de usos del suelo en la Cuenca del Segura mediante teledetección. Implicaciones sobre la degradación.

Llevaron a cabo un estudio sobre la evolución del uso del suelo en la Cuenca del Segura, una región ubicada en el sureste de la Península Ibérica, esta presentaba desafíos

significativos debido al cambio climático, las prácticas agrícolas, la erosión y el crecimiento urbano, además, la zona de estudio no contaba con datos históricos para realizar posibles comparativos de la evolución del uso del suelo. Por lo tanto, la principal motivación era proporcionar datos precisos que ayudaran a la gestión de los recursos naturales y la planificación ambiental, estableciendo así, un punto de partida para futuros estudios y medias de conservación. Para abordar esta investigación se apoyaron en una metodología aplicada a un entorno GNU/Linux para elaborar una colección multitemporal de coberturas, se recopilaron 100 imágenes de satélites Landsat desde 1976 hasta 2007 en fechas distintas para mejorar la discriminación de los cultivos, se realizaron correcciones a las imágenes y una integración de clasificación supervisada y no supervisada, para ello buscaron áreas de entrenamiento y validación que hubiesen usado suelo en los últimos 30 años. (Alonso Sarría, Gomariz Castillo, & Cánovas García, 2010)

Por problemas relacionados con la nubosidad y la disponibilidad de información se redujo la cantidad de imágenes y se agruparon las clases con naturaleza similar, se tuvieron en cuenta los errores de clasificación donde utilizaron validaciones cualitativas detalladas basadas en el conocimiento de la cuenca y validaciones cuantitativas a partir matrices de confusión. Los autores mencionan que la estadística es parte fundamental en los estudios de cambios de uso de suelo, en especial las matrices cruzadas de cambios que permiten conocer los cambios absolutos ante posibles estados y determinar correlaciones entre estos. (Alonso Sarría, Gomariz Castillo, & Cánovas García, 2010)

Wohlfart, Liu, Huang, & Kuenzer, (2016), Una cuenca fluvial a lo largo del tiempo: análisis multitemporales de la dinámica de la superficie terrestre en la cuenca del río Amarillo (China) basados en datos de teledetección de resolución media

Realizaron un estudio sobre las dinámicas de la superficie terrestre de la cuenca del río Amarillo “cuna de la civilización” (China), una de las regiones más densamente pobladas y de más rápido crecimiento. Utilizaron datos de teledetección de resolución media y alta para analizar los cambios en la cobertura del suelo entre 2003 y 2013. La investigación que empleo series temporales del Índice de Vegetación Normalizada del MODIS, minería de datos y un clasificador de árboles aleatorio, logro una precisión del 87% en clasificación de la cobertura. Los hallazgos revelaron cambios significativos en la cobertura del suelo en el año 2013, impulsados por la expansión agrícola y a la urbanización por el auge económico de la producción de carbón y productos químicos.

Otro hallazgo importante que se encontró fue los importantes cambios en la meseta de Loess, zona altamente erosiva que a lo largo de la historia registra deforestación y pastoreo excesivo, cambio que se le atribuyó a reformas de conservación aplicadas en esta zona. Este estudio subraya la importancia de contar con mapas de cobertura del suelo específico para la región, lo cual es crucial para la gestión sostenible y la toma de decisiones en una región densamente poblada y en rápido desarrollo. (Wohlfart, Liu, Huang, & Kuenzer, 2016)

Condori-Luna, Loza-Murguía, Mamani-Pati, & Solíz-Valdivia, (2018), Análisis multitemporal de la cobertura boscosa empleando la metodología de teledetección espacial y SIG en la sub-cuenca del río Coroico - provincia Caranavi en los años 1989 – 2014

En este estudio realizado en la subcuenca del río Coroico (2.119.894 Ha), en la provincia de Caranavi, Bolivia, se buscaba realizar el análisis multitemporal de la cobertura boscosa de dicha subcuenca debido a una preocupante tendencia en la deforestación en el Amazonas Boliviano. Los autores utilizaron imágenes Landsat de los años 1989, 2005 y 2014 y técnicas avanzadas de procesamiento espacial como clasificación supervisada de imágenes multiespectrales, aplicación de análisis de componentes principales (ACP) para mejorar la discriminación de características vegetales y no vegetales. Este análisis reveló, una tendencia alarmante de pérdida de bosques debido a la agricultura intensiva y mecanizada y ha procesos urbanísticos, las áreas deforestadas aumentaron significativamente de 241.63 Ha en 1989 a 893.58 Ha a 2014, estos hallazgos permitieron tener datos fundamentales para empezar la gestión sostenible de los recursos naturales y la planificación en esa zona de Bolivia. (Condori-Luna, Loza-Murguía, Mamani-Pati, & Solíz-Valdivia, 2018)

Fatmawati, Aurora, Thong y Furuya (2024), Impacto de la urbanización en la dinámica de la vegetación en la cuenca del río Tama

realizaron otra investigación sobre la dinámica de la vegetación en el Río Tema para el periodo de 1990 a 2021, este estudio se centró en el impacto de la urbanización en dicha

dinámica, teniendo en cuenta variables como el uso del suelo, la temperatura superficial y la evolución de la vegetación. Ellos reconocieron los desafíos significativos con la calidad de las imágenes satelitales, esto debido a la variación estacional y las condiciones meteorológicas. Aunque se utilizó la correlación de Pearson como medida estadística, se enfatizó que este enfoque podría no captar interacciones complejas como patrones o efectos de saturación. Finalmente, los autores identificaron que existe numerosos factores adicionales dentro de la urbanización que pueden influir en esta dinámica, como el desarrollo de infraestructura, la densidad poblacional, los niveles de contaminación, entre otros. (Fatmawati, Aurora, Thong, & Furuya, 2024)

Antecedentes Nacionales

A nivel de Colombia, se han realizado distintos estudios de análisis multitemporales, entre los cuales se encuentra el cambio de coberturas vegetales y el cambio de los usos del suelo en distintas zonas del país.

Para este estudio, los que se tuvieron en cuenta fueron las investigaciones que están más relacionadas a los análisis multitemporales de los cambios de las coberturas vegetales en distintas partes de territorio colombiano.

Sánchez-Cuervo & Aide, (2013), Consecuencias del conflicto armado, el desplazamiento humano forzado y el abandono de tierras en el cambio de cobertura forestal en Colombia: un análisis multitemporal.

Este estudio se enfocó en analizar los cambios de cobertura forestal en 1.117 municipios de Colombia entre los años 2001 y 2010, los autores integraron variables ambientales, socioeconómicas y de conflicto armado como desplazamiento forzado y abandono de tierras, también, se apoyaron en técnicas de teledetección. Esta investigación emplea un enfoque de clasificación de uso de suelo (LULC) utilizando 23 imágenes MODIS por año, índices de vegetación mejorada (EVI) y el clasificador bosques aleatorios (Random Forest); Se recopilaron más de 10.000 muestras de referencia para el entrenamiento del clasificador y la evaluación de la precisión con interpretación humana (autores), después, utilizaron la interfaz web de interpretación virtual de la tierra (VIEWIT) que superpone píxeles MODIS en imágenes de alta resolución de Google Earth. (Sánchez-Cuervo & Aide, 2013)

Los resultados del estudio indican que hubo un aumento neto de 16.963 km² en la cobertura arbórea de Colombia principalmente en los Andes y el bioma de Bosque Húmedo. Sin embargo, también se observaron pérdidas en menor medida en áreas de baja altitud. Además, aluden que la principal causa de cambio es por la migración rural-urbana en áreas donde había una alta presencia de grupos armados ilegales. Los autores mencionan la importancia de las herramientas de teledetección, específicamente hablan de los datos satelitales MODIS, que permitieron lograr una precisión del 87,4% y resaltan la relevancia de

herramientas como VIEW-IT en el análisis de cambios de cobertura forestal. (Sánchez-Cuervo & Aide, 2013)

Pérez & Villegas, (2018), Análisis multitemporal del cambio de cobertura del suelo en los Andes colombianos: un estudio de caso del departamento de Antioquia.

Este estudio se centró en analizar y cuantificar los cambios en el uso y la cobertura de la tierra de la cuenca del río Grande, en el departamento de Antioquia, Colombia. La cuenca tiene una extensión aproximada de 1,300 km² y es la encargada de abastecer el agua potable y la energía eléctrica en el área metropolitana del Valle de Aburra. Se utilizaron series temporales de mapas de coberturas terrestres en el periodo 1986-2012, se construyeron matrices de transición, se espacializaron las principales trayectorias y se presentaron mapas de coberturas para los años 1986, 1997 y 2012; Las imágenes se procesaron con un clasificador subpixel conocido como Support Vector Machine-SVM y para este proceso se definieron nueve tipos de coberturas terrestres. En conclusión, los resultados revelaron una variación en las coberturas terrestres, con procesos de deforestación solo el 73% de los bosques originales permanecían y paisajes complejos dominado por mosaicos de pastos y cultivos, sin embargo, se evidenció recuperación forestal reciente especialmente entre 1997 y 2012. (Pérez & Villegas, 2018)

Armenteras, Rodríguez, & Retana, (2013), Dinámica del paisaje en el noroeste de la Amazonia: una evaluación de los pastos, los incendios y los cultivos ilícitos como impulsores de la deforestación tropical.

En el estudio realizado en el Amazonas colombiano evidencia que las actividades económicas en la región están relacionadas principalmente con las industrias extractivas de recursos naturales, seguidas por el establecimiento de pastos y cultivos y por ende en el cambio de coberturas en el área de estudio. El proceso de colonización forestal sigue el curso de ríos y caminos navegables. la ocupación humana en la Amazonía colombiana no sigue un patrón de espina de pescado ya que la construcción de carreteras que muchas veces es el origen de este tipo de patrón aún no es uno de los principales impulsores de la deforestación en el área de estudio. El cultivo de cultivos ilícitos (principalmente coca, *Erythroxylum coca*) ha sido el principal motor económico y de transformación de la región en las últimas décadas, y el 17% de la coca registrada en Colombia en 2009 se ubicó en el área de estudio. El ganado se concentra principalmente cerca de los municipios con un desarrollo continuo de infraestructura y carreteras. (Armenteras, Rodríguez, & Retana, 2013)

En el estudio realizado en entre 2000 y 2009 en la Amazonía noroccidental de Colombia (Armenteras , Rodríguez, & Retana, 2013), se analiza el cambio de cobertura de la tierra, el principal enfoque de este fue al uso del fuego, el crecimiento de cultivos ilícitos y el establecimiento de pastos. A pesar de que las áreas boscosas se conservaron relativamente bien, la deforestación ocurrió a un ritmo bajo (0,06% anual). La conversión a pastizales fue el principal factor de pérdida forestal, triplicándose en mosaicos de bosques en 8 años. El uso del

fuego se asoció a la conversión de bosques en pastizales, mientras que la regeneración forestal se observó en áreas con bosques naturales abundantes.

Armenteras, Rodríguez, & Retana, (2013), Modelando la conversión de los ecosistemas de tierras bajas de Colombia desde 1940: impulsores, patrones y tasas

En países que cuentan con una gran diversidad como lo es Colombia y donde la transformación del paisaje es rápida, los autores del estudio consideran que es esencial entender los patrones de cambio de cobertura terrestre. El analiza el cambio de uso del suelo en seis áreas de ecosistemas de tierras bajas en Colombia, considerando variables como la fertilidad del suelo y la distancia de los costos (Etter, McAlpine, Pullar, & Possingham, 2006). Los resultados indican que la deforestación es mejor predicha por un modelo que incluye todas las variables, mientras que la regeneración forestal depende más de términos vecinales autocorrelacionados. La cobertura forestal disminuye consistentemente, estabilizándose en un 2-10% del original.

Calle, y otros, (2013), Una estrategia para ampliar los sistemas silvopastoriles intensivos en Colombia.

El estudio analiza los patrones espaciales y temporales de la deforestación y la regeneración forestal en los ecosistemas de tierras bajas de Colombia, (Calle, y otros, 2013) utilizando un modelo conceptual con predicciones a priori. El estudio destaca que la deforestación es mejor explicada por un modelo que incluye múltiples variables, mientras que la regeneración forestal depende más de factores vecinales autocorrelacionados. La cobertura

forestal muestra un patrón de disminución logística, siendo reemplazada principalmente por pastizales. Este análisis tiene implicaciones para la planificación de la conservación en regiones con altas tasas de deforestación.

Henao & Medina, (2018), Dinámicas espaciales de la cobertura y uso del suelo en la Orinoquía colombiana

El estudio explora las dinámicas espaciales de la cobertura y uso del suelo en la región de la Orinoquía colombiana mediante técnicas de teledetección y sistemas de información geográfica (SIG) (Henao & Medina, 2018). Los autores identifican los principales cambios en la cobertura del suelo, incluyendo la expansión agrícola, la deforestación y el crecimiento de áreas de pastizales, revelando patrones de uso que afectan la sostenibilidad ambiental y económica de la región a través de metodologías de teledetección. El estudio subraya la importancia de entender estas dinámicas para mejorar la gestión territorial y diseñar políticas que protejan los recursos naturales, mitiguen la deforestación y promuevan un desarrollo más equilibrado en la Orinoquía.

Rodriguez & Ospina, (2012), Cambio en el uso del suelo y cobertura vegetal en la región Andina de Colombia, utilizando imágenes de satélite Landsat.

El estudio analiza las dinámicas de cambio en la cobertura y el uso del suelo en la región investigada, con énfasis en las transformaciones impulsadas por actividades humanas como la agricultura, la ganadería y la expansión urbana. A través de datos de teledetección y

sistemas de información geográfica (SIG), los autores identifican patrones de deforestación y conversión de tierras que amenazan tanto la biodiversidad como la sostenibilidad ecológica. .

(Rodríguez & Ospina, 2012)

Mediante un análisis espacial, el estudio destaca cómo las prácticas de uso del suelo están alterando considerablemente los ecosistemas locales, aumentando la fragmentación del hábitat y la pérdida de cobertura forestal. Asimismo, se discuten las implicaciones de estos cambios para las comunidades locales y los desafíos que suponen para una gestión ambiental sostenible. El artículo concluye con varias recomendaciones para mitigar los impactos negativos de estas dinámicas, entre ellas, la implementación de políticas públicas que promuevan el uso sostenible de la tierra y la conservación de los recursos naturales. Se subraya la necesidad de estrategias de gestión integradas que equilibren el desarrollo económico con la protección del medio ambiente. (Rodríguez & Ospina, 2012)

4. REFERENTE NORMATIVO Y LEGAL

En este apartado del documento se hace referencia a la normatividad en la cual se enmarca esta investigación

Constitución Política de Colombia de 1991.

En los artículos 8, 79 y 80, es deber del estado proteger la riquezas culturales y naturales de la nación, planificar el uso y aprovechamiento de los recursos naturales y garantizar el derecho a gozar de un ambiente sano.

Ley 99 de 1993 “por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente.

Se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones”. En su artículo 1, numeral 2, dispone que la biodiversidad del país es patrimonio nacional y de interés de la humanidad y debe ser protegida.

Ley 165 de 1994.

El estado colombiano mediante esta Ley aprueba el “Convenio de las Naciones Unidas sobre Diversidad Biológica”, en cumplimiento de los compromisos adquiridos en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo celebrada en Río de

Janeiro el 5 de junio de 1992. Este convenio tiene como objetivos: i) La conservación de la diversidad biológica. ii) La utilización sostenible de sus componentes. iii) La participación justa y equitativa en los beneficios que se deriven de la utilización de los recursos genéticos.

Ley 388 de 1997: La “Ley de Desarrollo Territorial”.

La cual establece un mandato para que todos los municipios del país formulen sus respectivos Planes de Ordenamiento Territorial - POT. Esta ley de ordenamiento territorial “por la cual se modifica la ley 9 de 1982 y la ley 9 de 1991”, crea mecanismos que permiten a los municipios promover el uso equitativo y racional del suelo, la preservación y protección del patrimonio cultural y ecológico, así como la ejecución de acciones urbanísticas eficientes (Congreso de la República de Colombia, 1997). Esta ley dispuso que los municipios pudieran elaborar un plan de ordenamiento territorial (POT) de largo plazo, incorporando los planes de desarrollo a nivel departamental y municipal, centrado en variables ambientales, económicas y físico -espaciales, con el fin de motivar el desarrollo. (Congreso de la República de Colombia, 1997).

Código de Recursos Naturales – Decreto 2811 de 1974:

El Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente aborda toda la reglamentación en el manejo y la defensa de los recursos naturales renovables, así como la defensa del ambiente contra la acción nociva de fenómenos naturales y demás elementos y factores que conforman el ambiente e influyan en él. Adicionalmente en el

artículo 1° de este decreto se reconoce al ambiente como patrimonio común y establece responsabilidades en su preservación y manejo; además en el artículo 327 denomina al Sistema de Parques Nacionales como el conjunto de áreas con valores excepcionales al patrimonio nacional que, en beneficio de los habitantes de la nación y debido a sus características naturales, culturales o históricas, se reserva y declara comprendida en cualquiera de las categorías que adelante se enumeran. Se establecen sus finalidades, los tipos de áreas que lo conforman, necesidad de determinar las zonas amortiguadoras y las orientaciones para su administración y uso.

Decreto 2372 de 2010.

