

Análisis Multitemporal del Cauce Del Río Chicamocha, en el Tramo que Comprenden los  
Municipios de Cepitá y Jordán en el Departamento de Santander, y Su Relación con el Cambio  
de la Cobertura del Suelo

Leydi Julieth Ordoñez Triana

Trabajo de Grado para Optar el Título de Geóloga

Director

M. Sc Geólogo Carlos Alberto Villareal Jaimes

Codirectores

PhD Carlos Alberto Ríos

M. Sc Juan Manuel Triana

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingeniería Físicoquímicas

Escuela de Geología

Bucaramanga

2025

### **Agradecimientos**

*A la Universidad Industrial de Santander por la formación que recibí como profesional.*

*A mi director de tesis Carlos Alberto Villarreal por su paciencia y apoyo durante todo este proceso.*

*A mis codirectores Juan Manuel Triana y Carlos Alberto Ríos, por su tiempo, dedicación y por toda su orientación para poder finalizar este trabajo.*

*A la escuela de geología por haber tenido tanta paciencia y comprensión conmigo y de esta manera poder finalizar con la meta de obtener mi título en geología.*

*A mis padres por toda su dedicación y apoyo económico durante todo mi proceso como estudiante.*

*A mis tíos Adriana y Mauricio por todo su apoyo y comprensión, sin ellos terminar mi carrera no habría sido posible.*

*A mi esposo por convertirse en un pilar importante para completar esta etapa y así cerrar este ciclo para dar paso a nuevos proyectos.*

*Leydi Julieth Ordonez Triana.*

**Tabla de Contenido**

Introducción.....	11
1. Marco problemático.....	12
1.1. Planteamiento del problema .....	12
1.2. Pregunta de investigación.....	13
2. Objetivos.....	14
2.1. Objetivo General.....	14
2.2. Objetivos Específicos .....	14
3. Justificación .....	15
4. Alcances y limitaciones .....	18
4.1. Alcance .....	18
4.2. Limitaciones .....	19
5. Ubicación o Delimitación de la zona.....	22
6. Marco teórico.....	25
6.1. Cuenca Hidrográfica.....	25
6.2. Morfometría fluvial .....	27
6.3. Socavación.....	27
6.4. Depositación .....	28
6.5. Cobertura de la tierra .....	28
6.5.1. Territorios artificializados .....	29
6.5.2 Territorios agrícolas.....	30
6.5.3 Bosques y áreas seminaturales .....	31
6.5.4 Áreas húmedas.....	32

6.5.5 Superficies de agua.....	32
6.6. Actividad antrópica.....	33
6.7. Análisis multitemporal.....	34
6.8. Teledetección .....	35
6.9. Sensores pasivos .....	36
6.10. Resolución espacial .....	37
6.11. Resolución espectral .....	37
6.12. Resolución temporal .....	37
6.13. Resolución radiométrica .....	37
6.14. Clasificación supervisada .....	38
7. Marco Geológico .....	38
8. Antecedentes.....	45
9. Marco metodológico.....	46
Fase 1: Revisión de bibliografía, recopilación de información: .....	47
Fase 2: Preprocesamiento de imágenes satelitales .....	49
Fase 3: Clasificación supervisada y análisis multitemporal .....	50
Fase 4: Comparación temporal y análisis de cambios.....	52
10. Resultados.....	53
Fase 1: Revisión de bibliografía, recopilación de información: .....	53
Fase 2: Preprocesamiento de imágenes satelitales .....	55
Fase 3: Clasificación supervisada y análisis multitemporal .....	65
Fase 4: Comparación temporal y análisis de cambios.....	73
11. Discusión .....	84

12. Conclusiones..... 88

Referencias Bibliograficas..... 91

**Lista de Figuras**

Figura 1. Ubicación del departamento de Santander en Colombia .....	22
Figura 2. Ubicación de los municipios de Cepitá y Jordán.....	24
Figura 3. Clasificación de la tierra usando metodología CORINE Land Cover para el 2018. ....	34
Figura 4. Funcionamiento de un sensor pasivo .....	36
Figura 5. Zona de estudio.....	39
Figura 6. Mapa geológico de la zona de estudio. ....	44
Figura 7. Fases de la metodología.....	46
Figura 8. Imagen para diciembre del año 2000 Landsat 5. ....	54
Figura 9. Base de datos inicial .....	55
Figura 10. Imágen satelital Landsat 5 del 4 de septiembre del 2000 y el área de estudio. ....	56
Figura 11. Imágen satelital Landsat 8 del 18 de septiembre del 2018 y el área de estudio. ....	56
Figura 12. Geoprocesamiento Buffer .....	57
Figura 13. Buffer aplicado a través de ArcGIS Pro.....	57
Figura 14. Uso del geoprocesamiento Clip Raster .....	58
Figura 15. Imagen satelital recordata según el AOI.....	58
Figura 16. Composición de bandas espectrales Lansdat 8 para color natural en la zona de estudio. .....	59
Figura 17. Uso del geoprocesamiento Raster Calculator .....	60
Figura 18. Base de datos de resultados. ....	63
Figura 19. Firmas espectrales generales para Landsat .....	64
Figura 20. Levantamiento de muestras del río para entrenar el algortimo de clasificación.....	65
Figura 21. Uso del geoprocesamiento Image Classification Wizard .....	66

Figura 22. Uso del geoprocesamiento Image Classification Wizar parte 2 .....	67
Figura 23. Primera clasificación para el año 2018 .....	69
Figura 24. Clases finales usadas para entrenar el algoritmo .....	70
Figura 25. Clasificación de la cobertura del suelo para el año 2018.....	71
Figura 26. Clasificación de la cobertura del suelo para el año 2000.....	72
Figura 27. Uso del geoprocesamiento Compute change raster .....	73
Figura 28. Cobertura de pastos limpios.....	75
Figura 29. Cambios de la cobertura de la tierra entre los años 2000 y 2018. ....	76
Figura 30. Uso del geoprocesamiento Tabulate Area.....	77
Figura 31. Cauce el río Chicamocha con pocos cambios.....	78
Figura 32. Cambios de río a tierras desnudas en color naranja. ....	79
Figura 33. Invariabilidad en las zonas arbustivas (en color verde).....	79
Figura 34. Cambios de zonas arbustivas a pastos limpios (En naranja). ....	81

**Lista de Tablas**

Tabla 1. Unidades de cobertura de la tierra para territorios artificializados.....	29
Tabla 2. Unidades de cobertura de la tierra para territorios agrícolas.....	30
Tabla 3. Unidades de coberturas de la tierra de bosques y áreas seminaturales.....	31
Tabla 4. Unidades de coberturas de la tierra para las áreas húmedas.....	32
Tabla 5. Unidades de cobertura de la tierra para las superficies de agua.....	33
Tabla 6. Bandas de Landsat 5.....	48
Tabla 7. Bandas de Landsat 8.....	48
Tabla 8. Bandas utilizadas en el estudio.....	50
Tabla 9. Muestras necesarias para la clasificación según la metodología CORINE Land Cover..	51
Tabla 10. Ejemplo de resultados esperado y su interpretación.....	52
Tabla 11. Insumos utilizados.....	55
Tabla 12. Índices espectrales calculados en el área de estudio.....	62
Tabla 13. Muestras tomadas para la imagen 2018.....	65
Tabla 14. Matriz de cambios de cobertura en hectáreas.....	77
Tabla 15. Hectáreas de clase de río totales.....	82
Tabla 16. Invaración en tramos del río.....	85

## Resumen

**Título:** Análisis Multitemporal del Cauce Del Río Chicamocha, en el Tramo que Comprenden los Municipios de Cepitá y Jordán en el Departamento de Santander, y Su Relación con el Cambio de la Cobertura del Suelo.\*

**Autor:** Leydi Julieth Ordoñez Triana\*\*

**Palabras clave:** análisis multitemporal, geomorfología, Chicamocha, cobertura del suelo, intervención antrópica.

### Descripción:

Este trabajo analiza los cambios en la dinámica geomorfológica del río Chicamocha en el tramo comprendido entre los municipios de Cepitá y Jordán (Santander), mediante un análisis multitemporal de coberturas del suelo entre los años 2000 y 2018, apoyado en imágenes satelitales Landsat y metodología CORINE Land Cover. A través de la interpretación de imágenes y la aplicación de índices espectrales como el NDVI, se identificaron transformaciones relevantes en las geoformas fluviales, asociadas tanto a procesos naturales de sedimentación y erosión, como a intervenciones antrópicas, entre ellas la expansión urbana y el cambio de coberturas vegetales hacia usos agropecuarios intensivos. Se evidenció una alteración del cauce en sectores con disminución de vegetación riparia y mayor actividad humana, lo cual sugiere una pérdida de estabilidad morfodinámica. Estos resultados resaltan la necesidad de integrar criterios geológicos y geomorfológicos en los procesos de ordenamiento territorial, con el fin de mitigar riesgos asociados a la degradación fluvial y mejorar la planificación del uso del suelo en zonas ambientalmente sensibles.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director Carlos Alberto Villareal Jaimes. Codirectores Carlos Alberto Ríos y Juan Manuel Triana.

### Abstract

**Title:** Multitemporal Analysis of the Chicamocha River Channel Between the Municipalities of Cepitá and Jordán (Santander, Colombia) and Its Relationship with Land Cover Change.\*

**Author:** Leydi Julieth Ordoñez Triana\*\*

**Key words:** multitemporal analysis, geomorphology, Chicamocha River, land cover, anthropogenic impact.

#### **Description:**

This thesis analyzes the geomorphological dynamics of the Chicamocha River along the section between the municipalities of Cepitá and Jordán (Santander, Colombia), through a multitemporal analysis of land cover changes from 2000 to 2018, using Landsat satellite imagery and the CORINE Land Cover methodology. Through spectral index analysis (e.g., NDVI) and supervised classification, significant transformations in fluvial landforms were identified, linked both to natural processes such as erosion and sedimentation, and to anthropogenic factors including urban expansion and conversion of natural vegetation to intensive agricultural land. River channel alterations were observed in areas with reduced riparian vegetation and increased human activity, indicating a loss of morphodynamical stability. The results highlight the importance of incorporating geological and geomorphological criteria into territorial planning processes to mitigate risks related to fluvial degradation and to improve land use management in environmentally sensitive areas.

---

\* Bachelor Thesis

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director Carlos Alberto Villareal Jaimes. Codirectores Carlos Alberto Ríos y Juan Manuel Triana.

## Introducción

El análisis geomorfológico de los cauces fluviales es una herramienta clave para entender la configuración del relieve, la evolución de los paisajes y las posibles implicaciones de las actividades humanas sobre estos sistemas. En territorios como el nororiente colombiano, donde convergen complejidades geológicas, climáticas y antrópicas, resulta necesario estudiar la forma, comportamiento y transformación de los ríos como el Chicamocha, especialmente en tramos sensibles desde el punto de vista ambiental y territorial.

Este trabajo tiene como objetivo evaluar los cambios morfológicos en el cauce del río Chicamocha, específicamente en el tramo que atraviesa los municipios de Cepitá y Jordán en el departamento de Santander, entre los años 2000 y 2018. Para ello, se realiza un análisis multitemporal basado en imágenes satelitales Landsat, procesadas con metodologías de teledetección y sistemas de información geográfica (SIG), que permite observar alteraciones en la configuración del cauce y su posible relación con transformaciones en la cobertura del suelo.

La investigación se fundamenta en la premisa de que las modificaciones en el uso del suelo y la expansión de ciertas actividades humanas pueden generar implicaciones directas sobre el comportamiento geomorfológico de los ríos, como el desplazamiento del talweg, la activación o inestabilidad de meandros, y la erosión de márgenes. Por ello, el análisis se enfoca tanto en la evolución física del cauce como en la caracterización de los cambios en el paisaje circundante.

Además de aportar conocimiento técnico sobre las transformaciones del río Chicamocha en este tramo, este trabajo busca ofrecer insumos útiles para la toma de decisiones en materia de ordenamiento territorial y gestión ambiental, especialmente en zonas rurales donde confluyen procesos naturales y presiones antrópicas sin una planificación suficiente.

## **1. Marco problemático**

### **1.1. Planteamiento del problema**

Las cuencas hidrográficas, además de dar vida a diversos ecosistemas acuáticos y terrestres, son fundamentales para los asentamientos humanos debido a las funciones territoriales y ambientales que desempeñan. Estas garantizan el suministro de agua para el consumo doméstico, protegen el suelo, regulan el clima y respaldan actividades económicas clave como la agricultura, sin embargo, la actividad antrópica puede alterar la cobertura del suelo, modificando la dinámica hídrica de las cuencas y afectando el balance de sedimentos, caudales y en general a los ecosistemas de la zona (Halifa Marín et al., 2019).

En Colombia, la cuenca baja del río Chicamocha se extiende desde el municipio de Capitanejo hasta su confluencia con el río Suárez, en jurisdicción de los municipios de Villanueva, Zapatoca y Betulia (Santander). En este punto se forma el río Sogamoso, uno de los principales afluentes del río Magdalena. Este nuevo curso fluvial, junto con el río Fonce, conforma el principal sistema hidrológico de aporte al Magdalena en esta región, con un volumen promedio anual estimado de 17.035 millones de metros cúbicos (Carrillo Lombana et al, 1993).

La zona de estudio corresponde al tramo de la cuenca del río Chicamocha comprendido entre los municipios de Cepitá y Jordán. Esta área presenta una notable diversidad de geoformas, tales como facetas triangulares, lomos de presión, lomos de obturación, ganchos de flexión, drenajes desplazados, valles lineales y sillas de montar, que evidencian la influencia del corredor tectónico asociado a la falla Bucaramanga, además, se observan procesos morfodinámicos activos, formas fluviales generadas por cauces perennes y efímeros, así como diversas manifestaciones de erosión y movimientos en masa. (Sandoval et al., 2023).

En esta zona, la cobertura del suelo se ve afectada por diversas actividades agropecuarias de origen antrópico, entre las que se destacan los cultivos, así como la cría de ganado caprino, que constituyen la base fundamental de la economía primaria del sector (Carrillo Lombana et al., 1993). La vegetación en el área es baja y escasa, especialmente en las zonas que rodean el trazado fluvial paralelo a la falla Bucaramanga, gracias también, al clima de la zona. (García Y. C. et al., 2015). Además, otras actividades antrópicas, como la expansión urbana, la deforestación y la agricultura intensiva, están alterando significativamente el paisaje natural en las vecindades al río, generando impactos negativos en la calidad del agua, la biodiversidad y los servicios ecosistémicos que este proporciona.