Este decreto en su carácter reglamentario, formula los procedimientos del Sistema Nacional de Áreas Protegidas para el país. Además, brinda importantes aportes en su desarrollo conceptual; ya que apoya en la definición de determinados escenarios ambientales, que adquieren un carácter relevante para la ejecución de actividades prioritarias relacionadas a su cuidado. (Departamento Administrativo de la Función Pública, Decreto 2372 de 2010, 2010)

Decreto 1640 de 2012

Reglamenta los POMCA y establece las directrices para su elaboración, implementación y seguimiento. Este decreto detalla los aspectos técnicos y administrativos relacionados con los POMCA, incluyendo la participación ciudadana, la formulación de diagnósticos y planes de acción, entre otros.

Plan de ordenamiento y manejo ambiental de la cuenca mayor del río Coello 2018.

En este participaron diferentes organismos referentes del departamento del Tolima, con la finalidad de Orientar el proceso de ordenación y manejo de cuencas con la participación de actores clave, basados en los recursos naturales con los que se cuenta y en las necesidades de las personas que habitan en la cuenca hidrográfica.

5. REFERENTE TEÓRICO

5.1 Coberturas y Usos de la Tierra.

Aunque estos dos términos se han utilizado en conjunto, conceptualmente son distintos, aunque relacionados, la cobertura determina el uso, y el uso del suelo (entendido como una intervención antrópica), presenta una cobertura en la tierra.

La cobertura vegetal de la tierra es la expresión evolutiva del agregado de especies vegetales en un lugar y en un tiempo determinado (Durán, 2007), por tal razón, la cobertura es un elemento indicador del estado o condición de los ecosistemas. Las coberturas vegetales además están determinadas por los usos de los suelos, que constituyen la expresión conjunta de las plantas oriundas o introducidas y la utilización antrópica que se hace del medio biofísico de un área. Por lo tanto, los usos de los suelos deben ser considerados una de las más importantes manifestaciones espaciales de los paisajes no solo naturales sino también culturales de un territorio (Lambin, y otros, 2001).

Una de las maneras más usuales de determinar las coberturas y uso de la tierra, es a través de herramientas espaciales que integran sensores remotos y sistemas de teledetección, telemetría y sistemas de información geográfica. Haciendo uso en conjunto de estas herramientas, se puede en detalle, determinar la vegetación natural o cultivada, construcciones, ríos, mares, humedales, esteros, hielo, afloramientos rocosos y todo lo que sobre la tierra se haya desarrollado de manera natural o con intervención antrópica, siempre y cuando se refleje en el sensor o pueda ser determinado.

Las coberturas por principio no son estáticas, son producto de la transformación de la tierra y el desarrollo del hombre, sus cambios determinan el funcionamiento de los ecosistemas terrestres ya sea afectando directamente la biodiversidad, contribuyendo a los cambios climáticos locales, regionales y globales o ser las fuentes primarias de la degradación de los suelos.

En otra definición, la cobertura, es la superficie biofísica que se observa sobre la superficie de la tierra, es en sí la misma tierra expuesta, incluye elementos naturales, antrópicos, afloramientos rocosos y suelos desnudos, y cuerpos de agua (IDEAM, 2012). Las coberturas también vienen siendo la expresión de las actividades humanas.

De acuerdo con (IDEAM, 2012), el "Uso" de la tierra implica la utilidad que el humano le da a un tipo de cobertura, el uso está directamente relacionado a su desarrollo y diario vivir, las funciones económicas de un espacio específico de la tierra y las actividades humanas (uso urbano, industrial, de reserva natural, etc.).

Como resultado del uso, algunas coberturas se renuevan, transforman o incluso se degradan; los recursos de la tierra, aunque abundantes, su proceso de renovación puede ser lento; en un uso intensivo, la tasa de degradación excede la tasa natural de regeneración. Esto significa que lo que se pierde por degradación no es naturalmente reemplazado en el corto plazo incluso ni en el lapso de una vida humana, dando lugar así a una pérdida de oportunidades para las siguientes generaciones (FAO & PNUMA, 2000).

5.2 Ecosistemas Estratégicos

Los ecosistemas estratégicos garantizan la oferta de bienes y servicios ambientales esenciales para el desarrollo humano sostenible del país. Estos ecosistemas se caracterizan por mantener equilibrios y procesos ecológicos básicos tales como la regulación de climas, del agua, realizar la función de depuradores del aire, agua y suelos; la conservación de la biodiversidad. (MINAMBIENTE, Sin Fecha)

Colombia es un territorio el cual se encuentra cubierto básicamente de selva, bosques de diferentes tipos, los cuales abarcan el 84% de la totalidad del territorio. El otro 12% se divide entre sabanas, paramos, humedales y zonas secas. (ver **Tabla 1**)

Tabla 1 *Ecosistemas Estratégicos en Colombia.*

BIOMA	Área (Km ²)
Paramos	18.000
Selva Amazónica	14.000
Vegetación herbácea arbustiva de cerros amazónicos	7.500
Bosques bajos y catingales amazónicos	36.000
Sabanas llaneras	106.500
Matorrales xerofíticos y desiertos	9.500
Bosques aluviales (de vega)	95.000
Bosques húmedos tropicales	378.000
Bosque de manglar	3.300
Bosques y otra vegetación de pantano	6.500
Sabanas del Caribe	1.000
Bosques andinos	45.000
Bosques secos o subhúmedos tropicales	1.200
Áreas moderadamente intervenidas	70.000
Áreas fuertemente intervenidas	350.000
TOTAL	1.140.000

Fuente: (Márquez Calle, 2003)

5.3 Clasificación de las Coberturas.

Bajo unos criterios de diagnóstico definidos, la clasificación de las coberturas de la tierra son una representación abstracta de lo que en realidad hay en el campo (Gregorio, Sin Fecha). Sin embargo, ninguna de las clasificaciones actuales ha sido totalmente aceptadas a nivel internacional, ya que a veces las clases de coberturas definidas han sido desarrolladas para propósitos o escalas específicos, por lo tanto, no son aptos para todos los hemisferios.

(SOKAL, 1974) con un concepto bioestadístico, define la clasificación de las coberturas como "el arreglo u ordenamiento de objetos en grupos o conjuntos sobre la base de sus relaciones". Un esquema sistemático con clases y criterios que se usan para distinguir los elementos asociados que cubren la tierra en relaciones entre clases. Estas clases definidas deben tener un límite preciso, cuantitativo y objetivo el cual debe ser claro para el intérprete.

Teniendo en cuenta lo anterior, la clasificación de coberturas de un área depende del objetivo del estudio, de la metodología aceptada en la región y/o de la aceptación de la institución académica o gubernamental a cargo. En referencia para Colombia, el (IDEAM, 2012) define: "la delimitación de las coberturas de la tierra describe la cobertura como la unidad delimitable que surge a partir de un análisis de respuestas espectrales determinadas por sus características fisionómicas y ambientales, diferenciables con respecto a la unidad próxima".

Precisamente teniendo en cuenta las respuestas espectrales, en este trabajo se tomó en cuenta la clasificación de las coberturas boscosas bajo la metodología Corine Land Cover, y los

lineamientos de esta metodología ajustados por el (IDEAM, 2010) para Colombia llegando hasta el máximo nivel posible.

5.4 Corine Land Cover

Esta metodología tiene su origen en Europa, se inició con el programa CORINE, “Coordinación de información de medio ambiente”, el 27 de junio de 1985, inicialmente como un proyecto de tipo experimental para recopilar, coordinar y homogeneizar la información del estado del medioambiente y los recursos naturales (Valencia & Anaya, 2009). El objetivo principal era crear una base a escala 1:100.000 recolectando datos de tipo numérico y geográfico sobre el tipo de vegetación o cobertura, esto a través de la interpretación de imágenes satelitales tipo Landsat y Spot. En estas imágenes, se detectó la existencia de cambio espectrales visiblemente percibidos en la comparación de dos imágenes tomadas en diferentes periodos de tiempo con resultados presentados en figuras espaciales (polígonos, líneas o puntos). (Feranec, Hazeu, Christensen, & Jaffrain, 2007).

Estos resultados debido al soporte científico y rigurosidad técnica han tomado alta importancia científica, traspasando a las esferas ambientales y políticas, puesto que ayudan a la toma de decisiones de base para el ordenamiento territorial, la formulación de políticas de protección y conservación de los recursos naturales. (Alva & León, 2017).

La metodología CLC es utilizada en toda Europa y en Colombia fue modificada y ajustada por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, 2010) y Cormagdalena, asesorados por expertos del Instituto Geográfico Nacional de Francia (IGNF). Estas entidades elaboraron la Leyenda nacional de coberturas de la tierra. La Metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia, usando una escala 1:100.000, proporciona las características temáticas para el conocimiento de los recursos naturales con el fin de evaluar las formas de ocupación y la apropiación del espacio geográfico colombiano, así como la actualización de la información de la dinámica de las coberturas terrestres (IDEAM, 2010).

5.5 Sistemas de Información Geográfica

Los SIG son sistemas que permiten relacionar cualquier tipo de datos con localización geográfica. Se refiere a la gestión de datos espaciales que favorecen el estudio del suelo, el medio ambiente, el espacio geográfico, etc. Los SIG se componen de Software, Hardware y datos geográficos, que se reflejan en una representación geográfica y están diseñados para almacenar, analizar, manipular, consultar o capturar la información de manera coordinada. Los sistemas de información geográfica se han convertido en grandes aliados en la planificación territorial, la solución de problemas ambientales y socioeconómicos. (Olaya, 2014)

La historia de los sistemas de información geográfica inicia desde la necesidad de contar con material de apoyo para la navegación y la representación de la superficie espacial, como también las distancias de los territorios, por lo que inicialmente se le conocía como cartografía, pero a medida que pasaba el tiempo la necesidad de reflejar información geográfica

se iba incrementando, reflejándose en el avance tecnológico, donde se ha convertido en una serie de programas digitales diseñados para la recolección de datos geográficos. (Olaya, 2014).

Para los autores Lara, E. L., Simeón, C. P., & Navarro, J. G. M. (2006), Roger Tomlinson ejerció un papel fundamental en el desarrollo de los sistemas de información geográfica, dado que en 1964 con el fin de analizar la información del Canadá Land Inventory, estableció un banco de datos territoriales, que consistía en desarrollar un modelo que estructurara la información territorial, superposición cartográfica y captación de datos, etc, por lo cual se implementó un hardware para tal tarea, iniciando lo que hoy se conoce como SIG.

5.6 Programas De Procesamiento Espacial

5.6.1 ArcGIS

Es un programa o plataforma mundial utilizado para crear, analizar, organizar etc, información geográfica; Es la plataforma más utilizada por profesionales, entidades públicas y privadas, estudiantes, entre otros. Con el fin de conocer la información geográfica a nivel mundial reflejada en dicho programa. Dicho programa maneja diferentes componentes como ArcMap, usada para como buscador geográfico y adicional para ingresar datos, ArcCatalog, organiza los metadatos y ArcToolbox se usa para geoprocesamiento. (Santiago, 2005)

Actualmente, está disponible en su versión de escritorio y en su versión web, lo que permite que el proceso sea más interactivo.

5.6.2 Envi

Es un completo paquete de software para la visualización, análisis y despliegue de todo tipo de información geoespacial. ENVI se adapta a los requerimientos específicos para dar respuesta a las necesidades de un trabajo.

ENVI incluye un conjunto integral de herramientas de análisis de datos que se utilizan para extraer información de las imágenes de manera rápida y sencilla. Estas herramientas están expuestas como tareas de procesamiento discretas, así como flujos de trabajo que lo guían a través de los pasos de procesamiento para garantizar una preparación precisa, e incluyen calibración, preprocesamiento, corrección atmosférica, afilado, ortorectificación y correregistro. A partir de ahí, la analítica ENVI se puede utilizar para detectar cambios y anomalías, medir y extraer entidades, modelar entidades topográficas y mucho más. (TELEMATICA, Sin Fecha)

5.7 Teledetección

Se entiende como el conjunto de instrumentos que tiene como finalidad la recolección de información de un objeto a la distancia. Dentro de la teledetección se encuentra la activa y la pasiva, la primera funciona con fuente propia de emisión, como visible, NIR, MIR que son de ondas cortas y Microondas que son de ondas largas. La pasiva no transfieren energía al objeto trabajado, pues su energía depende de la luz natural que rebotan en el objetivo. En otras palabras:

“La Teledetección de recursos naturales se basa en un sistema de adquisición de datos a distancia sobre la biosfera, que está basado en las propiedades de la radiación electromagnética

y en su interacción con los materiales de la superficie terrestre. Todos los elementos de la Naturaleza tienen una respuesta espectral propia que se denomina *signatura espectral*. (...) Su objetivo esencial se centra en la identificación de los materiales de la superficie terrestre y los fenómenos que en ella se operan a través de su *signatura espectral*". (Romero, 2016)

El Programa Landsat, inicialmente llamado ERTS-1 (Earth Resources Technology Satellite), desde 1972 constituye en una serie de misiones de lanzamiento de satelitales para la observación la tierra, ese programa es gestionado en conjunto por la NASA quien administra los satélites y el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS), quien se encarga de comercializar las imágenes captadas por cada sensor. Es considerado el programa más largo en existencia para observar cambios y modificaciones que ocurren en la superficie terrestre a una escala moderada, actualmente la resolución de cada píxel de las imágenes alcanza a cubrir un estadio de Beisbol. (Cabrera, 2011).

Al último lanzamiento de satélite Landsat se le ha denominado Landsat 8 o "Landsat Data Continuity Mission" (LDCM), continúa en funcionamiento el Landsat 7, el Landsat 6 resultó un lanzamiento fallido, el Landsat 5 estuvo en funcionamiento hasta el 11 de noviembre de 2011, y sus predecesores (Landsat 1 a 4) ya no están en uso. Con cada lanzamiento de la misión, los satélites han presentado mejoras en tecnología, mejoras radiométricas, geométricas y espaciales a la vez nuevos sensores han sido incorporados con cada misión ampliando así, el rango de resolución espectral captada.

Las imágenes LANDSAT están compuestas por 7 u 8 bandas espectrales, que fueron elegidas especialmente para el monitoreo de la vegetación, para aplicaciones geológicas y para el estudio de los recursos naturales. Estas bandas pueden combinarse produciendo una gama de imágenes de color que incrementan notablemente sus aplicaciones.

5.7.1 Características de Landsat 7.

El satélite orbita la Tierra a 705 km (438 millas) en una órbita casi polar sincrónica con el sol (98,2 grados de inclinación), da la vuelta a la Tierra cada 99 minutos. Tiene un ciclo de repetición de 16 días con un horario de cruce ecuatorial: 10:00 a.m. (+/- 15 minutos) (USGS, Sin Fecha)

Poseen una resolución espacial de 30 metros al igual que el Landsat 5, posee las mismas bandas del TM con un plus de longitud de onda de 0.5 - 0.90; resolución espacial de 15 metros; la resolución radiométrica de 8 Bits con un origen de datos de emisión para las bandas TM y plus de reflexión. El sensor que tiene a bordo del satélite es el Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) (USGS, Sin Fecha). (ver **Tabla 2**).

Tabla 2. Características de las imágenes Landsat 7.

MODO ESPECTRAL	ESPACIAL (metros)	ESPECTRAL (micras)		RADIOMÉTRICA	TEMPORAL
Pancromática	15	Banda 8. Pancromática	0.52 - 0.90	8 BITS	16 días
Multiespectral	30	Banda 1 azul:	0.45 - 0.52		
		Banda 2 verde:	0.52 - 0.61		
		Banda 3 roja:	0.63 - 0.69		
		Banda 4 Infrarrojo cercano 1	0.78 - 0.90		

MODO ESPECTRAL	ESPACIAL (metros)	ESPECTRAL (micras)		RADIOMÉTRICA	TEMPORAL
		Banda 5. Infrarrojo de onda corta	1.55 -1.75		
		Banda 6. Térmica	10.40 -12.50		
		Banda 7 Infrarrojo Medio	2.08 – 2.35		

Fuente: (USGS, Sin Fecha).

5.7.2 Características de Landsat 9.

El Landsat 9 se lanzó al espacio el 27 de septiembre de 2021. Las imágenes de la "primera luz" llegaron el 31 de octubre. Los instrumentos a bordo del satélite son réplicas mejoradas de los que actualmente recogen datos a bordo del Landsat 8, que ya proporcionan datos radiométrica y geoméricamente superiores a los instrumentos de los satélites Landsat de generaciones anteriores.