La deforestación en la cuenca del río Chicamocha ha aumentado de manera alarmante en las últimas décadas, lo que ha provocado una pérdida significativa de bosques naturales este cambio ha generado consecuencias como la erosión del suelo, la disminución de la biodiversidad y una mayor susceptibilidad a eventos extremos, tales como inundaciones, sequías y movimientos en masa. A la vez, la expansión urbana descontrolada en las áreas cercanas al río ha contribuido a la impermeabilización del suelo, reduciendo su capacidad de infiltración y aumentando el riesgo de inundaciones urbanas, a ello se suma la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas, producto de actividades industriales y residenciales, que representa una amenaza creciente para la salud ambiental y humana en la región.

## **1.2. Pregunta de investigación**

Se profundizará en la pregunta de investigación ¿Cuál es la relación espacial - geológica y el valor cuantitativo en hectáreas del cambio en la cobertura del suelo frente a la modificación del cauce del río Chicamocha, en el tramo entre los municipios de Cepitá y Jordán, a partir del análisis de imágenes satelitales e información vectorial correspondiente a los años 2000 y 2018?

## **2. Objetivos**

### **2.1. Objetivo General**

Analizar cuantitativamente las cifras de los cambios en el cauce del río Chicamocha entre los municipios de Cepitá y Jordán, en el periodo 2000 - 2018, y su relación espacial - geológica con la transformación de la cobertura del suelo, mediante un análisis multitemporal basado en imágenes satelitales e información vectorial a escala 1:100.000.

### **2.2. Objetivos Específicos**

Interpretar la dinámica geomorfológica del río Chicamocha, en el tramo comprendido entre los municipios de Cepitá y Jordán (Santander), a partir del análisis de imágenes satelitales Landsat correspondientes a los años 2000 y 2018.

Analizar los cambios en la cobertura del suelo dentro del área de estudio, usando un buffer de 500 metros alrededor del río, correspondientes al periodo 2000 - 2018, mediante el uso de imágenes satelitales Landsat.

Aplicar la metodología CORINE Land Cover escala 1:100.000 adaptada para Colombia, priorizando la clase y la cobertura de tierra hasta el nivel tres de interpretación en el tramo comprendido entre los municipios de Cepitá y Jordán (Santander).

### **3. Justificación**

El estudio multitemporal de la cobertura del suelo en la cuenca baja del río Chicamocha se justifica en la necesidad de identificar y comprender los cambios que han ocurrido en el cauce principal entre los municipios de Cepitá y Jordán, incluyendo procesos erosivos, sedimentarios, de inundación, y alteraciones en su curso. Aunque estas variaciones pueden obedecer a factores naturales, la intervención del hombre, evidenciada a través del análisis de coberturas del suelo, ha intensificado y acelerado los cambios en el uso del territorio, lo que a su vez incide en la dinámica fluvial, ayuda la modificación de geoformas y aumenta la vulnerabilidad frente a amenazas como inundaciones y movimientos en masa.

Comprender estos cambios es fundamental para la adecuada gestión de los recursos hídricos, la planificación territorial y la formulación de estrategias de conservación, convirtiéndose en insumo principal para los tomadores de decisiones de la región. El análisis multitemporal mediante imágenes satelitales permite evidenciar transformaciones en la vegetación, procesos de deforestación, urbanización y expansión agrícola, todos ellos relacionados con la dinámica del cauce, usando pocos recursos y evitando el desplazamiento a la zona de estudio. Esta información es clave para orientar lineamientos técnicos en torno a la conservación, restauración y ordenamiento del territorio.

Este estudio, centrado en la cuenca baja del río Chicamocha, se justifica además por su aporte directo a los objetivos del proyecto Geoparque Cañón del Chicamocha, con base en las siguientes temáticas de vital importancia:

- **Gestión del riesgo:** La identificación y comprensión de procesos erosivos y de inundación contribuyen a una gestión más efectiva de los riesgos asociados a eventos extremos, en beneficio de la seguridad de comunidades locales e infraestructura estratégica.
- **Conservación geológica:** La dinámica fluvial influye directamente en la geología y geomorfología del territorio; su análisis es esencial para preservar la integridad y el valor paisajístico de la región.
- **Turismo sostenible:** Comprender los cambios fluviales permite planificar actividades turísticas responsables y seguras, que valoren y protejan el patrimonio natural del cañón y apuntan a las visiones de los municipios en torno al ecoturismo.
- **Investigación científica:** Este estudio aportará datos relevantes sobre la evolución geomorfológica local, los procesos fluviales y los posibles efectos del cambio climático en la región, entendiendo sus alcances y limitaciones.
- **Ordenamiento territorial:** El conocimiento de los cambios en el cauce y los procesos erosivos es clave para una planificación eficiente del uso del suelo, especialmente en áreas donde conviven actividades agrícolas, urbanas y turísticas.
- **Educación y sensibilización:** Generar información clara y accesible fomenta la concienciación pública sobre la importancia de los ríos y la necesidad de conservar estos entornos.

Este trabajo de investigación propone, entonces, analizar el proceso de cambio de cobertura del suelo en la cuenca baja del río Chicamocha y sus posibles implicaciones geomorfológicas, a través del uso de herramientas geoespaciales y una revisión crítica de literatura científica se busca interpretar la evolución de la geomorfología, a su vez, se espera generar conocimiento útil para la

toma de decisiones informadas orientadas a la conservación y gestión sostenible de este importante recurso hídrico en Colombia.

#### 4. Alcances y limitaciones

Este trabajo de investigación describe los cambios en la cobertura del suelo en una zona de 500 metros de radio del cauce del río Chicamocha, centrando el análisis en el tramo comprendido entre los municipios de Cepitá y Jordán (Santander), en el periodo 2000 - 2018. Esta zona se caracteriza por actividades agropecuarias que podrían estar relacionadas con las transformaciones del paisaje fluvial y del uso del suelo.

El estudio se desarrolla a una escala cartográfica de 1:100.000, adecuada para análisis territoriales de tipo regional y respaldada por el IDEAM en su adaptación de la metodología CORINE Land Cover en el año 2010. Esta escala se complementa con el uso de imágenes Landsat que cuenta con 30 metros de resolución espacial, las cuales proporcionan el nivel de detalle suficiente para identificar patrones espaciales amplios como deforestación, expansión agrícola, modificación de coberturas o alteraciones en el cauce del río.

##### 4.1. Alcance

El alcance del presente proyecto de investigación se soporta a partir de las siguientes características o funcionalidades:

- **Análisis multitemporal de coberturas del suelo:** Se emplearán capas vectoriales y ráster derivadas de imágenes satelitales Landsat de los años 2000 y 2018, con el fin de identificar transformaciones significativas como cambios en la vegetación, urbanización, expansión agrícola o pérdida de áreas naturales.
- **Evaluación de la dinámica fluvial:** Se analizarán los cambios espaciales en el trazado del cauce del río Chicamocha y su relación con las coberturas del suelo productivas, utilizando la metodología CORINE Land Cover adaptada al contexto colombiano como lo dispuso el IDEAM en el año 2010.