El satélite lleva dos instrumentos científicos, el sensor de imágenes terrestres operacional 2 (OLI-2) y el sensor de infrarrojos térmico 2 (TIRS-2). El OLI-2 captura observaciones de la superficie de la Tierra en las bandas visible, infrarroja cercana e infrarroja de onda corta, y el TIRS-2 mide la radiación infrarroja térmica, o calor, emitida desde la superficie de la Tierra. Tanto el OLI como el TIRS tienen una vida útil de 5 años, aunque la nave espacial tiene más de 10 años de consumibles. (USGS, Sin Fecha)

Las mejoras de Landsat 9 incluyen una resolución radiométrica más alta para OLI-2 (cuantificación de 14 bits aumentada de 12 bits para Landsat 8) que permite que los sensores detecten diferencias más sutiles, especialmente en áreas más oscuras como el agua o los bosques densos. Con la resolución radiométrica más alta, Landsat 9 puede diferenciar 16.384

tonos de una longitud de onda determinada. En comparación, Landsat 8 proporciona datos de 12 bits y 4.096 tonos, y Landsat 7 detecta solo 256 tonos con su resolución de 8 bits. Además de la mejora de OLI-2, TIRS-2 ha reducido significativamente la luz difusa en comparación con el sensor infrarrojo térmico Landsat 8 (TIRS), lo que permite una mejor corrección atmosférica y mediciones de temperatura de la superficie más precisas. (USGS, Sin Fecha). (ver **Tabla 3**)

Tabla 3. *Distribución de las bandas en OLI y TIRS en imágenes Landsat 9.*

	ESPECTRAL (micras)		Resolución (metros)
	Landsat 9 Operational Land Imager 2 (OLI-2) and Thermal Infrared Sensor 2 (TIRS- 2)	Banda 1 - Aerosol costero	0.43 - 0.45
Banda 2 - Azul		0.45 - 0.51	30
Banda 3 - Verde		0.53 - 0.59	30
Banda 4 - Rojo		0.64 - 0.67	30
Banda5 – Infrarrojo cercano (NIR)		0.85 - 0.88	30
Banda 6 - SWIR 1		1.57 - 1.65	30
Banda 7 - SWIR 2		2.11 - 2.29	30
Banda 8 - Pancromático		0.50 - 0.68	15
Banda 9 - Cirrus		1.36 - 1.38	30
*Banda 10 – Infrarrojo térmico (TIRS) 1		10.60 - 11.19	100
*Banda 11 - Infrarrojo térmico (TIRS) 2		11.50 - 12.51	100

Fuente: (USGS, Sin Fecha)

5.7.3 Identificación de coberturas en imágenes Landsat.

Los objetos de la tierra emiten diferentes ondas de reflectancia que son captados por las bandas de los satélites, pero no todas las bandas captan los mismos niveles, a la vez, las bandas de las diferentes versiones de los satélites Landsat, no captan las mismas longitudes de onda, el

Landsat 5 y 7 captan longitudes de ondas semejantes y poseen el mismo número de bandas, Landsat 8 posee otros canales que redistribuye sus sensores de captación de longitudes de onda, esto además le permite ofrecer mejor información de la tierra, incluso bajo condiciones de sombras, presencia de nubosidad y factores ambientales que dificultan la diferenciación de los objetos.

5.8 Análisis Multitemporal

Los estudios de análisis multitemporal son estudios espaciales realizados por medio de la comparación de coberturas de imágenes satelitales de diferentes momentos en el tiempo, que permita examinar los cambios en las coberturas que se han clasificado. Este tipo de estudio permite evaluar los cambios, deduciendo la evolución del medio natural, o las repercusiones de la acción humana sobre las coberturas analizadas (Chuvieco, 1990).

Como menciona Correa (2018) en su tesis sobre el Análisis Multitemporal de Coberturas y Usos del Suelo: Transformaciones Ambientales a Través del Tiempo en Armenia, Quindío, un análisis multitemporal tiene muchas aplicaciones en el estudio de los Recursos Naturales, una de las cuales es la detección de los cambios que sufren las diferentes coberturas vegetales por la intervención del hombre en una determinada área, permitiendo así un monitoreo continuo sobre áreas de interés y la interpretación de los posibles conflictos en el uso del suelo.

5.9 Evaluación de la Exactitud Temática

El análisis Kappa es una técnica multivariada discreta utilizada en la evaluación de la precisión. determinar estadísticamente si una matriz de error es significativamente diferente de otra. (Congalton & Russell, 1957)

La precisión de un proceso de clasificación se refiere al grado de concordancia entre las clases de la imagen o capa clasificada y una capa de referencia. Estas evaluaciones pueden ser dadas por matrices de confusión y el coeficiente Kappa (Cohen, 1960). Cuando se utilizan varios métodos de clasificación, las matrices de confusión resultantes se suelen comparar para analizar las diferencias en significancia (Plourde y Congalton, 2003). El coeficiente Kappa se puede describir matemáticamente

El índice kappa trata de eliminar el efecto que los píxeles correctamente clasificados por azar tienen sobre el porcentaje de píxeles correctamente clasificados, de manera que una clasificación aleatoria tendría, en principio, un índice kappa igual a cero. (Del Toro Espin, Gomariz-Castillo, Cánovas-García, & Alonso-Sarría, 2015)

El coeficiente kappa (k) toma valores entre -1 y +1; mientras más cercano a +1, mayor es el grado de concordancia inter-observador. Por el contrario, un valor de $K = 0$ refleja que la concordancia observada es precisamente la que se espera a causa exclusivamente del azar. El cual se define como:

$$K = (P_o - P_e) / (1 - P_e)$$

Siendo:

Po = Número de aciertos/ Número total de clases

Pe = Cálculo generado desde la matriz de confusión.

Siendo: Po = Número de aciertos/Número total de clases, $Po = (A1 + B2 + C3) / M$, Pe = Cálculo generado desde la matriz de confusión, $Pe = (EP1 \times EU1) + (EP2 \times EU2) + (EP3 \times EU3)$ (Llactayo, Salcedo, & Victoria, 2014) De acuerdo con la escala de valoración del índice Kappa descrita por Landis y Koch (1977), los grados de acuerdo son los presentados en la **Tabla 4**:

Tabla 4. *Clasificación del índice de Kappa*

RANGO	CLASIFICACION
$K < 0.00$	es sin acuerdo
$0.00 = < K = < 0.20$	es insignificante
$0.20 = < K = < 0.40$	es mediano
$0.40 = < K = < 0.60$	es moderado
$0.60 = < K = < 0.80$	es sustancial
$0.80 = < K = < 1.00$	es casi perfecto

Fuente: (Rojas & Medina, 2020)

6. METODOLOGÍA

6.1 Enfoque Metodológico

La presente investigación que busca determinar cambios en las coberturas en los ecosistemas estratégicos de la cuenca del río Bermellón tendrá un enfoque metodológico cuantitativo. Este se basa en la recolección sistemática y el análisis de información disponible sobre los tipos de cobertura presentes en la zona, y datos numéricos para medir dichos cambios, con el propósito identificar las áreas afectadas por las actividades antrópicas, como el crecimiento poblacional, la ampliación de la frontera agrícola, entre otros y como ha afectado la calidad ecológica que brinda la cuenca hidrográfica a la población circundante.

6.2 Tipo de Estudio

Para esta investigación el tipo de estudio es descriptivo y explicativo este se enfoca en describir características de una muestra y considera las relaciones causales de las variables. Estos enfoques permitirán obtener información de posibles cambios de las coberturas mediante imágenes satelitales de la cuenca del Río Bermellón, lo cual puede servir como punto de partida para futuras investigaciones.

6.3 Procedimiento

La presente metodología para la determinación de los cambios de las coberturas en el ecosistema estratégico de la cuenca del Río Bermellón se desarrolló en distintas etapas, que se describirán a continuación:

6.3.1 Fase 1. Identificación y clasificación de coberturas de la cuenca del Rio Bermellón.

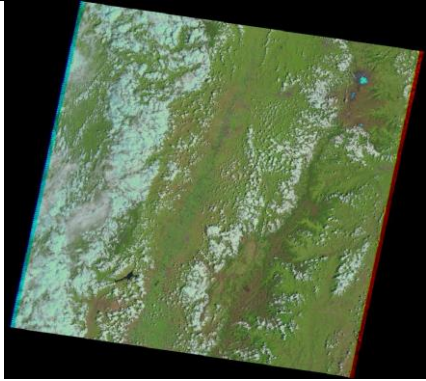
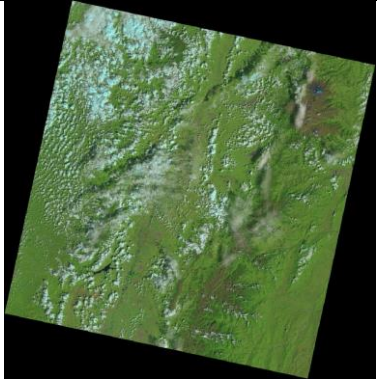
- **Actividad 1. Recopilación de Datos**

La literatura científica revela que la detección visual de cambios por medio de fotografía aérea casi siempre produciría resultados más exactos, sin embargo, es difícil de reproducir por los costes de adquisición de datos, por lo tanto, la detección digital puede realizar esta tarea, incorporando más características de las partes no ópticas del espectro electromagnético (Coppin, Jonckheere, Nackaerts, & Muys, 2004).

Como se mencionó anteriormente las imágenes satelitales son una gran herramienta al momento de realizar este tipo de proyectos, por tal razón, se utilizó imágenes Landsat 7 (ETM12), del 14 de octubre de 2002 y Landsat 9 (OIL & TIRS), del 25 de enero de 2023, ubicadas mediante Path y Row 09-57; Ambas imágenes se encontraban en nivel II a una escala de 1:100.000 y fueron descargadas de forma gratuita, directamente del portal Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS).

Las imágenes se seleccionaron buscando un menor porcentaje de cubrimiento de nubes y homogenización en su localización dentro de los años de toma, aspectos que inciden en el análisis de los cambios de las coberturas forestales dentro de los ecosistemas estratégicos, se realizó el debido ajuste geométrico para cada una de las imágenes quedando así reproyectadas al Sistema de Coordenadas Proyectadas con Magna Colombia Bogotá (código 3116). (ver **Tabla 5**)

Tabla 5 *Imágenes Seleccionadas.*

2002	2023
 <p data-bbox="251 741 747 772">LE07_L2SP_009057_20021014_20200916_02_T1</p>	 <p data-bbox="873 741 1369 772">LC09_L2SP_009057_20230125_20230309_02_T1</p>

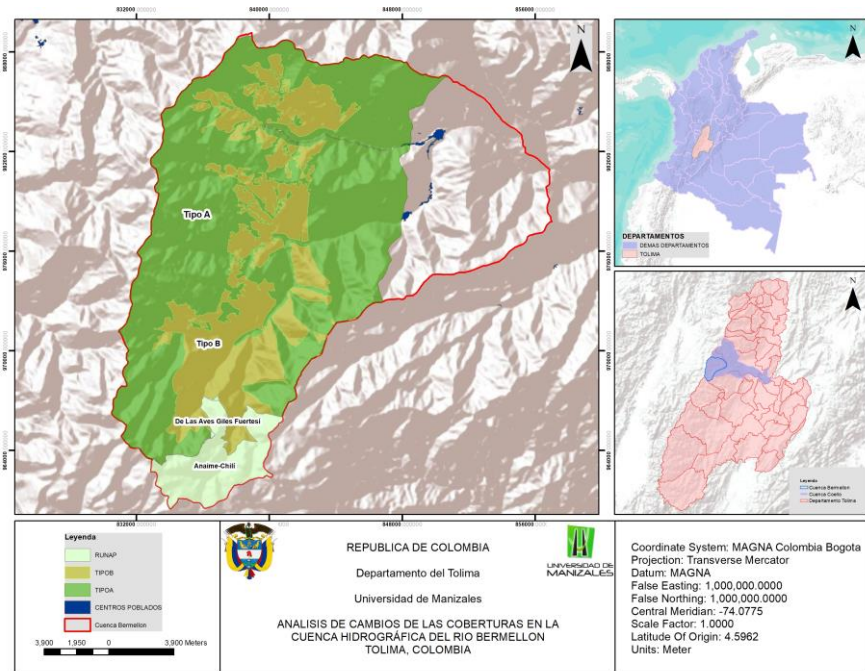
Fuente: earthexplorer.usgs.gov

Una vez seleccionadas las imágenes, se realizó una recopilación de información oficial de Corporación Regional Autónoma del Tolima – CORTOLIMA, con la que se elaboró el Plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica mayor del río Coello (CORTOLIMA, 2018), donde se identificaron límites de la cuenca, municipios adyacentes, además, se identificaron las áreas de importancia ambiental de acuerdo con la información del Registro Único Nacional de Áreas Protegidas (RUNAP), información de los Sistema de Información Regional de Áreas Protegidas (SIRAP) y Reservas forestales establecidas por la Ley 2ª de 1959 donde se encuentran áreas del Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SINAP) y territorios colectivos; mediante Resolución No. 1922 del 27 de Diciembre de 2013, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible –MADS-, adoptó la Zonificación y Ordenamiento de la “Reserva Forestal Central”; en donde en el área de la cuenca del río Bermellón se presentan 2 tipos de reservas forestales, las de tipo A que son “zonas que garantizan el mantenimiento de los procesos ecológicos básicos necesarios para asegurar la oferta de servicios ecosistémicos y el soporte a la diversidad biológica” y de tipo B estas zonas se “caracterizan por tener coberturas

favorables para un manejo sostenible del recurso forestal mediante un enfoque de ordenación forestal integral y la gestión integral de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos”, estas zonas cuentan con lineamientos particulares teniendo en cuenta algunas características propias como ubicación, pendiente, suelos forestales y su correlación con los procesos agropecuarios que surgen en estas áreas y que son de vital importancia para la economía del país.

La información se obtuvo en formato shape file, al igual que el correspondiente acto administrativo que declara las áreas como protegidas. Mediante la integración conjunta de la información de áreas protegidas y cartografía básica a escala 1:25.000, se delimita zonas de mayor importancia ambiental de la cuenca mayor (cuenca del Río Coello) y posteriormente realizar el recorte a la cuenca del río Bermellón (ver **Figura 3**).

Figura 3. Ubicación de la cuenca del Río Bermellón, y áreas de importancia ambiental.



Fuente: (Propia, 2024)

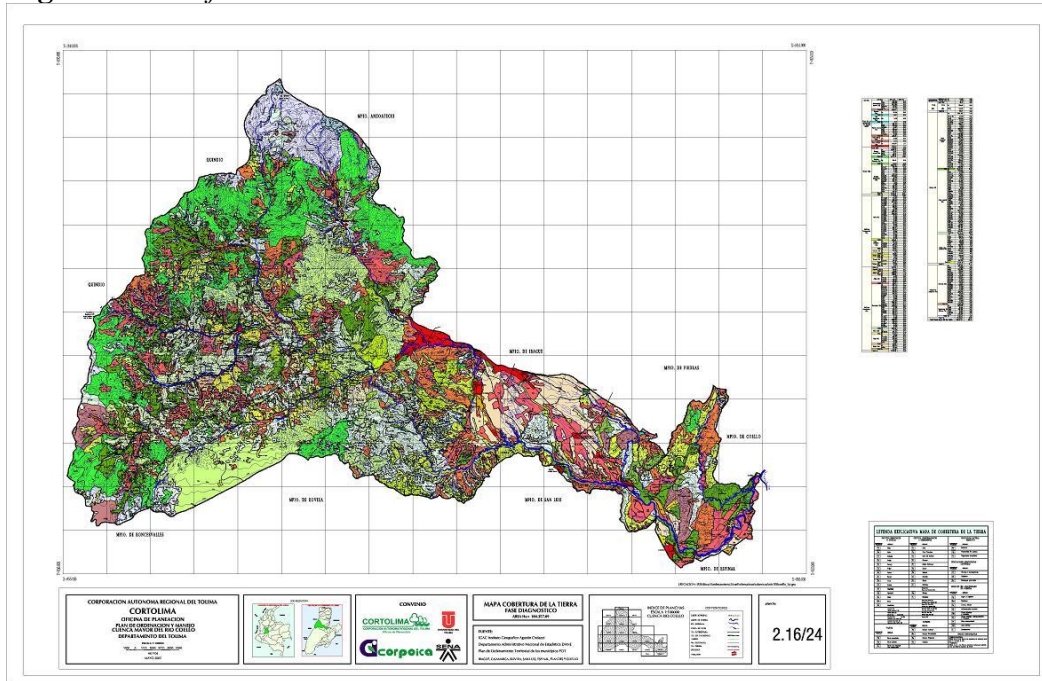
Después, para lograr un análisis multitemporal exitoso, teniendo en cuenta que para esta investigación no se cuenta con información primaria o trabajo en campo, se consideró identificar posibles coberturas que estén presentes en el área de estudio, realizado revisión de información secundaria, tales como, el POMCA de la Cuenca Mayor del Río Coello (2018) (ver **Figura 4**), esto brindo información de las posibles cobertura, las cuales se encuentran bajo la metodología de Corine Land Cover (2018) ajustada para Colombia (**Tabla 6**).

Tabla 6 Coberturas de la cuenca del río Bermellón de acuerdo con el POMCA.