- **Uso de imágenes de Landsat:** Se escogen imágenes Landsat por su combinación óptima de resolución espacial, temporal, radiométrica y disponibilidad gratuita. A diferencia de sensores como Sentinel - 2, cuya cobertura histórica es limitada (desde 2015), o satélites comerciales de alta resolución, cuyas licencias tienen costos elevados, Landsat permite realizar comparaciones consistentes en periodos prolongados como el que contempla esta investigación (Roy et al., 2014).
- **Aplicación de herramientas geoespaciales:** Para el procesamiento, análisis y clasificación de las imágenes satelitales se utilizará el **software ArcGIS Pro**. Dicho software permite acceder a herramientas avanzadas de geoprocésamiento, las cuales se utilizarán para realizar clasificaciones supervisadas y efectuar análisis espaciales ráster que contribuyan a la interpretación de cambios en la cobertura del suelo y la dinámica fluvial.
- **Aplicación territorial:** Los resultados podrán contribuir a la comprensión de los impactos antrópicos sobre el sistema fluvial, la gestión del riesgo por inundaciones o movimientos en masa, la planificación del uso del suelo y la toma de decisiones en proyectos como el Geoparque Cañón del Chicamocha.

#### 4.2. Limitaciones

Las limitaciones del presente proyecto de investigación se dan a conocer a partir de los siguientes argumentos:

- **Resolución espacial y nivel de detalle:** La resolución de 30 metros de las imágenes Landsat puede limitar la detección de cambios de pequeña escala, especialmente en cauces secundarios, estructuras menores o áreas con cobertura mixta, sin embargo, se considera adecuada para la escala 1:100.000 y el tipo de análisis propuesto.

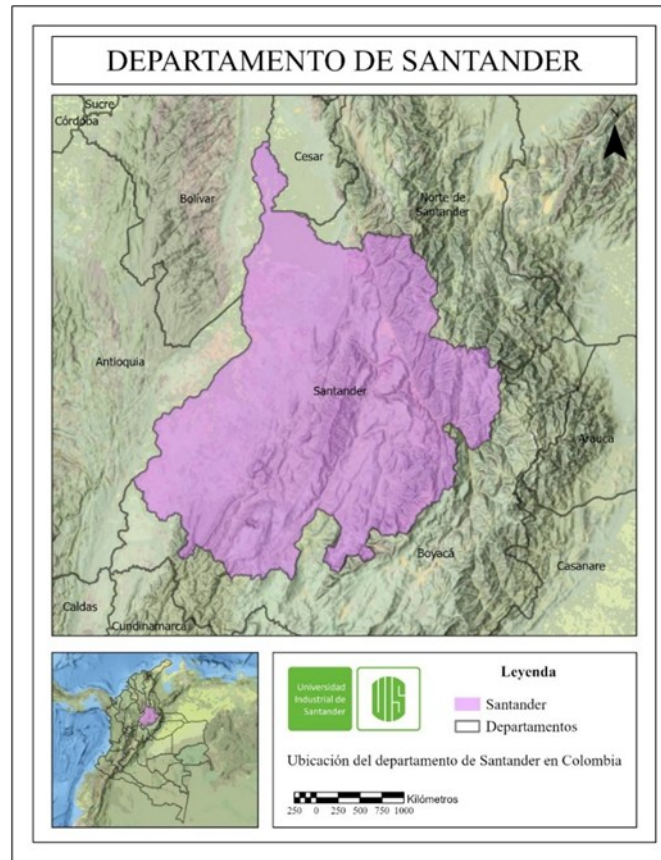
- **Disponibilidad y calidad de datos históricos:** La obtención de imágenes libres de nubosidad o con condiciones óptimas de observación puede restringir el número de escenas utilizables, asimismo, existen limitaciones en el acceso a capas vectoriales históricas consistentes.
- **Falta de trabajo de campo:** No se realizará verificación en terreno, lo que impide validar directamente los usos actuales del suelo o identificar de forma precisa las causas socioeconómicas de los cambios detectados. Debido a dicha limitación para realizar una verificación exhaustiva en campo, el análisis de coberturas en esta investigación solo alcanzará un nivel 3 de interpretación según la metodología CORINE Land Cover adoptada por el IDEAM para Colombia en el año 2010, esto implica que, aunque se garantiza una caracterización detallada de las principales unidades de cobertura presentes, no se incluye una validación total en sitio que permita ajustar las clases a condiciones locales específicas. Esta limitación ha sido señalada también en estudios previos, como el realizado por Peñaloza, Carvajal y Hernández (2020) en la microcuenca El Volcán, donde se aplicó la metodología CORINE Land Cover adaptada a Colombia hasta el nivel 3, apoyada en interpretación de imágenes satelitales y validación parcial en campo.
- **Complejidad en la relación causa - efecto:** La relación entre las modificaciones del cauce y los cambios en la cobertura del suelo es multifactorial. Factores climáticos, económicos, sociales y físicos pueden influir en los resultados, dificultando la delimitación de relaciones causales directas.
- **Limitaciones logísticas:** Las restricciones de tiempo, acceso a software especializado o recursos tecnológicos pueden condicionar la amplitud del análisis espacial o temporal.

- **Subjetividad en la interpretación:** La fotointerpretación y la categorización de coberturas implican un grado de juicio técnico que puede generar variabilidad entre analistas, por lo que se emplearán criterios estandarizados y documentación metodológica para reducir este sesgo.

## 5. Ubicación o Delimitación de la zona

Figura 1.

Ubicación del departamento de Santander en Colombia



*Fuente:* IGAC 2022

Santander es un departamento ubicado en la región Centro-Oriente de Colombia (Figura 1. Ubicación del departamento de Santander en Colombia), sobre la Cordillera Oriental, con una extensión aproximada de 30.537 km<sup>2</sup>, lo que representa el 2,7 % del territorio nacional (IGAC, 2022). Limita con los departamentos de Cesar, Norte de Santander, Boyacá, Antioquia y Bolívar. Su geografía presenta una amplia variedad de pisos térmicos entre los 100 y 4.200 msnm, lo que le confiere una notable diversidad climática y ecológica. Hídricamente, pertenece a las vertientes de los ríos Magdalena y Arauca, incluyendo importantes ecosistemas como páramos y humedales.

Administrativamente, Santander está compuesto por 87 municipios organizados en siete provincias. La zona de estudio se localiza en la provincia Guantán, que incluye los municipios de Cepitá y Jordán (DNP, 2020). En 2020, la población departamental era de 2.184.837 habitantes (DANE, 2022).

Cepitá, conocido como “El Corazón del Cañón del Chicamocha”, cuenta con una extensión de 109 km<sup>2</sup> y una población aproximada de 2.100 habitantes. Su territorio abarca altitudes entre los 620 y los 3.000 msnm, con temperaturas entre 25 °C y 32 °C, y está conformado por 14 veredas y un casco urbano. Su economía gira en torno a actividades agropecuarias, especialmente la ganadería caprina, y el turismo rural (Alcaldía de Cepitá, 2024). Hidrológicamente, pertenece a la subcuenca del río Chicamocha, destacando corrientes como la quebrada Talarcuta y microcuencas como la Baja del río Guaca y la Baja del río Chicamocha, ambas con pendientes pronunciadas que generan escorrentías torrenciales durante temporadas lluviosas.