1. TERRITORIOS ARTIFICIALIZADOS	1.1. Zonas urbanizadas	1.1.1. Tejido urbano continuo
		1.1.2. Tejido urbano discontinuo
2. TERRITORIOS AGRÍCOLAS	2.3. Pastos	2.3.1. Pastos limpios
		2.3.2. Pastos arbolados
		2.3.3. Pastos enmalezados
	2.4. Áreas agrícolas heterogéneas	2.4.1. Mosaico de cultivos
		2.4.2. Mosaico de pastos y cultivos
		2.4.3. Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales
		2.4.4. Mosaico de pastos con espacios naturales
	3. BOSQUES Y ÁREAS SEMINATURALES	3.1.1. Bosque denso
3.1.2. Bosque abierto		3.1.2.1.1. Bosque abierto alto de tierra firme
3.1.3. Bosque fragmentado		---
3.2. Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva		3.2.2.1. Arbustal denso
		3.2.2.2. Arbustal abierto
3.1.4. Bosque de galería y ripario		---
3.2. Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva		3.2.1.1. Herbazal denso
3.2.3. Vegetación secundaria o en transición	3.2.3.1 Vegetación secundaria alta	

Fuente: adaptada del POMCA Río Coello CORTOLIMA, 2018

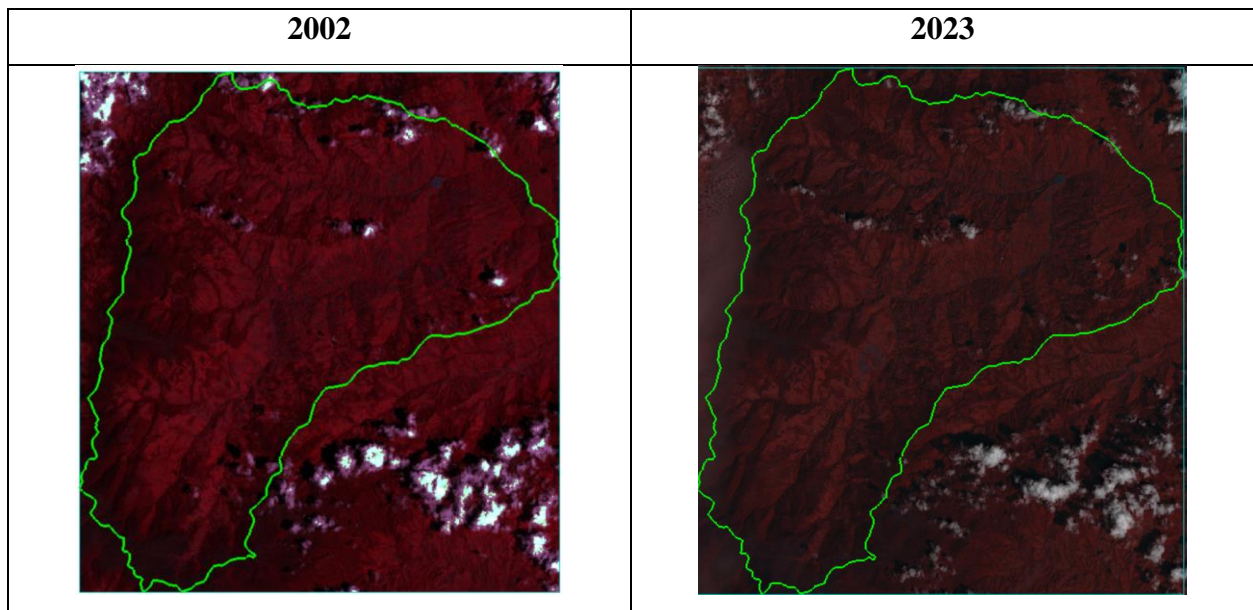
Figura 4. Clasificación de coberturas del Río Coello de acuerdo con el POMCA.



Fuente: POMCA Río Coello CORTOLIMA, 2018

- **Actividad 2. Interpretación de imágenes satelitales.**

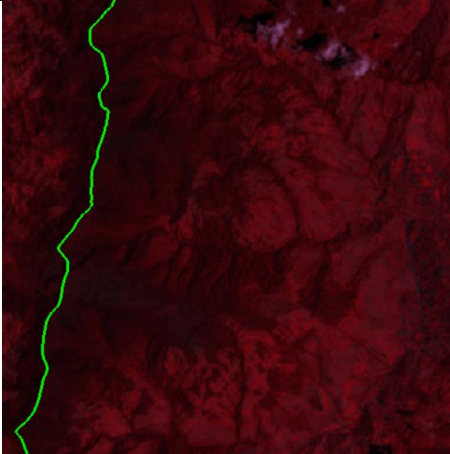

Tabla 7. Combinaciones de banda en imagen satelital

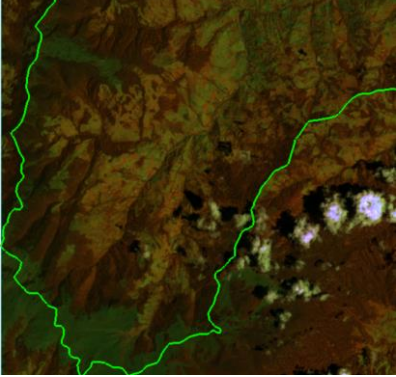
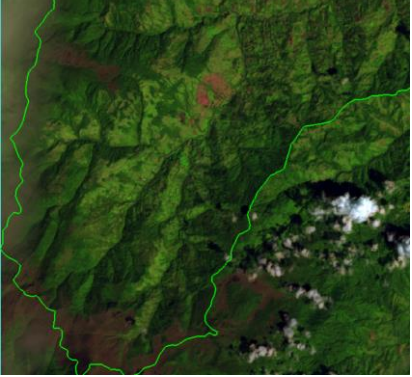




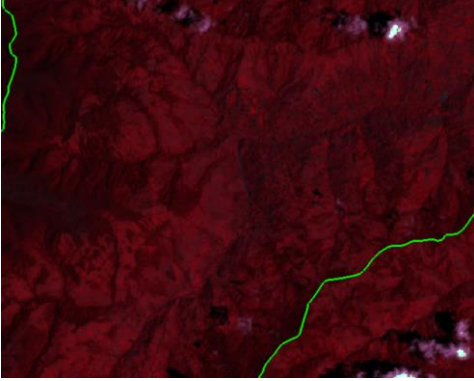

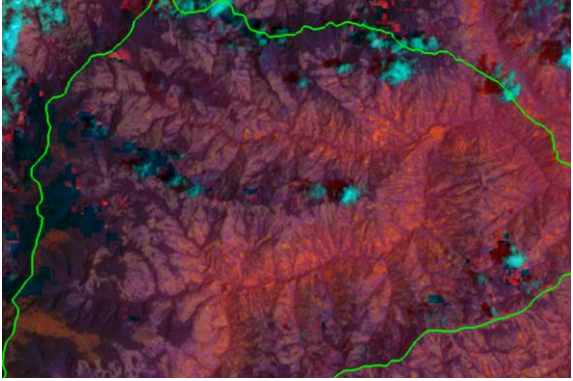

Fuente: Propia (2024)


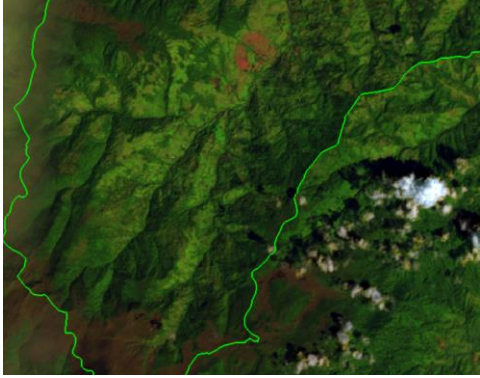
“Una composición satelital es una imagen compuesta por la combinación de tres bandas diferentes del sensor y dispuestas cada una en los tres canales de proyección en pantalla Rojo, Verde y Azul”, (Franco, 2017). En esta etapa se realizó una interpretación de imágenes satelitales con ayuda de combinaciones de bandas que se ajustaban al estudio (ver **Tabla 7**), y a la imagen satelital seleccionada, esto debido a los diferentes sensores que cuenta cada plataforma satelital, en la **Tabla 8**, se puede observar las diferentes combinaciones que se realizaron para cada una de las coberturas analizadas

Tabla 8 *Análisis visual y combinaciones de banda RGB*

2002 LANDSAT 7	2023 LANDSAT 9
4.3.2	5.4.3 BOSQUES
	
<p>Esta es una combinación clásica para observar vegetación, especialmente bosques. Los árboles saludables reflejan fuertemente en la banda del infrarrojo cercano (banda45) y se muestran en tonos rojos brillantes, mientras que las áreas con vegetación menos densa o en estrés se verán en tonos más apagados. Esta combinación es útil para identificar la densidad y la salud general de los bosques.</p>	<p>Esta es una combinación clásica para observar vegetación, especialmente bosques. Los árboles saludables reflejan fuertemente en la banda del infrarrojo cercano (banda 5) y se muestran en tonos rojos brillantes, mientras que las áreas con vegetación menos densa o en estrés se verán en tonos más apagados. Esta combinación es útil para identificar la densidad y la salud general de los bosques.</p>

5.4.3 PARAMO	6.5.4 PARAMO
	
<p>Esta combinación permite una mayor diferenciación de la humedad del suelo y la vegetación. Las bandas del infrarrojo medio (banda 5) y cercano (banda 4) son sensibles al contenido de humedad de la vegetación y el suelo, lo que ayuda a detectar el estrés hídrico o áreas afectadas por la sequía. Los páramos saludables aparecerán en tonos brillantes de verde o rojo, mientras que los afectados por la falta de agua serán más oscuros o marrones.</p>	<p>Esta combinación permite una mayor diferenciación de la humedad del suelo y la vegetación. Las bandas del infrarrojo medio (banda 6) y cercano (banda 5) son sensibles al contenido de humedad de la vegetación y el suelo, lo que ayuda a detectar el estrés hídrico o áreas afectadas por la sequía. Los páramos saludables aparecerán en tonos brillantes de verde o rojo, mientras que los afectados por la falta de agua serán más oscuros o marrones.</p>
5.4.3 ÁREAS URBANAS	6.5.4 ÁREAS URBANAS
	
<p>Esta combinación es útil para identificar áreas urbanas porque las zonas construidas suelen aparecer en tonos de cian, mientras que la vegetación aparece en tonos de verde brillante.</p>	<p>Esta combinación es ideal para observar áreas urbanas porque resalta las superficies construidas en tonos de cian o blanco, mientras que la vegetación se muestra en tonos de verde brillante. Los cuerpos de agua se visualizan en tonos oscuros, facilitando la diferenciación entre zonas urbanas y naturales.</p>

4.3.2 RIOS	6.5.4 RIOS
	
<p>Esta es una combinación clásica para identificar cuerpos de agua. Los ríos y lagos aparecen en tonos oscuros (negro o azul oscuro) porque el agua absorbe la mayor parte de la radiación en las bandas del infrarrojo cercano y el rojo. Esta combinación también es útil para distinguir entre agua y vegetación, ya que la vegetación aparece en tonos de rojo.</p>	<p>Esta combinación resalta cuerpos de agua en tonos oscuros, ya que el agua refleja muy poca luz en las bandas del infrarrojo medio y cercano. Es útil para diferenciar ríos de otras características del terreno, como la vegetación o las superficies construidas.</p>
6.5.4 CULTIVOS	6.5.2 CULTIVOS
	
<p>Esta combinación utiliza la banda térmica (banda 6) para observar la temperatura de la superficie, que puede correlacionarse con el estrés hídrico en los cultivos. Las bandas 5 y 4 ayudan a distinguir las diferencias en la vegetación en función de la humedad y la estructura celular. Los cultivos estresados térmicamente pueden aparecer en tonos diferentes a los cultivos saludables.</p>	<p>Esta combinación permite detectar áreas de cultivos y evaluar su salud. Las bandas del infrarrojo medio y cercano son sensibles a la humedad y la estructura celular de la vegetación, ayudando a distinguir entre vegetación sana y estresada. Los cultivos sanos aparecen en tonos brillantes de verde o amarillo, mientras que las áreas afectadas o menos saludables son de tonos más oscuros.</p>

4.3.2 PASTOS	6.5.2 PASTOS
	
<p>Esta combinación permite una evaluación más detallada de los pastos. Las bandas del infrarrojo medio y cercano son sensibles a la humedad y la estructura celular de la vegetación, lo que ayuda a diferenciar los pastos saludables de los que están estresados. Los pastos sanos aparecerán en tonos verdes o amarillos brillantes, mientras que los pastos secos o estresados serán más oscuros.</p>	<p>Esta combinación permite una evaluación más detallada de los pastos. Las bandas del infrarrojo medio y cercano son sensibles a la humedad y la estructura celular de la vegetación, lo que ayuda a diferenciar los pastos saludables de los que están estresados. Los pastos sanos aparecerán en tonos verdes o amarillos brillantes, mientras que los pastos secos o estresados serán más oscuros.</p>

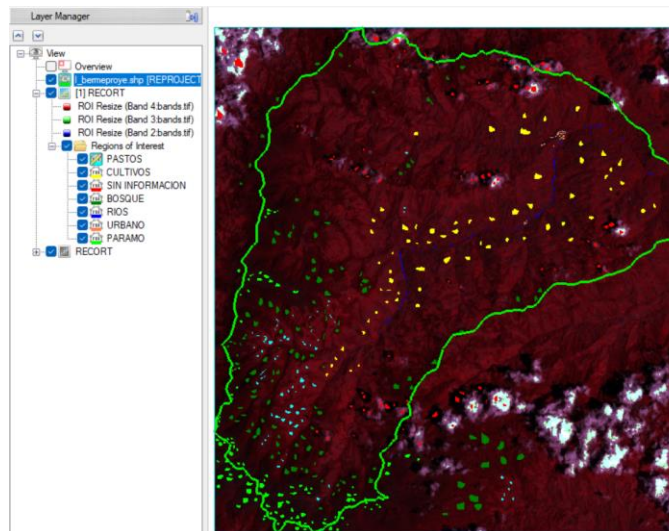
Fuente: (Propia, 2024)

- **Actividad 3. Clasificación supervisada.**

“La clasificación supervisada es la técnica más utilizada para el análisis cuantitativo de datos de imágenes de teledetección. En esencia, está el concepto de segmentar el dominio espectral en regiones que pueden asociarse con las clases de cobertura del suelo de interés para una aplicación particular.” (Richards, 2012). Para el proceso de clasificación supervisada se ha utilizado la herramienta ENVI, principalmente se redefinieron las clases teniendo en cuenta la revisión visual y la leyenda Corine Land Cover (2018) ajustada para Colombia, esto para mejorar la identificación espectral, agrupando las superficies en siete clases: áreas urbanas, pastos limpios, mosaico de pastos y cultivos, bosque, herbazal (paramos), ríos y áreas sin información que corresponde a áreas con nubes y sobras de nubes.

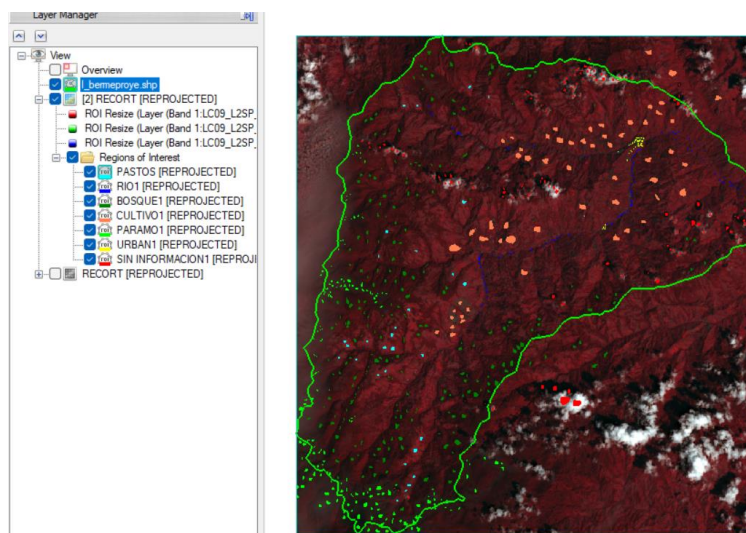
Se realizó un entrenamiento aleatorio estratificado seleccionando un promedio de 135 áreas de entrenamiento, el número mínimo fue 80 áreas de entrenamiento en la cobertura de zonas artificializadas. Tal y como se observa en las **Figura 5** y **Figura 6**, correspondiente a los años 2002 y 2023 respectivamente.

Figura 5. *Áreas de entrenamiento 2002*



Fuente: (Propia, 2024).

Figura 6. *Áreas de entrenamiento 2023*



Fuente: (Propia, 2024)

Hay una variedad de algoritmos disponibles para realizar clasificaciones supervisadas, en esta investigación, las imágenes se procesaron con un clasificador conocido como Clasificación de Máxima Verosimilitud (Maximum Likelihood Classification), este se considera uno de los procesos de discriminación más precisos y eficientes en percepción remota (con imágenes satelitales) este clasificador asume que los datos siguen distribuciones normales multivariadas y clasifica los píxeles asignándolos a la clase con mayor probabilidad, minimiza el cálculo ciertas métricas para determinar la mejor asignación a cada píxel. Esto se realizó tanto para la clasificación del año 2002 (Ver **Figura 7**), como para la clasificación del año 2023 (Ver **Figura 8**).

Una vez preparadas las áreas de entrenamiento, se realizó una evaluación estadística de las áreas de entrenamiento, generando un reporte de separabilidad entre cada clase, el cálculo de separabilidad, Según Richards & Jia (2006), es necesario que previamente a la clasificación se tenga una idea de la similitud entre las clases escogidas. Si todas las clases tienen una alta separabilidad entre ellas, lo lógico es que el clasificador funcione correctamente, de lo contrario, los autores proponen eliminar una de ellas o agruparlas. (Quirós, 2009)

Figura 7. Separabilidad de los ROI 2002

```

Pair Separation (least to most):
CULTIVOS and PASTOS - 1.51781476
RIOS and CULTIVOS - 1.82268995
RIOS and BOSQUE - 1.87524676
BOSQUE and CULTIVOS - 1.91855950
BOSQUE and PASTOS - 1.96097092
URBANO and RIOS - 1.96872931
PARAMO and CULTIVOS - 1.97344345
PARAMO and PASTOS - 1.98129661
RIOS and PASTOS - 1.98491771
URBANO and CULTIVOS - 1.99565092
PARAMO and BOSQUE - 1.99795947
URBANO and SIN INFORMACION - 1.99858320
SIN INFORMACION and CULTIVOS - 1.99892549
BOSQUE and SIN INFORMACION - 1.99914755
RIOS and SIN INFORMACION - 1.99919778
PARAMO and RIOS - 1.99939521
PARAMO and SIN INFORMACION - 1.99952219
SIN INFORMACION and PASTOS - 1.99970140
PARAMO and URBANO - 1.99970987
URBANO and BOSQUE - 1.99989282
URBANO and PASTOS - 1.99998028

```

Fuente: Propia, 2024.