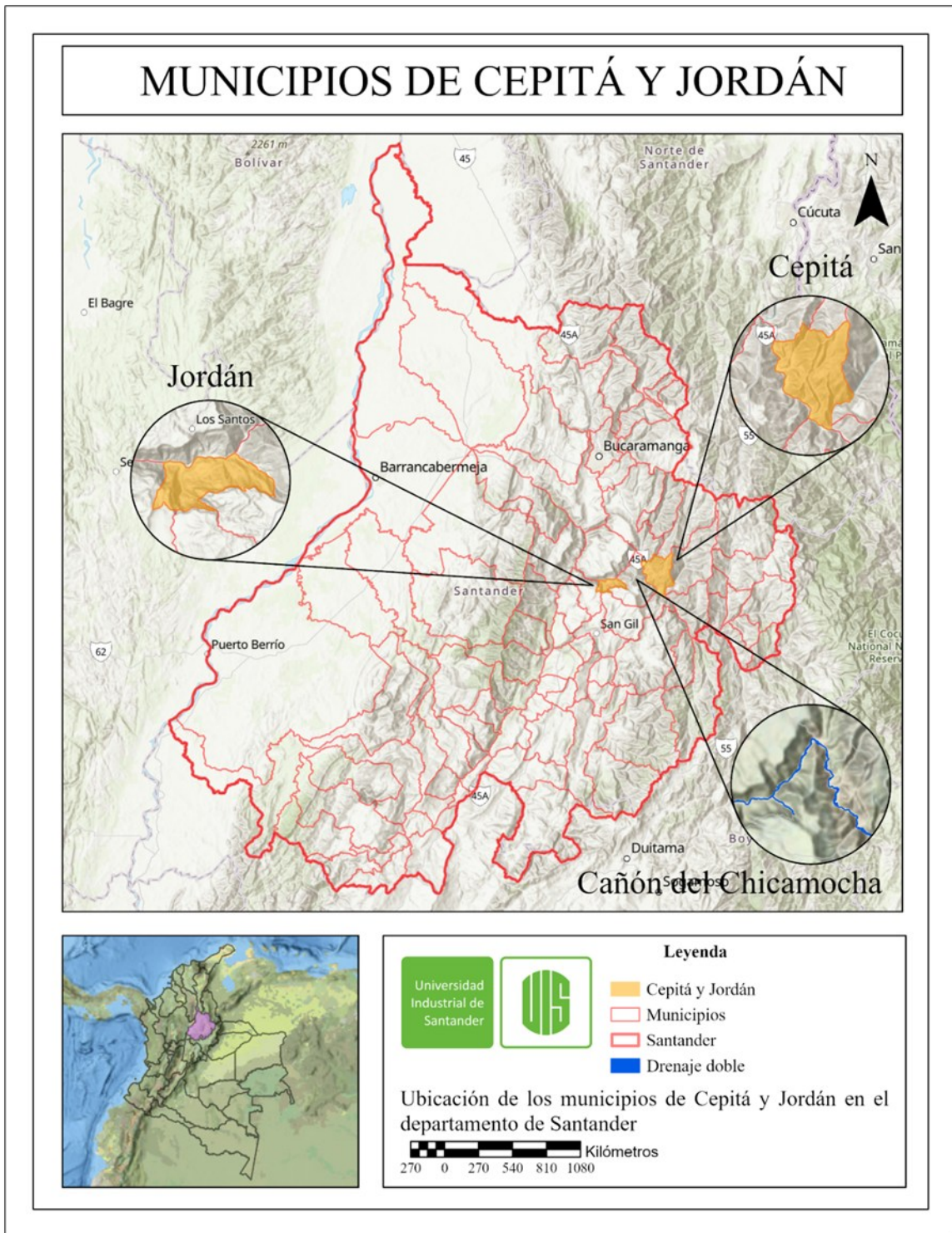
Jordán, también ubicado en la provincia Guantán, tiene una extensión de 45 km<sup>2</sup> y una población cercana a los 1.396 habitantes, distribuida en seis veredas y un núcleo urbano. Limita con los municipios de Los Santos, Aratoca, Curití y Villanueva. Forma parte del POMCA del río Chicamocha y de la jurisdicción de la CDMB y la CAS, que gestionan la cuenca del Bajo Chicamocha. Esta cuenca incluye importantes subcuencas como Onzaga, Nevado y Guaca, compartidas entre varios municipios de la región (CORPOBOYACÁ, 2015). Se puede apreciar la ubicación de ambos municipios y su relación con el cañón del río Chicamocha en la Figura 2.

*Ubicación de los municipios de Cepitá y Jordán.*

:

**Figura 2.**

*Ubicación de los municipios de Cepitá y Jordán.*



*Fuente:* Modificado de IGAC 2022. Escala 1:600.000

## 6. Marco teórico

### 6.1. Cuenca Hidrográfica

Una cuenca hidrográfica es una unidad territorial delimitada por una divisoria topográfica, en la cual las aguas superficiales y subterráneas convergen hacia un cauce principal, que puede desembocar en un río mayor, un humedal, un cuerpo de agua o el mar. En su interior se integran redes de drenaje naturales formadas por ríos y afluentes, junto con elementos físicos como el relieve y la cobertura vegetal, así como componentes antrópicos derivados de actividades agrícolas, urbanas y recreativas. Su buen estado es esencial para garantizar la calidad, cantidad y distribución del recurso hídrico y para la conservación de los ecosistemas asociados (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2014). En una cuenca hidrográfica se encuentra elementos como divisoria de aguas, río principal, afluentes, relieve de la cuenca, las obras y actividades humanas.

- a) **Divisoria de aguas:** Es una línea que delimita la cuenca hidrográfica. Una divisoria de aguas marca el límite entre una cuenca hidrográfica y las cuencas vecinas. El agua precipitada a cada lado de la divisoria desemboca generalmente en ríos distintos.
- b) **Río principal:** El río principal se puede identificar comúnmente como aquel que tiene mayor cantidad de agua, longitud o área de drenaje. En general, la mayoría de las cuencas hidrográficas tienen un río principal bien definido que va desde su desembocadura hasta cerca de la divisoria de aguas. A lo largo de su recorrido, un río se divide en tres secciones: la parte superior, ubicada en la zona más elevada, la parte media, donde el río comienza a moverse en zigzag y el valle se ensancha, y finalmente la parte inferior, que se encuentra en las zonas más bajas de la cuenca. En esta última sección, la fuerza del río disminuye y

los sedimentos sólidos se depositan, creando llanuras aluviales o valles. Dentro de este elemento se encuentran otros aspectos para tener en cuenta:

- **Cauce:** Conducto descubierto o acequia por donde corren las aguas superficiales.
  - **Margen derecha:** Mirando río abajo, la margen que se encuentra a la derecha.
  - **Margen izquierda:** Mirando río abajo, la margen que se encuentra a la izquierda.
  - **Aguas abajo:** Se dice que un punto estas aguas abajo, si se sitúa después del sentido de la corriente, o aguas arriba.
- c) **Afluentes:** Son los ríos secundarios que desaguan en el río principal. Cada afluente tiene su respectiva cuenca, denominada Subcuenca o Microcuenca.
- d) **Relieve de la cuenca:** El relieve de una cuenca consta de los valles principales y secundarios, con las formas de relieve mayores y menores y la red fluvial que conforma una cuenca. Está formado por las montañas y sus flancos; por las quebradas o torrentes, valles y mesetas.
- e) **Las obras y actividades humanas:** Si las actividades y construcciones realizadas por el ser humano en una cuenca no son controladas o planificadas adecuadamente, pueden provocar desequilibrios en la misma. Esto incluye viviendas, ciudades, industrias y vías de comunicación.

Se pueden diferenciar, tres partes dentro de una cuenca hidrográfica, cuenca alta, cuenca media y cuenca baja, la primera corresponde a la zona donde nace el río, el cual se desplaza por una gran pendiente; la cuenca media es la parte en la cual hay un equilibrio entre el material solido que llega traído por la corriente y el material que sale. La cuenca baja es la parte en la cual el material extraído de la parte alta se deposita en lo que se llama cono de inyección. La cuenca es una unidad óptima para la planificación ambiental del territorio debido a que sus límites

geográficos perduran en el tiempo de manera más prolongada en comparación con otras unidades de estudio, además, su análisis incluye diversos factores tanto físicos como humanos que facilitan una comprensión global de la realidad territorial (Fernández Rubio, 2011).

## **6.2. Morfometría fluvial**

La morfometría fluvial es el estudio cuantitativo de las formas y dimensiones de los cauces y redes hidrográficas. A través de parámetros como la longitud del cauce, el gradiente longitudinal, la sinuosidad, la densidad de drenaje, la relación de bifurcación y la pendiente de los cauces, se puede caracterizar la dinámica geomorfológica de los ríos y su interacción con el entorno geológico y climático (Leopold et al., 1995).

Este análisis permite interpretar procesos como la socavación, la depositación, la estabilidad del cauce, la evolución de los paisajes fluviales y su vulnerabilidad frente a eventos hidrometeorológicos o cambios de uso del suelo (Montgomery & Buffington, 1997).

## **6.3. Socavación**

La socavación es un proceso clave en la dinámica fluvial, asociado a la capacidad erosiva de las corrientes de agua para remover sedimentos del lecho o las márgenes de un cauce. Este fenómeno puede manifestarse de forma lateral, afectando las orillas y generando pérdida de terreno; vertical, profundizando el canal; o localizada, especialmente en zonas donde existen cambios abruptos en la geometría del canal o estructuras artificiales como puentes o espigones (García M. , 2008). Su intensidad depende de factores como la pendiente del cauce, el régimen de caudales, el tipo de material del lecho, las actividades humanas que modifican la cobertura vegetal y la estabilidad de las riberas (Simons & Şentürk, 1992). La socavación constituye un indicador importante en estudios de morfodinámica fluvial, ya que revela procesos de inestabilidad

geomorfológica y puede derivar en cambios significativos en la morfología del río (Knighton, 2014).

#### **6.4. Depositación**

La depositación es el proceso mediante el cual los ríos pierden parte de su energía y, en consecuencia, depositan los sedimentos que transportan. Este fenómeno ocurre comúnmente en sectores donde la pendiente disminuye, el caudal se reduce o el canal se ensancha, favoreciendo la acumulación progresiva de materiales como arenas, gravas, limos o arcillas (Bridge, 2003). En el contexto fluvial, la depositación juega un papel fundamental en la evolución morfológica de los cauces, pues da lugar a la formación de geformas como barras de arena, deltas, terrazas aluviales y llanuras de inundación (Knighton, 2014). Además, está estrechamente vinculada al equilibrio dinámico de la cuenca, dado que el exceso o déficit de carga sedimentaria puede desencadenar procesos de inestabilidad del canal (Schumm, 1977). El análisis de los patrones de depositación permite, por tanto, interpretar la relación entre la energía del flujo, la geología del entorno y los cambios en la cobertura del suelo.

#### **6.5. Cobertura de la tierra**

La cobertura y el uso del suelo son componentes clave en los estudios biofísicos para el ordenamiento territorial, ya que permiten caracterizar las unidades del paisaje e identificar su evolución a lo largo del tiempo. Diversos estudios han demostrado su relevancia para planificar el territorio y formular políticas ambientales. Para abordar esta necesidad, se han desarrollado sistemas de clasificación como el LCCS de la FAO y el UNEP, que promueven el acceso a información estandarizada. En este contexto, la metodología CORINE Land Cover ha sido una de las más utilizadas, originalmente creada por la Unión Europea en 1985 y adaptada a Colombia por entidades como IDEAM, IGAC y Cormagdalena. Esta metodología se basa en la interpretación de

imágenes satelitales (como las de Landsat) para realizar un inventario jerarquizado de la cobertura terrestre a escala 1:100.000, integrando criterios fisonómicos y de densidad para diferenciar entre coberturas naturales y antropizadas. En Colombia, su adaptación se llevó a cabo mediante un trabajo conjunto entre diversas instituciones científicas y técnicas, generando una base de datos nacional homogénea y compatible (IDEAM, 2010). Esta información es fundamental para monitorear los cambios del territorio, orientar procesos de conservación y promover un desarrollo sostenible basado en evidencia espacial confiable.

Para la definición de las coberturas del suelo presentes en el territorio colombiano se definieron cinco (5) grandes grupos de clasificación que abarcan más tipos de cobertura existentes: Territorios artificializados, territorios agrícolas, bosques y áreas seminaturales, áreas húmedas, cuerpos de agua.

### 6.5.1. Territorios artificializados

Comprende las áreas de las ciudades y las poblaciones y, aquellas áreas periféricas que están siendo incorporadas a las zonas urbanas mediante un proceso gradual de urbanización o de cambio del uso del suelo hacia fines comerciales, industriales, de servicios y recreativos (IDEAM, 2010).

**Tabla 1.**

*Unidades de cobertura de la tierra para territorios artificializados.*

NIVEL		
1	2	3
1. TERRITORIOS ARTIFICIALIZADOS	1.1. Zonas urbanizadas: Las zonas urbanizadas abarcan los territorios cubiertos por infraestructura urbana, además de los espacios verdes y redes de comunicación asociados con ellas, que configuran el tejido urbano.	1.1.1. Tejido urbano continuo
		1.1.2. Tejido urbano discontinuo
	1.2. Zonas industriales o comerciales y redes de comunicación: Comprende los territorios cubiertos por infraestructura de uso exclusivamente comercial, industrial, de servicios y comunicaciones. Incluyendo las instalaciones y redes de	1.2.1. Zonas industriales o comerciales
		1.2.2. Red vial, ferroviaria y terrenos asociados
		1.2.3. Zonas portuarias

	comunicaciones que permiten el desarrollo de los procesos específicos de cada actividad.	1.2.4. Aeropuertos
		1.2.5. Obras hidráulicas
	1.3. Zonas de extracción mineras y escombreras: Abarca áreas donde se extraen y/o acumulan materiales asociados con actividades mineras, de construcción, producción industrial y vertimiento de residuos de diferente origen.	1.3.1. Zonas de extracción minera
		1.4.1. Zonas verdes urbanas
	1.4. Zonas verdes artificializadas, no agrícolas: Esta unidad comprende las zonas verdes localizadas en las áreas urbanas, sobre las cuales se desarrollan actividades comerciales, recreacionales, de conservación y amortiguación, donde los diferentes usos del suelo no requieren infraestructura construida apreciable. En general, estas zonas verdes son el resultado de procesos de planificación urbana o áreas que por los procesos de urbanización quedaron dentro del perímetro de la ciudad.	1.4.2. Instalaciones recreativas