Figura 8. Separabilidad de los ROI 2023

```

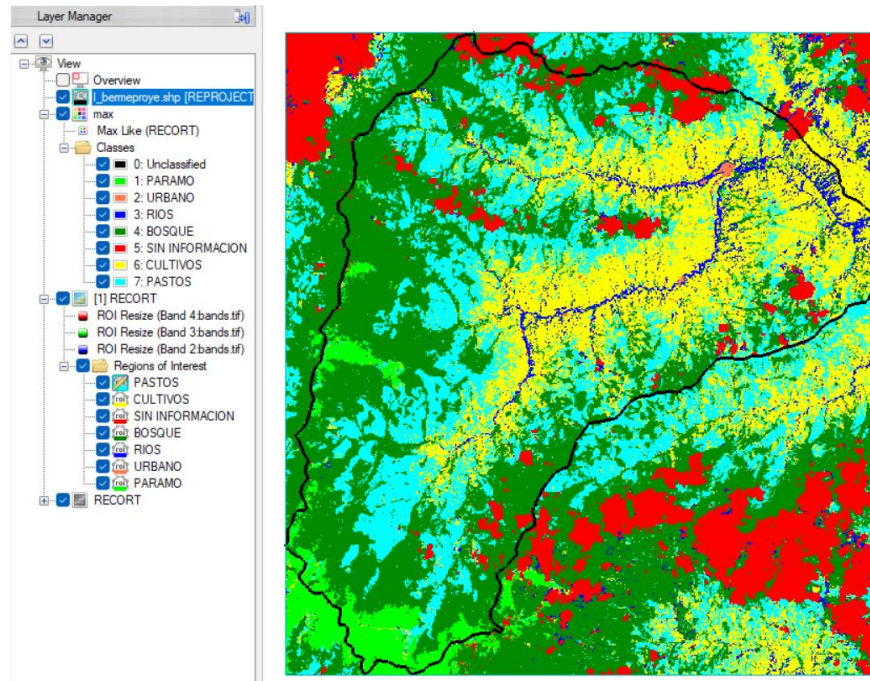
Pair Separation (least to most):
CULTIVO1 and RIO1 - 1.81695056
CULTIVO1 and PASTOS - 1.84112631
SIN INFORMACION1 and RIO1 - 1.95855395
BOSQUE1 and RIO1 - 1.96326096
CULTIVO1 and BOSQUE1 - 1.97161630
PARAMO1 and CULTIVO1 - 1.97547702
SIN INFORMACION1 and URBAN1 - 1.98351730
URBAN1 and RIO1 - 1.98733603
BOSQUE1 and PASTOS - 1.99215508
PARAMO1 and RIO1 - 1.99334878
SIN INFORMACION1 and PARAMO1 - 1.99488654
SIN INFORMACION1 and BOSQUE1 - 1.99619597
SIN INFORMACION1 and CULTIVO1 - 1.99688700
PARAMO1 and PASTOS - 1.99697372
RIO1 and PASTOS - 1.99715277
PARAMO1 and BOSQUE1 - 1.99804746
URBAN1 and PARAMO1 - 1.99895122
URBAN1 and CULTIVO1 - 1.99918929
SIN INFORMACION1 and PASTOS - 1.99994464
URBAN1 and BOSQUE1 - 1.99999387
URBAN1 and PASTOS - 1.99999986

```

Fuente: Propia, 2024.

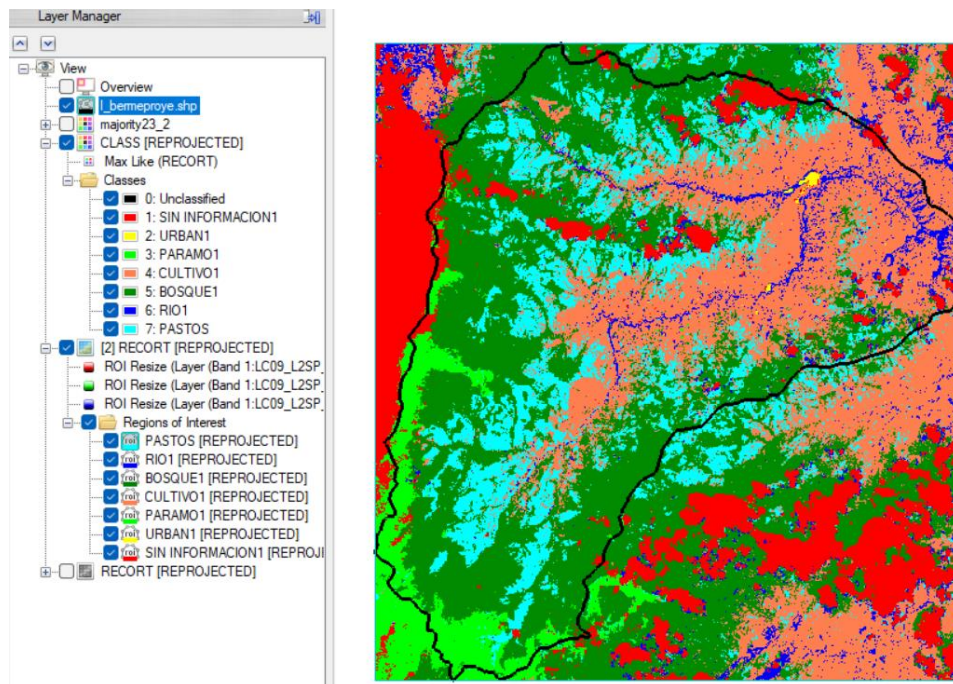
De esta manera al revisar la separabilidad de las coberturas entrenadas, se procede a clasificar de manera supervisada para los años 2002 (ver **Figura 9**) y 2023 (ver **Figura 10**), de las imágenes satelitales del área de interés.

Figura 9. *Clasificación Supervisada 2002.*



Fuente: Propia, 2024.

Figura 10. *Clasificación Supervisada 2003.*

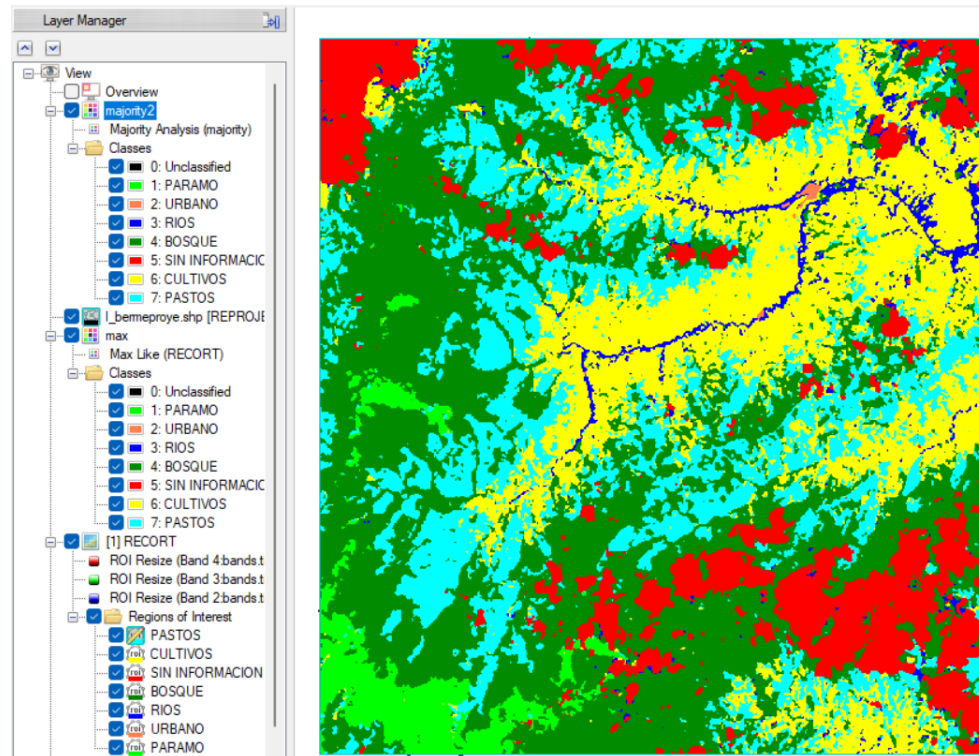


Fuente: Propia, 2024.

Filtro Majority

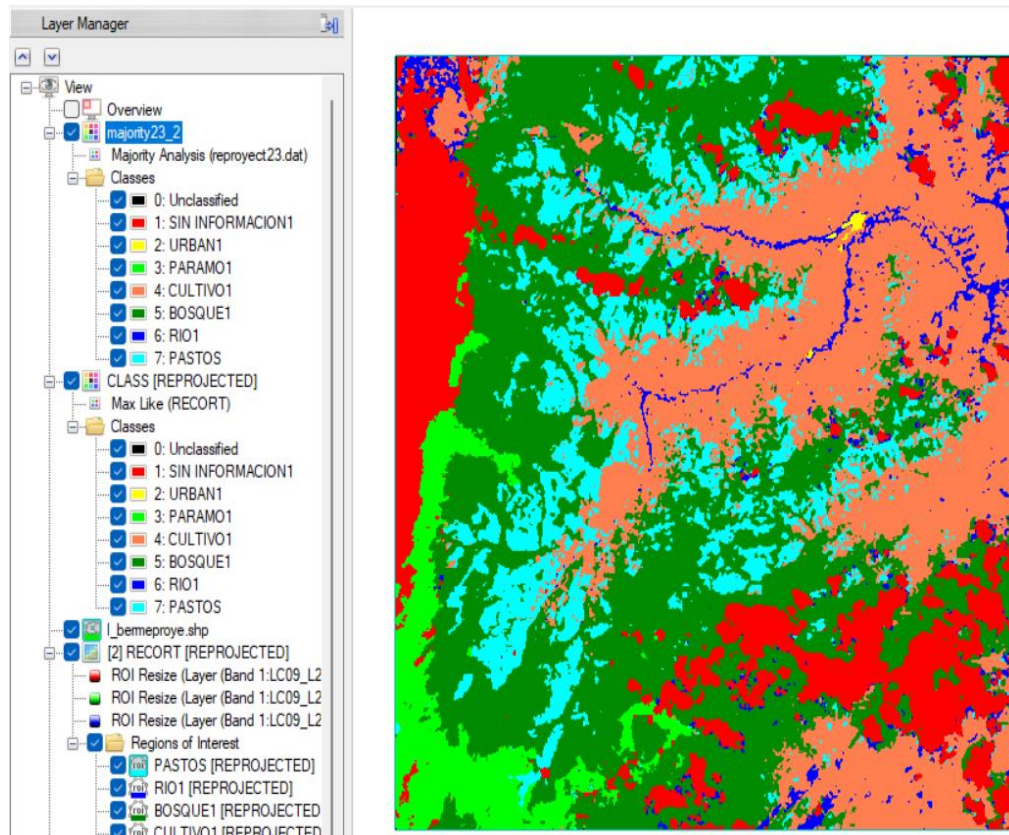
Se utilizó una técnica estadística de análisis espacial que permite resumir y analizar datos espaciales, **Majority** identifica el valor más frecuente dentro de una zona o celda ráster, determinando cuáles son las características dominantes en un área geográfica, permitiendo extraer conclusiones precisas y eliminando el llamado “Sal pimienta”. Este procedimiento se realiza tanto para las clasificaciones de los años 2002 (ver **Figura 11**) y 2023 (ver **Figura 12**)

Figura 11. *Majority 2002.*



Fuente: Propia, 2024

Figura 12. *Majority 2023.*



Fuente: Propia, 2024

- **Actividad 4. Evaluación de la exactitud temática de la clasificación.**

Los resultados de una clasificación digital o de una interpretación visual, debe ser verificada en cuanto a su calidad, con el ánimo de comprobar su validez bien sea del producto o del método empleado (Chuvieco, 2010). La estimación de la exactitud lograda en los resultados de una interpretación puede llevarse a cabo de diferentes maneras, con la matriz de confusión, los índices Kappa, el producer's/user's accuracy (evaluación de precisión, exactitud global y exactitud del usuario o productor. Para esta investigación los productos del procesamiento se validaron con la matriz de confusión y el criterio de índice Kappa, donde se

obtuvo un coeficiente de 0,864 para el año 2002 (ver **Figura 13**) y 0,904 para el año 2003 (ver **Figura 14**), de acuerdo con la escala de valoración el resultado es casi perfecto según la clasificación de Rojas y Medina, 2020.

Figura 13. Matriz de confusión e Índice Kappa 2002

Class Confusion Matrix

File

Confusion Matrix: C:\Users\laura\OneDrive\Documents\ESPECIALIZACION\TESIS\CLASS\2002\new7\majority2

Overall Accuracy = (15158/16892) 89.7348%

Kappa Coefficient = 0.8640

Class	Ground Truth (Pixels)				
	PARAMO	URBANO	RIOS	BOSQUESIN	INFORMACI
Unclassified	0	0	0	0	0
PARAMO	3014	0	0	0	0
URBANO	0	166	0	0	0
RIOS	0	1	503	0	18
BOSQUE	6	0	2	6169	1085
SIN INFORMACI	4	0	0	31	1622
CULTIVOS	0	0	23	40	5
PASTOS	4	0	0	91	0
Total	3028	167	536	6331	2730

Class	Ground Truth (Pixels)		Total
	CULTIVOS	PASTOS	
Unclassified	0	0	0
PARAMO	17	0	3031
URBANO	0	0	174
RIOS	42	0	564
BOSQUE	46	12	7320
SIN INFORMACI	0	0	1657
CULTIVOS	2586	18	2672
PASTOS	281	1098	1474
Total	2972	1128	16892

Class	Ground Truth (Percent)				
	PARAMO	URBANO	RIOS	BOSQUESIN	INFORMACI
Unclassified	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PARAMO	99.54	0.00	0.00	0.00	0.00
URBANO	0.00	99.40	1.49	0.00	0.00
RIOS	0.00	0.60	93.84	0.00	0.66
BOSQUE	0.20	0.00	0.37	97.44	29.74
SIN INFORMACI	0.13	0.00	0.00	0.49	59.41
CULTIVOS	0.00	0.00	4.29	0.63	0.18
PASTOS	0.13	0.00	0.00	1.44	0.00
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Class	Ground Truth (Percent)		Total
	CULTIVOS	PASTOS	
Unclassified	0.00	0.00	0.00
PARAMO	0.57	0.00	17.94
URBANO	0.00	0.00	1.03
RIOS	1.41	0.00	3.34
BOSQUE	1.56	1.06	43.33
SIN INFORMACI	0.00	0.00	9.81
CULTIVOS	87.01	1.60	15.82
PASTOS	9.46	87.34	8.73
Total	100.00	100.00	100.00

Fuente: (Propia, 2024)

Figura 14. Matriz de confusión e Índice Kappa 2003.

Class Confusion Matrix

File

Confusion Matrix: C:\Users\laura\OneDrive\Documents\ESPECIALIZACION\TESIS\CLASS\2003\majority23_2

Overall Accuracy = (14786/15970) 92.6487%

Kappa Coefficient = 0.9042

Class	Ground Truth (Pixels)				
	SIN INFORMACI	URBAN1	PARAMO1	CULTIVO1	BOSQUE1
Unclassified	0	0	0	0	0
SIN INFORMACI	1835	1	60	1	17
URBAN1	0	178	0	0	0
PARAMO1	2	0	2617	0	68
CULTIVO1	107	3	0	4226	47
BOSQUE1	467	0	4	5	4855
RIOS	97	0	0	3	0
PASTOS	4	0	20	78	27
Total	2512	182	2701	4313	5014

Class	Ground Truth (Pixels)		Total
	RIOS	PASTOS	
Unclassified	0	0	0
SIN INFORMACI	3	0	1917
URBAN1	0	0	178
PARAMO1	0	0	2687
CULTIVO1	120	21	4524
BOSQUE1	19	0	5350
RIOS	468	0	568
PASTOS	0	617	746
Total	610	638	15970

Class	Ground Truth (Percent)				
	SIN INFORMACI	URBAN1	PARAMO1	CULTIVO1	BOSQUE1
Unclassified	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SIN INFORMACI	73.05	0.55	2.22	0.02	0.34
URBAN1	0.00	97.80	0.00	0.00	0.00
PARAMO1	0.00	0.00	96.89	0.00	1.36
CULTIVO1	4.26	1.65	0.00	97.98	0.94
BOSQUE1	18.59	0.00	0.15	0.12	96.63
RIOS	3.86	0.00	0.00	0.07	0.00
PASTOS	0.16	0.00	0.74	1.61	0.54
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Class	Ground Truth (Percent)		Total
	RIOS	PASTOS	
Unclassified	0.00	0.00	0.00
SIN INFORMACI	0.49	0.00	12.00
URBAN1	0.00	0.00	1.11
PARAMO1	0.00	0.00	16.83
CULTIVO1	19.67	3.29	28.33
BOSQUE1	3.15	0.00	33.50
RIOS	76.72	0.00	3.56
PASTOS	0.00	96.71	4.67
Total	100.00	100.00	100.00

Fuente: (Propia, 2024)

6.3.2 Fase 2. Determinar la tasa de cambio.

- **Actividad 1.** Calcular áreas. Con ayuda de la herramienta ArcGIS se vectorizaron las imágenes para obtener polígonos y calcular las diferentes áreas y así, determinar cambios en la cobertura del ecosistema, el inventario en área es una herramienta de clasificación digital que permite determinar clases predominantes en la imagen y realizar comparaciones con las coberturas identificadas con ayuda de revisión secundaria.