Fuente: IDEAM (2010)

### 6.5.2 Territorios agrícolas

Referente a los terrenos dedicados principalmente a la producción de alimentos, fibras y otras materias primas industriales, ya sea que se encuentren con cultivos, con pastos, en rotación y en descanso o barbecho. Encierra a las áreas dedicadas a cultivos permanentes, transitorios, áreas de pastos y las zonas agrícolas heterogéneas, en las cuales se pueden dar usos pecuarios y agrícolas (IDEAM, 2010).

**Tabla 2.**

*Unidades de cobertura de la tierra para territorios agrícolas.*

NIVEL		
1	2	3
2. TERRITORIOS AGRÍCOLAS	2.1. Cultivos transitorios: Engloba las áreas ocupadas con cultivos cuyo ciclo vegetativo es menor a un año, incluso a ser de sólo unos pocos meses, (cereales, tubérculos, algunas hortalizas y especies de flores a cielo abierto). Su característica fundamental es que después de la cosecha es necesario volver a sembrar o plantar para seguir produciendo.	2.1.1. Otros cultivos transitorios
		2.1.2. Cereales
		2.1.3. Oleaginosas y leguminosas
		2.1.4. Hortalizas
		2.1.5. Tubérculos
	2.2. Cultivos permanentes: Esta unidad comprende los territorios dedicados a cultivos cuyo ciclo vegetativo es mayor a un año, produciendo varias cosechas sin necesidad de volverse a plantar; se incluyen esta categoría los cultivos herbáceos como caña de azúcar, caña panelera, plátano y banano; los cultivos arbustivos como café y cacao; y cultivos arbóreos como palma africana y árboles frutales.	2.2.1. Cultivos permanentes herbáceos
		2.2.2. Cultivos permanentes arbustivos
		2.2.3. Cultivos permanentes arbóreos
		2.2.4. Cultivos agroforestales
		2.2.5. Cultivos confinados
	2.3. Pastos: Incluye las tierras cubiertas con hierba densa de composición florística dominado principalmente por la familia <i>Poaceae</i> , dedicadas pastoreo permanente por un periodo de dos o más años, algunas de las categorías pueden presentar anegamientos	2.3.1. Pastos limpios
		2.3.2. Pastos arbolados

temporales o permanentes en zonas bajas o en depresiones del terreno. Se caracteriza principalmente porque su alta presencia se debe a la acción antrópica, en cuanto a su plantación, y al manejo posterior.	2.3.3. Pastos enmalezados
	2.4. Áreas agrícolas heterogéneas: Son unidades que reúnen dos o más clases de coberturas agrícolas y naturales, dispuestas en un patrón intrincado de mosaicos geométricos que hace difícil su separación en coberturas individuales; los arreglos geométricos están relacionados con el tamaño reducido de los predios, las condiciones locales de los suelos, las prácticas de manejo utilizadas y las formas locales de tenencia de la tierra. (IDEAM, 2010).
	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
	2.4.5. Mosaico de cultivos con espacios naturales

Fuente: IDEAM (2010)

### 6.5.3 Bosques y áreas seminaturales

Integrada por un grupo de coberturas vegetales de tipo boscoso, arbustivo y herbáceo, desarrolladas sobre diferentes sustratos y pisos altitudinales que son el resultado de procesos climáticos; también por aquellos territorios constituidos por suelos desnudos y afloramientos rocosos y arenosos, resultantes de la ocurrencia de procesos naturales o inducidos de degradación. Para esta clasificación de coberturas de la tierra de Colombia, en esta categoría se incluyen otras coberturas, resultado de un fuerte manejo antrópico, como las plantaciones forestales y la vegetación secundaria o en transición (IDEAM, 2010).

**Tabla 3.**

*Unidades de coberturas de la tierra de bosques y áreas seminaturales.*

NIVEL		
1	2	3
<b>3. BOSQUES Y ÁREAS SEMI NATURALES</b>	3.1. Bosques: Contiene las áreas naturales o seminaturales, constituidas principalmente por elementos arbóreos de especies nativas o exóticas. Los árboles son plantas leñosas perennes con un solo tronco principal, que tiene una copa más o menos definida. De acuerdo con FAO (como se citó en IDEA, 2010) esta cobertura comprende los bosques naturales y las plantaciones. Para la leyenda de coberturas de la tierra de Colombia, se incluyen otras formas biológicas naturales, tales como la palma y la guadua.	3.1.1. Bosque denso
		3.1.2. Bosque abierto
		3.1.3. Bosque fragmentado
		3.1.4. Bosque de galería y ripario
		3.1.5. Plantación forestal
	3.2. Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva: Encierra un grupo de coberturas vegetales de tipo natural y producto de la sucesión natural, con habito de crecimiento es arbustivo o herbáceo, desarrolladas sobre diferentes sustratos y pisos altitudinales, con poca o ninguna intervención antrópica.	3.2.1. Herbazal
		3.2.2. Arbustal

	Para la leyenda CORINE Land Cover adaptada para Colombia, en esta clase se incluyen otros tipos de coberturas tales como las áreas cubiertas por vegetación principalmente arbustiva con dosel irregular y presencia de arbustos, palmas, enredaderas y vegetación de bajo porte (IDEAM, 2010).	3.2.3. Vegetación secundaria o en transición
	3.3. Áreas abiertas, sin o con poca vegetación: Comprende aquellos territorios en los cuales la cobertura vegetal no existe o es escasa, compuesta principalmente por suelos desnudos y quemados, así como por coberturas arenosas y afloramientos rocosos, algunos de los cuales pueden estar cubiertos por hielo y nieve (IDEAM, 2010).	3.3.1. Zonas arenosas naturales
		3.3.2. Afloramientos rocosos
		3.3.3. Tierras desnudas y degradadas
		3.3.4. Zonas quemadas
	3.3.5. Zonas glaciares y nivales	

Fuente: IDEAM (2010)

#### 6.5.4 Áreas húmedas

Comprende aquellas coberturas constituidas por terrenos anegadizos, que pueden ser temporalmente inundados y estar parcialmente cubiertos por vegetación acuática, localizados en los bordes marinos y al interior del continente (IDEAM, 2010).

**Tabla 4.**

Unidades de coberturas de la tierra para las áreas húmedas.