Se calculó para cada período el porcentaje con respecto a la superficie total de la cuenca de las áreas en cada una de las transiciones, y luego estas se representaron espacialmente.

6.3.3 Fase 3. Análisis de coberturas.

Para esta fase, con información secundaria y los datos procesados se debe realizar el análisis de cobertura. Este paso implica evaluar qué proporción del área de interés está cubierta por diferentes características o elementos, como infraestructura, servicios, o vegetación. Los resultados deben ser interpretados en el contexto del área de interés. Esto implica identificar patrones, tendencias, y áreas que requieren atención adicional. La interpretación de los resultados ayuda a comprender la situación actual y a tomar decisiones informadas.

Previamente, es necesario entender el contexto municipal y de la cuenca hidrográfica del río Bermellón. Y así mismo poder analizar los resultados para identificar patrones y tendencias en las coberturas identificadas para el área de estudio. Las coberturas obtenidas deben ser

analizadas, además de lo obtenido por los procesos de clasificación, con las normativas o estándares tanto locales, nacionales como internacionales.

Es necesario identificar cuáles han sido las posibles razones de las pérdidas o ganancias de ciertas coberturas, y como estos cambios afectan a los usuarios o a la comunidad circundante al área de interés. Y así poder destacar las posibles áreas críticas que requieren atención por parte de las entidades pertinentes.

6.3.4 Fase 4. Productos cartográficos

Se diseñó mapas temáticos a partir de la imagen clasificada, generando salidas cartográficas centrados en la distribución y características de las coberturas de la zona. Además, se crea un StoryMap que permite visualizar la evolución de los datos a lo largo del tiempo de manera interactiva y clara, combinando información del territorio, mapas e imágenes. Esto facilitará la comprensión de los patrones espaciales y temporales, ofreciendo una experiencia más atractiva e intuitiva.

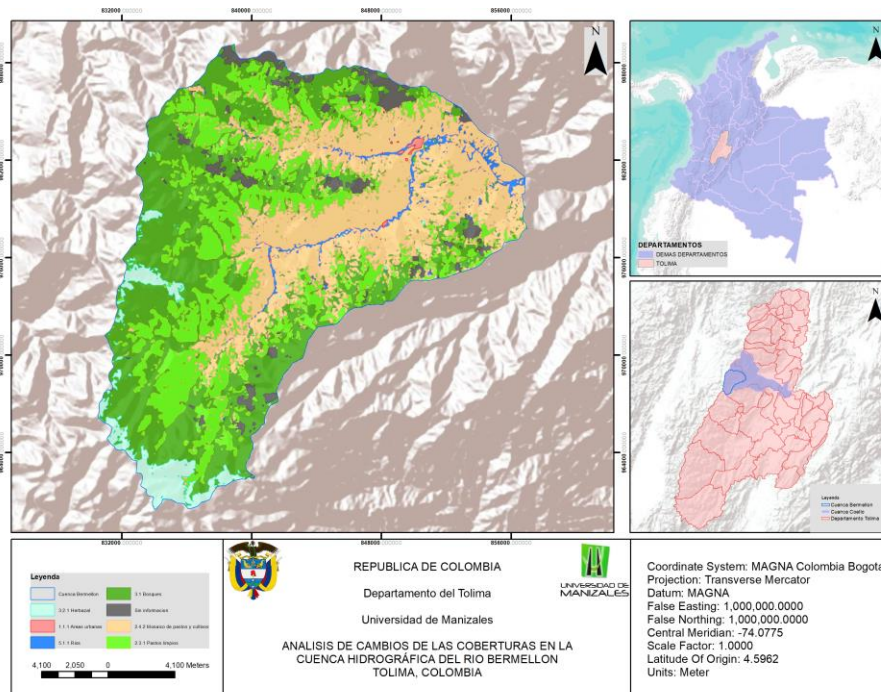
7. RESULTADOS

En el siguiente capítulo, se presentan los resultados obtenidos, correspondientes al análisis de cambio de cobertura en la cuenca del río Bermellón en el periodo de tiempo del 2002 y 2023.

- Cuenca del Río Bermellón (área completa)

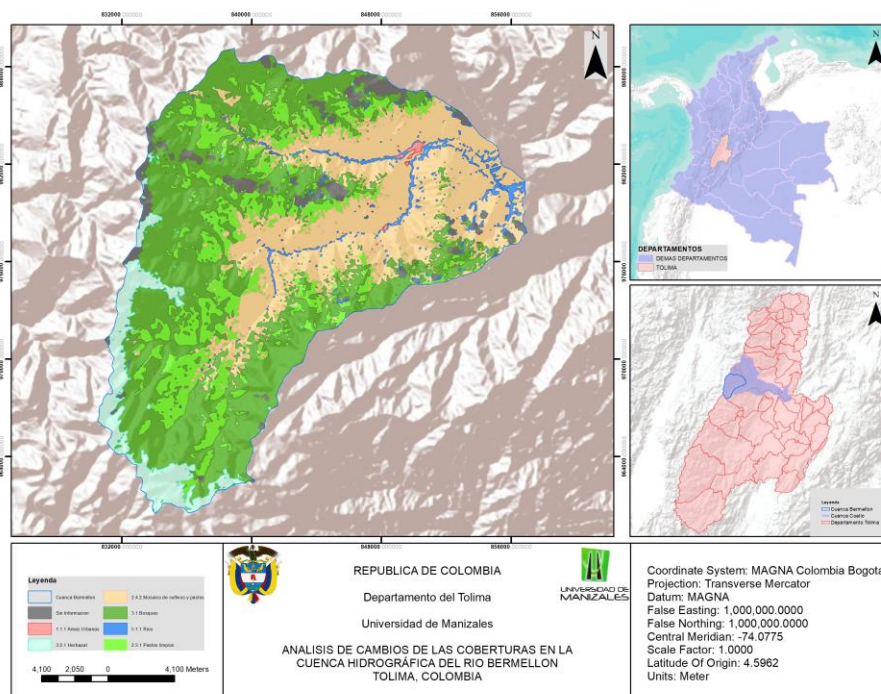
Los mapas correspondientes al análisis de las coberturas para la totalidad de la cuenca del río Bermellón, para el año 2002 (ver **Figura 15**) y el año 2023 (ver **Figura 16**) se presentan a continuación, y la matriz de cambio para las distintas coberturas en el periodo de tiempo analizado (ver **Tabla 9**), además, se analiza las posibles razones de las pérdidas o ganancias de ciertas coberturas.

Figura 15. Mapa de coberturas terrestres, 2002.



Fuente: (Propia, 2024)

Figura 16. Mapa de coberturas terrestres, 2023



Fuente: (Propia, 2024)

Tabla 9. Matriz de cambios (ha) en las coberturas y probabilidades de transición en la cuenca del río Bermellón, Tolima, 2002-2023.

Clasificación	AREA_2002 (ha)	AREA_2023 (ha)	DIFERENCIA
1.1.1 Áreas Urbanas	60,05	60,22	0,16
2.3.1 Pastos limpios	10190,15	7809,64	-2380,51
2.4.2 Mosaico de pastos y cultivos	11542,84	12243,65	700,81
3.1 Bosque	15974,29	16777,95	803,66
3.2.1 Herbazal	1678,78	2428,34	749,56
5.1.1 Ríos	892,19	978,08	85,89
Área sin información	1687,44	1729,30	41,86
Total	42025,75	42027,18	

Fuente: Propia, 2024

De los resultados obtenidos, se puede observar lo siguiente:

En la cobertura de las Áreas Urbanas, se observa un aumento leve en el periodo de tiempo analizado, de 0,16 ha (0,27%), pasando de 60,05 ha en 2002 a 60,22 ha en 2023. Este modesto incremento sugiere que las áreas consideradas urbanas, presentan una estabilidad en la expansión durante un periodo de tiempo de 21 años. En lo que respecta a la cobertura de Pastos Limpios, esta cobertura experimenta una disminución considerable de 2380,51 ha, es decir aproximadamente un 23,37% desde 2002 hasta 2023. Este cambio en el uso de esta tierra podría ser por conversión a otros usos como agricultura o regeneración de vegetación natural.

En la cobertura de Mosaico de Pastos y Cultivos, se presentó un aumento de 700,81 ha para el periodo de tiempo analizado en este estudio. El crecimiento en esta área puede sugerir una intensificación de actividades agrícolas o un cambio en las prácticas de manejo de la tierra, combinando cultivos y pastoreo. De acuerdo con el censo agropecuario del 2016 del DANE, el departamento del Tolima tiene 1.445.371 has destinadas para uso agropecuario, de las cuales 9.435 has pertenecen al municipio de Cajamarca. (DANE, 2016)

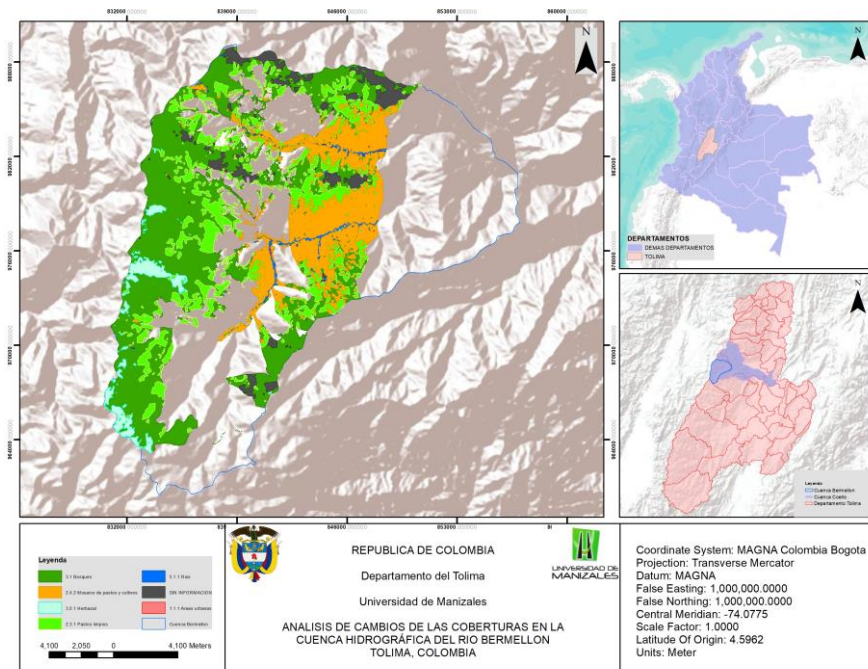
Para la cobertura de Bosques, el área forestal aumentó en 803,66 ha, de 15,974.29 ha en 2002 a 16,777.95 ha en 2023 (5,03%). Este incremento puede indicar esfuerzos de reforestación, políticas de conservación, o una regeneración natural del bosque en ciertas áreas. Esto indica que los esfuerzos de reforestación por parte de las Fuerzas Armadas y Cortolima en zonas vulnerables ha rendido frutos, esfuerzos que están encaminados a la adaptación y mitigación del cambio climático. Así mismo el aumento de la cobertura de Herbazal que para el caso del estudio hace referencia a las áreas de Paramo, ha aumentado en 749,56 ha durante el tiempo de análisis. Este incremento sugiere una expansión de las áreas de vegetación herbácea, que puede deberse a

varios factores como la recuperación de tierras abandonadas o cambios en las prácticas de manejo del suelo. Además de la ejecución de distintos proyectos para la recuperación de las áreas de conservación y de protección con las que cuenta el municipio, como el proyecto “Reforestación para la conservación de la palma de cera en Cajamarca Tolima”, que se lleva a cabo en estas zonas de importancia. (Carreño, Vargas, Gonzalez, Forero, & Diaz, 2023)

- Áreas de importancia ambiental en la cuenca del río Bermellón (Área tipo A de la ley 2ª de 1959)

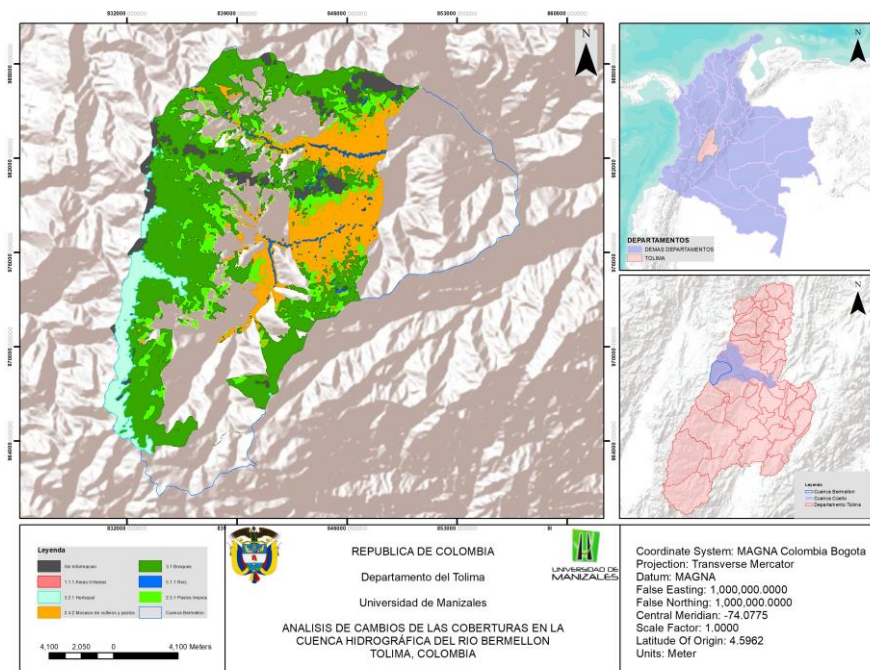
Los mapas correspondientes al análisis de las coberturas en las áreas de tipo A, de la ley 2ª de 1959 presentes en la cuenca del río Bermellón, para el año 2002 (ver **Figura 17**) y el año 2023 (ver **Figura 18**), y la matriz de cambio para las distintas coberturas (ver **Tabla 10**).

Figura 17. Mapa de coberturas terrestres en área de ley 2ª tipo A, 2002.



Fuente: Propia, 2024

Figura 18. Mapa de coberturas terrestres en área de ley 2ª tipo A, 2023.



Fuente: (Propia, 2024)

Tabla 10. Matriz de cambios (ha) en las coberturas en las áreas de Ley 2ª Tipo A, presentes en la cuenca del río Bermellón, Tolima, 2002-2023.

Clasificación	AREA_2002 (ha)	AREA_2023 (ha)	Diferencia
1.1.1 Áreas Urbanas	3.42	0.79	2.62
2.3.1 Pastos limpios	4395.12	3294.06	1101.07
2.4.2 Mosaico de pastos y cultivos	4301.70	4529.59	-227.89
3.1 Bosque	10990.62	11029.87	-39.26
3.2.1 Herbazal	732.56	1517.92	-785.35
5.1.1 Ríos	306.73	272.25	34.48
Área sin información	1262.67	1354.17	-91.50
TOTAL	21992.80777	21998.64335	

Fuente: (Propia, 2024)

Tal y como se observa en las **Figura 17** y **Figura 18**, La cuenca hidrográfica del río Bermellón, hace parte de la reserva Central de las reservas de la Ley 2A, el análisis realizado fue en las áreas que pertenecen a la zonas de tipo A, ya que estas son las que buscan garantizar el

mantenimiento de los procesos ecológicos básicos necesarios para asegurar la oferta de servicios ecosistémicos, relacionados principalmente con la regulación hídrica y climática, la asimilación de contaminantes del aire y del agua, la formación y protección del suelo, la protección de paisajes singulares y de patrimonio cultural, y el soporte a la diversidad biológica. (Sistema de Información Ambiental de Colombia, Sin Fecha)

Esto quiere decir que son zonas que son consideradas para su protección y conservación, de acuerdo con lo anterior, los cambios de cobertura que se presentaron en estas zonas son los siguientes:

En la **Tabla 10** es posible observar que la cobertura correspondiente a las Áreas Urbanas presento una reducción de 2.62 ha. Esta disminución de la cobertura puede indicar un abandono de la infraestructura urbana o asentamientos dentro de la cuenca. Dado que estas áreas están bajo protección, es posible que se hayan implementado medidas para retirar construcciones no autorizadas o restaurar zonas previamente ocupadas.

La cobertura de Pastos Limpios para el tiempo analizado presenta una reducción de 1,101.07 ha de, esta es la mayor reducción de todas las coberturas en el periodo de tiempo del estudio. Con lo mencionado previamente, y con las acciones que están llevando a cabo las entidades de nivel nacional y local, podría indicar que se está presentando una conversión de estas áreas a otros tipos de cobertura, como bosques o mosaicos de pastos y cultivos.

La cobertura correspondiente a Mosaico de Pastos y Cultivos mostró una tendencia al alza, aumentando de 4.301,70 ha en 2002 a 4.529,59 ha en 2023, lo que representa un incremento del 5,30% (227,89 ha). Este crecimiento sugiere una transición hacia prácticas agrícolas más diversificadas, combinando el cultivo de alimentos con el pastoreo, posiblemente impulsadas por iniciativas que buscan una mayor sostenibilidad ambiental.

En cuanto a la cobertura forestal, se observó un ligero aumento de 39,26 ha. Aunque este crecimiento es un indicio positivo para la conservación del entorno natural, se debe tener en cuenta que se requiere realizar masa actividades de conservación, pero así mismo, este aumento de las áreas de bosque podría ser el resultado de políticas de reforestación o una regeneración natural en áreas que anteriormente tenían otro tipo de cobertura. De acuerdo con la misión y visión de la Coporacion Autónoma Regional del Tolima – CORTOLIMA, y de conformidad con las políticas, directrices y normatividad vigente en Colombia, el ordenamiento de estas zonas se deben implementar acciones de restauración, rehabilitación y recuperación en procura del restablecimiento del estado natural de las coberturas y de las condiciones ambientales necesarias para regular la oferta de servicios ecosistémicos (CORTOLIMA, 2014).

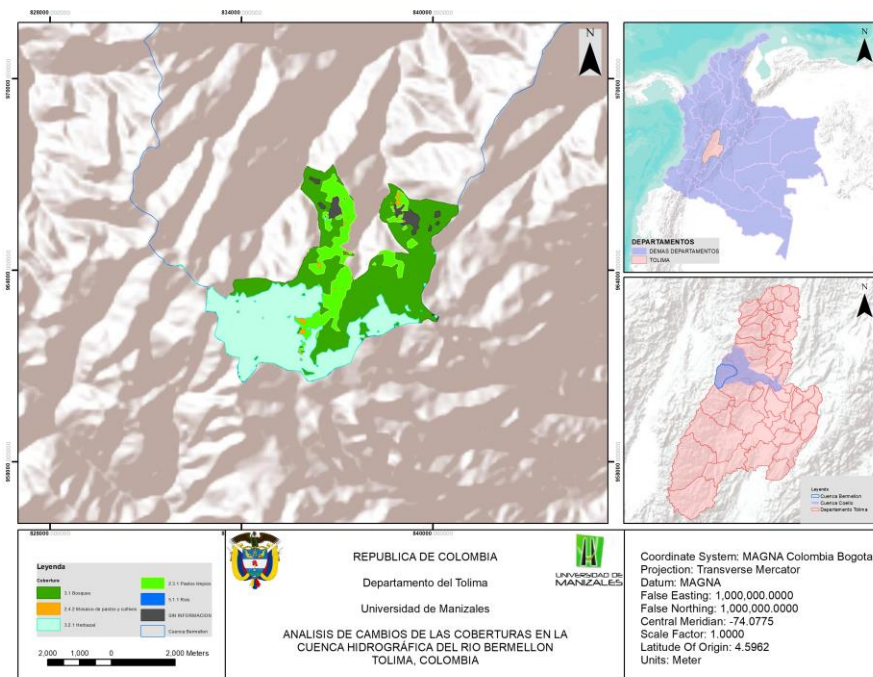
En esta zona, de acuerdo con CORTOLIMA, se deben desarrollar actividades de reducción de emisiones por deforestación y degradación – REDD, y demás mecanismos de mercado de carbono y otros esquemas de distribución de beneficios por servicios ecosistémicos. Es por tal razón, que es necesario tener un control sobre el manejo adecuado de la zona.

Es por las actividades anteriores, y los proyectos ejecutados en las zonas de interés ambiental, que en la cobertura de Herbazal se presentó un aumento de 785.35 ha. Este aumento puede determinarse como significativo en las áreas de herbazal, ya que podría estar relacionado con la recuperación de tierras degradadas y a la búsqueda de la conservación.

- Áreas de importancia ambiental en la cuenca del río Bermellón (Áreas de RUNAP)

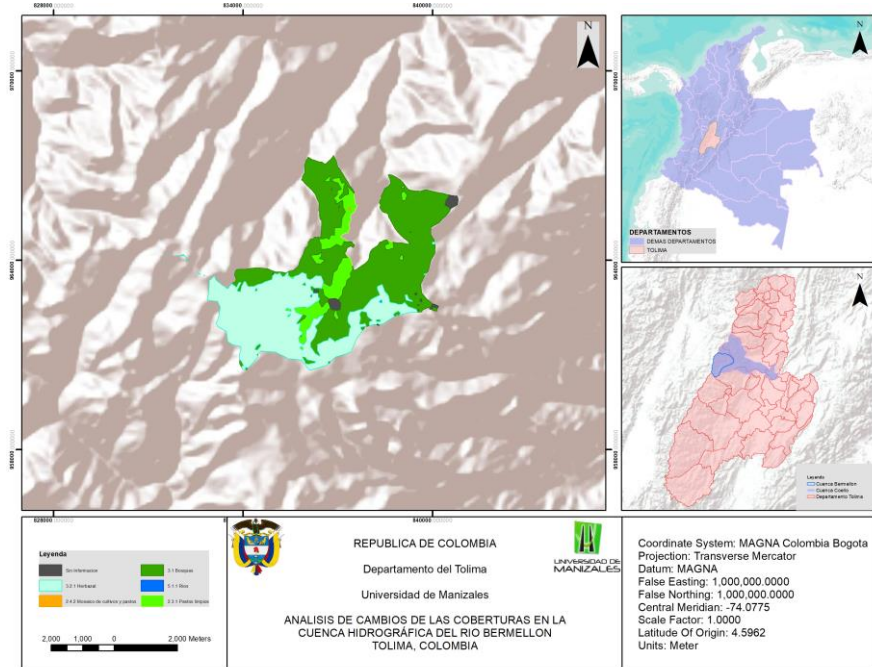
Los mapas correspondientes al análisis de las coberturas en las áreas RUNAP presentes en la cuenca del río Bermellón, para el año 2002 (ver **Figura 19**) y el año 2023 (ver **Figura 20**), y la matriz de cambio para las distintas coberturas (ver **Tabla 11**).

Figura 19. Mapa de coberturas terrestres en área de RUNAP, 2002



Fuente: (Propia, 2024)

Figura 20. Mapa de coberturas terrestres en área de RUNAP, 2023



Fuente: (Propia, 2024)

Tabla 11. Matriz de cambios (ha) en las coberturas en las áreas de RUNAP presentes en la cuenca del río Bermellón, Tolima, 2002-2023.

Clasificación	AREA_2002 (ha)	AREA_2023 (ha)	Diferencia
2.3.1 Pastos limpios	334.98	233.02	101.96
2.4.2 Mosaico de pastos y cultivos	13.46	0,44	13.01
3.1 Bosque	1086.84	1266.10	-179.26
3.2.1 Herbazal	934.93	904.24	30.68
5.1.1 Ríos	0.51	0.50	0.01
Área sin información	64.48	31.94	32.54
TOTAL	2435.19	2436.24	

Fuente: (Propia, 2024)

De acuerdo a los resultados presentados anteriormente sobre los cambios de cobertura en las áreas protegidas de RUNAP (Registro Único Nacional de Áreas Protegidas) de la cuenca del río Bermellón en el municipio de Cajamarca fue posible identificar lo siguiente (ver **Tabla 11**):

En la cobertura de pastos limpios se presentó una disminución 101.96 ha, esta reducción, como en los anteriores análisis de los cambios de cobertura, posiblemente se haya dado por una regeneración natural por los proyectos que se han llevado a cabo en la cuenca.

En la cobertura de mosaico de pastos y cultivos hubo un cambio de 13.46 ha en 2002 a 0.44 ha en 2023, con una disminución de 96,66% (13.01 ha). La disminución casi total de esta cobertura puede indicar un abandono de la actividad agrícola combinada (pastos y cultivos) en estas áreas protegidas. Este cambio podría estar asociado con la recuperación de tierras para la restauración de bosques que buscan reducir el impacto humano en la cuenca.

Para el caso de la cobertura de bosque se presentó un cambio: De 1,086.84 ha en 2002 a 1,266.10 ha en 2023, con un aumento de 179.26 ha (16,49%). El aumento de estas áreas, se considera un cambio positivo para las dinámicas de conservación de la cuenca, ya que los bosques proporcionan múltiples beneficios ambientales, incluyendo la protección de la biodiversidad, la regulación del ciclo del agua, y la captura de carbono. Este incremento se considera que es coherente con los objetivos de conservación de las áreas RUNAP.

En la cobertura de herbazal, que para el caso de este estudio son las coberturas de los páramos, que en este caso es el páramo de Anaime Chili, presento una disminución de 30.68 ha, esta reducción podría darse por la expansión del bosque o la conversión de estas áreas a otros usos del suelo. Dado que esta reducción no es muy grande, puede ser un resultado de procesos naturales de sucesión ecológica donde el herbazal se convierte gradualmente en áreas de bosque.

- STORYMAP

Para facilitar el acceso y la interpretación de los resultados obtenidos, se ha desarrollado un StoryMap interactivo. Esta herramienta permite a los usuarios explorar de manera visual e intuitiva los resultados del análisis, proporcionando una herramienta accesible para la toma de decisiones y la planificación sostenible, de consulta para las entidades gubernamentales a nivel local y departamental y finalmente a usuarios externos interesados en la información. El StoryMap (<https://storymaps.arcgis.com/stories/5425abc037594743a1031ae19695ded9>) no solo presenta las tendencias y patrones identificados, sino que también ofrece una narrativa contextualizada que ayuda a comprender las implicaciones de estos cambios en la cuenca del río Bermellón.

8. DISCUSION

A nivel general se puede observar una disminución significativa en las áreas de pastos limpios, que podría estar asociada con cambios en el uso de la tierra a áreas de cultivos, o al aumento de las áreas de Bosque, por las actividades y proyectos que se han ejecutado en el área de la cuenca. Además, que se presenta un aumento en las áreas de bosque y mosaico de pastos y cultivos, lo que podría reflejar una diversificación en el uso del suelo, una mayor atención a la sostenibilidad ambiental o procesos de regeneración natural. Los incrementos en las áreas de herbazales y ríos podrían ser efectos de políticas ambientales, variaciones climáticas o cambios naturales en el paisaje.

Mediante el proyecto ‘Cajamarca Respira’, la alcaldía local junto con Cortolima, crearon un vivero que ha dejado más de 30 mil árboles producidos y 14 mil sembrados, este proyecto pretende desarrollar acciones para el beneficio del medio ambiente del municipio, permitiendo que Cajamarca se proyecte a ser el municipio con mayor reforestación en el país

Los resultados obtenidos y el análisis de estos, podría sugerir, que la cuenca hidrográfica del Rio Bermellón, se encuentra en un panorama dinámico en el uso del suelo para el periodo de estudio de 21 años, con una combinación de expansiones y contracciones en diferentes tipos de cobertura, reflejando posiblemente tanto factores naturales como decisiones de manejo territorial.

Las actividades de reforestación, recuperación y/o conservación de las áreas desprotegidas de cobertura forestal, están enmarcadas en los tratamientos de adecuación de

tierras para producción, protección del EOT del municipio de Cajamarca – Tolima del 2022-2033, en áreas que coincidan con las definidas por la legislación para protección de cauces de ríos y quebradas se han definido en treinta (30) metros. Además, la protección de los nacimientos se restringe en cien (100) metros de radio con actividades de reforestación con especies nativas (Alcaldía de Cajamarca, 2022)

Por otro lado, en el EOT del municipio de Cajamarca Tolima se evidencia que esta región cuenta con una amplia red de drenajes de los ríos Anaime y Bermellón, además, de condiciones biofísicas como pendiente, hidrografía y clima, que ha condicionado la conformación de una entremezcla de coberturas de mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales. Se identifica que los usos principales del suelo son forestales de protección, pastoreo extensivo y producción agrícola. En el diagnóstico del EOT, se menciona que las actividades como la deforestación, ampliación de potreros, quemas descontroladas, minería ilegal y siembra de cultivos ilícitos han venido degradando el ecosistema a lo largo de los años, generando una insostenibilidad del ecosistema de páramo y bosque presente en el municipio de Cajamarca por parte de los habitantes del mismo; Existen reportes de varias especies de árboles, mamíferos, aves y anfibios en categoría de amenaza de extinción, que se han visto afectados por las actividades anteriormente mencionadas, dichas especies están reportadas bajo la Resolución 1912 del 2017 del Ministerio de Ambiente y desarrollo Sostenible MADS.

9. CONCLUSIONES

La presente investigación ha delimitado las coberturas del suelo en la cuenca del río Bermellón, mediante el uso de imágenes satelitales de los años 2002-2023, aplicando técnicas de procesamiento digital.

En la cuenca del río Bermellón se han evidenciado procesos de reforestación en un contexto que anteriormente predominaban las coberturas pastos y cultivos; a nivel general se observa una disminución de Pastos Limpios (23,37%), a su vez, aumentos en coberturas de mosaico de Pastos y Cultivos en un 60,7%, de Herbazal en un 44,63% y de bosque en un 5,03%, es significativo resaltar que el aumento de Mosaico de Pastos y Cultivos se encuentra fuera de áreas de protección en su mayor proporción y sugiere una intensificación de actividades agrícolas sostenibles como los sistemas agrosilvopastoril.

En las zonas de protección, como las áreas clasificadas bajo la Ley Segunda de 1959, se ha observado una disminución del 76,9% de la cobertura denominada áreas urbanas, seguramente por abandono y/o migración de zonas rurales y a su vez una disminución del 25,05% en las coberturas de pastos limpios. Este fenómeno puede reflejar un esfuerzo consciente hacia la conservación del medio ambiente o una tendencia hacia una sostenibilidad en la cuenca. Además, se ha registrado un incremento del 107,02% en las coberturas de áreas de herbazal (páramos), lo que indica una regeneración natural y una contribución positiva hacia la conservación de la biodiversidad y los recursos naturales. Por otro lado, en las áreas de RUNAP se evidencia una disminución de la cobertura de Mosaicos Pastos y Cultivos en un 96,66% y un

aumento de la cobertura de Bosque en un 16,49%., en cuanto a herbazales o paramos, se observa una disminución de 30,68 ha, esto podría darse por el resultado de procesos naturales de sucesión ecológica.

En este trabajo de grado, se ha logrado integrar los resultados del análisis de cambios en las coberturas del suelo con información secundaria sobre factores influyentes. Un hallazgo significativo es que el desarrollo del marco normativo a nivel local en Cajamarca ha sido un determinante importante en estos cambios. En particular, la creación del Sistema Municipal de Áreas Protegidas (SIMAP) y otras estrategias complementarias de conservación han jugado un papel crucial. Además, se ha identificado que la cuenca del río Bermellón posee un gran potencial turístico, destacando por sus atractivos naturales, la diversidad de aves y los paisajes montañosos. Este potencial es una ventaja para la región, pero también plantea desafíos en términos de manejo sostenible.

El Plan de Ordenamiento Territorial (EOT) de la cuenca incluye entre sus objetivos la gestión del riesgo como garantía de protección para la población y el medio ambiente. En este contexto, uno de los objetivos clave es reconocer y mitigar los impactos de las actividades antrópicas, especialmente aquellas relacionadas con el uso de agroquímicos en los procesos de cultivo. La integración de estos factores con los resultados del análisis proporciona una visión comprensiva de los cambios en las coberturas del suelo en la cuenca del río Bermellón y subraya la importancia de las políticas y estrategias locales en la conservación y desarrollo sostenible de la región.

Los mapas temáticos de 2002 y 2023 representan las coberturas terrestres de la cuenca del río Bermellón en un nivel de levantamiento de 1:100.000, estos representan la dinámica

espacial y temporal de las coberturas y las zonas de protección, generando información de áreas vulnerables, y brindando insumos de información actualizada para la toma de decisiones del municipio.

En este trabajo de grado, se ha obtenido el análisis de los cambios en las coberturas del suelo en la cuenca del río Bermellón para el periodo de tiempo de 21 años desde el 2002 hasta el 2023. Esta cuenca se considera de vital importancia ecológica y socioeconómica para el municipio de Cajamarca. Los resultados obtenidos han mostrado una dinámica significativa en las coberturas del suelo, como la expansión de áreas cultivadas y la recuperación de algunas áreas naturales, lo que indica una compleja interacción entre actividades humanas y procesos naturales.

10. RECOMENDACIONES

Una cuenca hidrográfica requiere perspectivas de gestión holísticas e información multitemporal confiable y consistente, y los datos de cobertura terrestre de toda la cuenca son esenciales y pueden servir como información de referencia para que las partes interesadas que actúan apoyen las aplicaciones de gestión regional sostenible y las decisiones de planificación.

De acuerdo con lo anterior se recomienda mantener un control riguroso sobre las actividades de pastoreo y agricultura para asegurar que se realicen de manera sostenible y que no comprometan los objetivos de conservación de las áreas protegidas.

Continuar apoyando las políticas y actividades de restauración ecológicas, que promuevan el aumento de la cobertura forestal y la conservación de la biodiversidad en la cuenca, dado que una de las preocupaciones que se pueden presentar en estas zonas reserva, es la reducción en el área de cobertura de ríos, ya que esto puede tener consecuencias importantes para los recursos hídricos de la cuenca, y requiere un monitoreo más detallado para entender mejor sus causas y efectos.

En cuanto a metodología, se recomienda complementar la información que se obtiene a partir de las imágenes satelitales, a través, de la adquisición de fotografías aéreas y/o vuelos no tripulados para áreas que no cuentan con información por afectaciones atmosféricas; Esto siempre y cuando se cuente con el presupuesto para dichas actividades.

11. REFERENCIAS

- Alcaldía de Cajamarca. (2022). *DOCUMENTO FASE DE DIAGNOSTICO – REVISION Y AJUSTE E.O.T. CAJAMARCA – TOLIMA - DECRETO 073 DE 2000*. Obtenido de <https://drive.google.com/file/d/1wVGm7Q5iOJX4TUaMg4WY9qwRCG7-Ks3w/view>
- Alcaldía de Cajamarca. (Sin Fecha). *Nuestro Municipio*. Obtenido de <https://www.cajamarca-tolima.gov.co/municipio/nuestro-municipio>
- Alonso Sarría, F., Gomariz Castillo, F., & Cánovas García, F. (2010). Análisis temporal de los cambios de usos del suelo en la Cuenca del Segura mediante teledetección. Implicaciones sobre la degradación. *Revista de la Sociedad Española de Geomorfología y Asociación Española Para el Estudio del Cuaternario*, 73-88.
- Alva, M., & León, A. (2017). Diseño e implementación de un catálogo de objetos geográficos para la cobertura de la Tierra mediante la leyenda Corine Land Cover, para el departamento de Ancash – Perú. *REVISTA UD Y LA GEOMÁTICA*, 55-62.
- Armenteras, D., Rodríguez, N., & Retana, J. (2013). Landscape Dynamics in Northwestern Amazonia: An Assessment of Pastures, Fire and Illicit Crops as Drivers of Tropical Deforestation. *Journal PLoS ONE* 8, e54310.
- Armenteras, D., Rodríguez, N., & Retana, J. (2013).) Landscape Dynamics in Northwestern Amazonia: An Assessment of Pastures, Fire and Illicit Crops as Drivers of Tropical Deforestation. *PLOS ONE*.
- Briñez, K., Guarnizo, J., & Arias, S. (2012). *Calidad del agua para consumo humano en el departamento del Tolima*. Obtenido de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-386X2012000200006

- Burgos, A. L., Bocco, G., & Sosa Ramírez, J. (2015). *El enfoque de cuencas y la gestión del espacio geográfico*. Obtenido de https://www.researchgate.net/profile/Ana-Burgos-5/publication/303383018_Dimensiones_Sociales_en_el_Manejo_de_Cuencas/links/573f731408aea45ee844feb1/Dimensiones-Sociales-en-el-Manejo-de-Cuencas.pdf
- Calle, Z., Murgueitio, E., Chará, J., Molina, C. H., Zuluaga, A. F., & Calle, A. (2013). A Strategy for Scaling-Up Intensive Silvopastoral Systems in Colombia. *Journal of Sustainable Forestry*, 677–693.
- Candori, L., Loza Murguía, M., Mamani, P., & Solíz Valdivia, H. (2018). *Análisis multitemporal de la cobertura boscosa empleando la metodología de teledetección espacial y SIG en la sub-cuenca del río Coroico - provincia Caranavi en los años 1989 – 2014*. Obtenido de *Journal of the Selva Andina Research Society*, 9(1), 25-44:
http://scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2072-92942018000100003
- Carreño, C., Vargas, C., Gonzalez, H., Forero, J., & Diaz, N. (2023). *Reforestación para la conservación de la palma de cera en Cajamarca Tolima*. Obtenido de <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/59614/hcgonzaleza.pdf?sequence=1>
- Chuvieco, E. (1990). Fundamentos de Teledetección Espacial. En E. Chuvieco, *Fundamentos de Teledetección Espacial* (págs. 148-156). España: Ediciones RIALP.
- Cohen, J. (1960). A coefficient of agreement for nominal scales. En J. Cohen. *Educational and Psychological*. Vol 20.
- Condori-Luna, I., Loza-Murguía, M., Mamani-Pati, F., & Solíz-Valdivia, H. (2018). *Análisis multitemporal de la cobertura boscosa empleando la metodología de teledetección*

-
- espacial y SIG en la sub-cuenca del río Coroico - provincia Caranavi en los años 1989 – 2014*. Obtenido de J. Selva Andina:
http://scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2072-92942018000100003
- Congalton, R., & Russell, G. (1957). Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data. En G. Russell, & R. Congalton. CRC Press. Obtenido de Principles and Practices.
- Coppin, P., Jonckheere, I., Nackaerts, K., & Muys, B. (2004). *Digital change detection methods in ecosystem monitoring: a review*. Obtenido de International Journal Of Remote Sensing.: <https://doi.org/10.1080/0143116031000101675>
- CORTOLIMA & Universidad de Ibagué. (2018). Obtenido de https://www.cortolima.gov.co/images/POMCA/Rio_Coello/2fase/Documento_ajuste_par_cia_zonificaci%C3%B3n_ambiental_Coello.pdf
- CORTOLIMA. (2009). *PLAN DE ORDENAMIENTO Y MANEJO DE LA CUENCA HIDROGRAFICA DEL RIO ANAMICHÚ*. Obtenido de https://www.cortolima.gov.co/images/POMCA/anamichu/1FASE/1._HISTORIAL_DE_LA_CUENCA.pdf
- CORTOLIMA. (2014). *Reserva Forestal Central en el país se ordena*. Obtenido de <https://cortolima.gov.co/sala-de-prensa/noticias/2059-reserva-forestal-central-en-el-pais-se-ordena>
- CORTOLIMA. (2018). Obtenido de ANÁLISIS SITUACIONAL INICIAL DE LA SUBZONA HIDROGRÁFICA DEL RÍO COELLO:

https://www.cortolima.gov.co/images/POMCA/Rio_Coello/1fase/ANALISIS_SITUACIONAL_INICIAL.pdf

CORTOLIMA. (2018). *Proyecto Piloto Ajuste Parcial a la Zonificación Ambiental del Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica Río Coello*. Obtenido de https://cortolima.gov.co/images/POMCA/Rio_Coello/2fase/Documento_ajuste_parcia_zonificacion_ambiental_Coello.pdf

DANE. (2016). *3ER CENSO NACIONAL AGROPECUARIO*. Obtenido de <https://www.dane.gov.co/files/images/foros/foro-de-entrega-de-resultados-y-cierre-3-censo-nacional-agropecuario/CNATomo2-Resultados.pdf>

Del Toro Espin, N., Gomariz-Castillo, F., Cánovas-García, F., & Alonso-Sarría, F. (2015). *COMPARACIÓN DE MÉTODOS DE CLASIFICACIÓN DE IMÁGENES DE SATÉLITE EN LA CUENCA DEL RÍO ARGOS (REGIÓN DE MURCIA)*. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles N.º 67*, 327-347.

Delgado Esguerra, C. (2023). *UNA HISTORIA INCONCLUSA DE LA LUCHA POR EL AGUA EN CAJAMARCA (TOLIMA)*. Obtenido de <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/65087/Tesis-DCSH%20Carolina%20Delgado%20VF4%20%20Biblioteca.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Durán, E. G. (2007). *Análisis del cambio en la cobertura de vegetación y usos del suelo en Oaxaca. Conference: II Simposio Biodiversidad, 25-27*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/263254401_Analisis_del_cambio_en_la_cobertura_de_vegetacion_y_usos_del_suelo_en_Oaxaca

-
- El Tiempo. (03 de 06 de 2023). *AGUA, PROBLEMA EN TOLIMA*. Obtenido de <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-964935>
- Etter, A., McAlpine, C., Pullar, D., & Possingham, H. (2006). Modelling the conversion of Colombian lowland ecosystems since 1940: drivers, patterns and rates. *Journal of Environmental Management*, 74-87.
- FAO & PNUMA. (2000). *El Futuro de Nuestra Tierra*. Obtenido de <https://www.fao.org/3/X3810S/X3810S00.htm>
- Fatmawati, A., Aurora, R., Thong, T., & Furuya, K. (2024). *Impact of Urbanization on the Vegetation Dynamic in Tama River Basin*. Obtenido de https://www.jstage.jst.go.jp/article/irspsd/12/2/12_7/_pdf/-char/en
- Feranec, J., Hazeu, G., Christensen, S., & Jaffrain, G. (2007). Corine land cover change detection in Europe (case studies of the Netherlands and Slovakia). *Land Use Policy*, 234-247.
- Fundacion Aquae. (27 de 09 de 2021). *Recursos renovables: la energía del planeta*. Obtenido de <https://www.fundacionaquae.org/wiki/que-son-recursos-renovables/>
- Garcia Cobos, L. A., Lizarazo Sarmiento, O. E., & Romero Ramirez, Y. A. (2017). *LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO Y MODELACIÓN HIDRÁULICA PARA LA SECCIÓN MEDIA DEL CAÑO MAIZAROK 11+000 A K13+000*. Obtenido de <https://repository.ucc.edu.co/server/api/core/bitstreams/4a31493b-6a82-4d27-b521-92be9b7bb333/content>
- Gregorio, D. (Sin Fecha). *Sistema de Clasificación de la Cobertura de la Tierra, Conceptos de Clasificación y manual para el usuario*.

- Guerrero Muñoz, D., Rodríguez Montenegro, M., & Romero Hernández, M. (s.f.). *ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE CAMBIOS DE USO DEL SUELO Y COBERTURAS, EN LA MICROCUENCA LAS MINAS, CORREGIMIENTO DE LA LAGUNA, MUNICIPIO DE PASTO, DEPARTAMENTO DE NARIÑO*. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5104161.pdf>
- Guevara, G. (2014). Evaluación ambiental estratégica para cuencas prioritarias de los Andes colombianos: dilemas, desafíos y necesidades. *Acta biol. Colomb*, 19(1);11-24.
- Hashiba, H., Kameda, K., Uesugi, S., & Tanaka, S. (2000). LANDUSE CHANGE ANALYSIS OF TAMA RIVER BASIN WITH DIFFERENT SPATIAL RESOLUTION SENSOR DATA BY LANDSAT/MSS AND TM. *Advances in space research*, 1069-1073.
- Henao, A., & Medina, J. (2018). Dinámicas espaciales de la cobertura y uso del suelo en la Orinoquía colombiana. *Revista de Geografía Norte Grande*, 149-168.
- IDEAM. (2010). *METODOLOGÍA CORINE LAND COVER*. Obtenido de <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/metodologia-corine-land-cover>
- IDEAM. (2012). *COBERTURA DE LA TIERRA*. Obtenido de https://www.cornare.gov.co/POMCAS/planes-de-ordenacion/DocumentosFasesNare/Diagnostico/Capitulo4.Caracterizacion-fisico-biotica/4.11_Coberturas.pdf
- Lambin, E., Turner, B., Geist, H., Agbola, S., Angelsen, A., Bruce, J., . . . Stone, G. (2001). The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. *Global Environmental Change*, 261-269.

-
- Llactayo, W., Salcedo, K., & Victoria, E. (2014). *Protocolo de evaluación de la exactitud temática del mapa de deforestación. Dirección General de Ordenamiento Territorial (DGOT)*. Peru.
- Márquez Calle, G. (2003). <https://www.sogeocol.edu.co/documentos/07ecos.pdf>. Obtenido de <https://www.sogeocol.edu.co/documentos/07ecos.pdf>
- Marquez, G. (2003). <https://www.sogeocol.edu.co/documentos/07ecos.pdf>. Obtenido de <https://www.sogeocol.edu.co/documentos/07ecos.pdf>
- MINAMBIENTE. (Sin Fecha). *Ecosistemas Estratégicos*. Obtenido de <https://archivo.minambiente.gov.co/index.php/bosques-biodiversidad-y-servicios-ecosistematicos/ecosistemas-estrategicos>
- MOLINA RÍOS, S., & RODRÍGUEZ NÚÑEZ, F. (11 de 2020). *ESTUDIO DEL POTENCIAL AMBIENTAL Y TURÍSTICO DE LA CUENCA DEL RÍO BERMELLÓN-MUNICIPIO DE CAJAMARCA - TOLIMA PARA EL DESARROLLO DEL AVITURISMO*. Obtenido de <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/31597/2020ferneyrodriguez.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Núñez, M. A. (2011). La cuenca hidrográfica en la gestión integrada de los recursos hídricos. *Revista Virtual REDESMA*.
- Pérez, J., & Villegas, J. (2018). Multi-temporal analysis of land cover change in the Colombian Andes: A case study of the department of Antioquia. *International Journal of Remote Sensing*, 39(14), 4781-4801.

- Quirós, E. (2009). *CLASIFICACIÓN DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES ASTER MEDIANTE FUNCIONES ADAPTATIVAS*. Obtenido de UNIVERSIDAD DE EXTREMADURA, TESIS DOCTORAL:
https://www.researchgate.net/publication/235917293_Clasificacion_de_imagenes_multiespectrales_ASTER_mediante_funciones_adaptativas
- Ramirez Chamorro, L. E., & Ocampo Osorio, L. A. (2013). *DETERMINACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS, BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO COELLO, DEPARTAMENTO DEL TOLIMA* . Obtenido de <https://repository.ut.edu.co/server/api/core/bitstreams/bc58581e-35d7-424b-ae16-a88ed0ab5ef7/content>
- Richards, J. A. (2012). *Remote Sensing Digital Image Analysis*. Chapter.
- Rodriguez, E., & Ospina, A. (2012). Cambio en el uso del suelo y cobertura vegetal en la región Andina de Colombia, utilizando imágenes de satélite Landsat. . *Boletín Científico CIOH*, 60-76.
- Rojas, S., & Medina, J. (2020). Clasificación supervisada contextual de Markov, mediante el uso de imágenes multiespectrales LandSat 8 OLI y Sentinel 2A. *REVISTA UD Y LA GEOMÁTICA*, 91-100.
- Romero, F. (2016). La Teledetección satelital y los sistemas de protección ambiental. *Revista AquaTIC*, 24.
- Sánchez-Cuervo, A. M., & Aide, T. M. (2013). Consequences of the Armed Conflict, Forced Human Displacement, and Land Abandonment on Forest Cover Change in Colombia: A Multi-temporal Analysis. *Regional Environmental Change*, 13(2), , 287-297 .

Santiago, I. (2005). *Versión ArcView, 9*. Obtenido de Fundamentos de ArcGIS.

Sistema de Información Ambiental de Colombia. (Sin Fecha). *Ley segunda de 1959*. Obtenido de <http://www.siac.gov.co/ley-segunda>

SOKAL, R. (1974). Classification: Purposes, Principles, Progress, Prospects:. *Science*, 1115-1123.

TELEMATICA. (Sin Fecha). *ENVI*. Obtenido de <https://www.telematica.com.pe/plataforma/envi/>

USGS. (Sin Fecha). *Landsat 7*. Obtenido de <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-7>

USGS. (Sin Fecha). *Landsat 9*. Obtenido de <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-9>

Wohlfart, C., Liu, G., Huang, C., & Kuenzer, C. (2016). *A River Basin over the Course of Time: Multi-Temporal Analyses of Land Surface Dynamics in the Yellow River Basin (China) Based on Medium Resolution Remote Sensing Data*. Obtenido de Remote Sensing: <https://www.mdpi.com/2072-4292/8/3/186>

A. Anexo: Carta de apropiación de conocimiento Alcaldía de Cajamarca

República de Colombia
Departamento del Tolima
Municipio de Cajamarca
NIT 890700859-2



Cajamarca, agosto 23 de 2024

Señores
Comité Académico
Especialización en Sistemas de Información geográfica
Facultad de Ciencias e Ingeniería
Universidad de Manizales

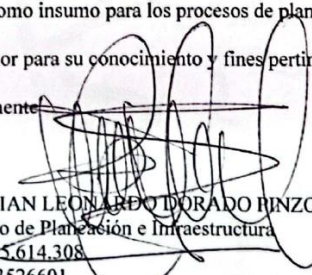
Asunto: Conocimiento del proyecto de tesis denominado ANÁLISIS DE CAMBIOS DE LAS COBERTURAS EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RIO BERMELLON, TOLIMA, COLOMBIA

Yo, CRISTHIAN LEONARDO DORADO PINZON identificado con numero de cedula de ciudadanía No 1.105.614.308, Secretario de Planeación e Infraestructura del Municipio de Cajamarca Tolima, me permito certificar que conozco el proyecto de tesis en mención correspondiente al proyecto de investigación titulado: ANÁLISIS DE CAMBIOS DE LAS COBERTURAS EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RIO BERMELLON, TOLIMA, COLOMBIA, realizado por Laura Patricia Corchuelo Avila y Patricia Alexandra Vargas Salinas, estudiantes del programa de especialización en Sistemas de Información Geográfica

Este documento cumple con la necesidad que se tiene en la actualidad en el municipio, puesto que servirá como insumo para los procesos de planeación y ordenación territorial.

Lo anterior para su conocimiento y fines pertinentes

Cordialmente


CRISTHIAN LEONARDO DORADO PINZON
Secretario de Planeación e Infraestructura
C.C 1.105.614.308
Tel. 3133526601
secretariadeplaneacion@cajamarca-tolima.gov.co