NIVEL		
1	2	3
4. ÁREAS HÚMEDAS	4.1. Áreas húmedas continentales: Las áreas húmedas hacen referencia a los diferentes tipos de zonas inundables, pantanos y terrenos anegadizos en los que el nivel freático está a nivel del suelo en forma temporal o permanente.	4.1.1. Zonas Pantanosas
		4.1.2. Turberas
		4.1.3. Vegetación acuática sobre cuerpos de agua
	4.2. Áreas húmedas costeras: En estas zonas se diferencian las zonas de pantanos litorales y las áreas que presentan procesos de inundación relacionados con la marea.	4.2.1. Pantanos costeros
		4.2.2. Salitral
		4.2.3. Sedimentos expuestos en bajamar

Fuente: IDEAM (2010)

#### 6.5.5 Superficies de agua

Integradas por los cuerpos y cauces de aguas permanentes, intermitentes y estacionales, localizados en el interior del continente y los que bordean o se encuentran adyacentes a la línea de costa continental, como los mares. Se incluyen en esta clasificación los fondos asociados con los mares, cuya profundidad no supere los 12 metros.

**Tabla 5.**

*Unidades de cobertura de la tierra para las superficies de agua.*

NIVEL		
1	2	3
5. SUPERFICIES DE AGUA	5.1. Aguas continentales: Son cuerpos de aguas permanentes, intermitentes y estacionales que comprenden lagos, lagunas, ciénagas, depósitos y estanques naturales o artificiales de agua dulce (no salina), embalses y cuerpos de agua en movimiento, como los ríos y canales (IDEAM, 2010).  5.2. Aguas marítimas: Comprende los cuerpos de agua natural salda y salobre asociada con mares u océanos que bordean el litoral.	5.1.1. Ríos (50 m)
		5.1.2. Lagunas, lagos y ciénagas naturales
		5.1.3. Canales
		5.1.4. Cuerpos de agua artificiales
		5.2.1. Lagunas costeras
		5.2.2. Mares y océanos
		5.2.3. Estanques para acuicultura marina

*Fuente:* IDEAM (2010)

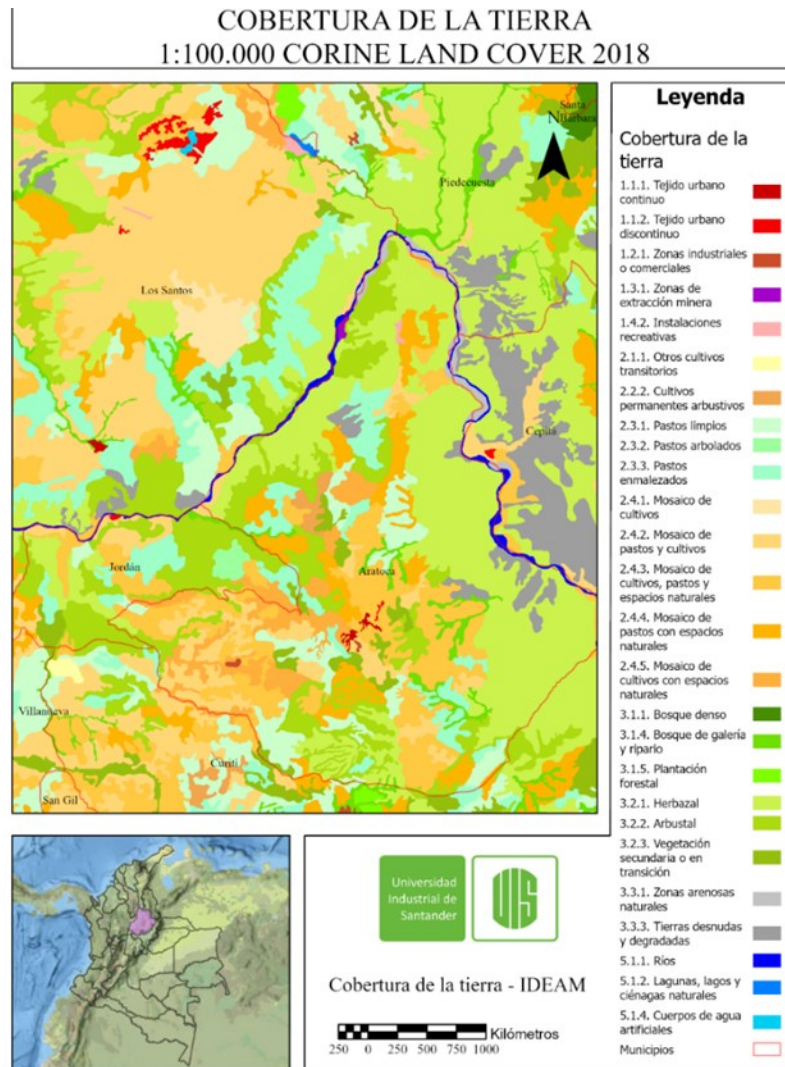
Desde la plataforma oficial de datos cartográficos del país, Colombia en Mapas, se obtiene la clasificación oficial de la cobertura de la tierra, hecho, igualmente con imágenes Landsat, publicado por el IDEAM en el año 2021. Esta clasificación puede ser tomada como referencia, sin embargo, al usarse verificación en campo, el nivel de detalle dentro de la metodología CORINE Land Cover es muy superior a los resultados esperados en el presente estudio. Dicha clasificación puede verse en la **Figura 3.**

### 6.6. Actividad antrópica

Según Stern (como se cita en Condori, 2018), las acciones humanas - como resultado de la vida en sociedad - pueden deteriorar el medio ambiente a través de causas inmediatas. Estas acciones alteran los sistemas ambientales (agua, aire y suelo), generando efectos negativos en las personas a través de fenómenos como el calentamiento global y las sequías. Este impacto repercute en aspectos esenciales de la vida humana, incluidas la agricultura, la biodiversidad y el paisaje. En consecuencia, las actividades antrópicas provocan alteraciones en los ciclos naturales y en los ecosistemas (Condori, 2018, pág. 42).

**Figura 3.**

*Clasificación de la tierra usando metodología CORINE Land Cover para el 2018.*



Fuente: IDEAM (2021) Escala 1:100.000

**6.7. Análisis multitemporal**

El análisis multitemporal en el cauce de ríos es fundamental para comprender la dinámica fluvial a lo largo del tiempo, mediante la comparación de imágenes satelitales o datos topográficos recopilados en diferentes momentos, es posible identificar cambios en la morfología del río, como

la erosión o sedimentación de sus márgenes, el desplazamiento de su cauce, y la evolución de las llanuras aluviales.

Para Jensen (2005) el análisis multitemporal se refiere al proceso de comparar y analizar datos e imágenes recopilados en diferentes momentos temporales para identificar cambios, tendencias y patrones a lo largo del tiempo en un área específica. Este enfoque permite evaluar la respuesta de un río a factores naturales, como las variaciones climáticas o los eventos extremos, así como a actividades humanas que puedan impactar su régimen hidrológico. La aplicación del análisis multitemporal en el estudio de los cauces fluviales contribuye significativamente a la gestión sostenible de los recursos hídricos y a la planificación de medidas de conservación y restauración de los ecosistemas.

Esta técnica de comparación de imágenes satelitales o datos en diferentes momentos, permiten detectar cambios en el uso del suelo, la vegetación, o cualquier otra característica de la superficie terrestre a lo largo del tiempo (Lu & Weng, 2007).

### **6.8. Teledetección**

La teledetección es una técnica que permite obtener información sobre la superficie terrestre sin contacto directo, mediante sensores ubicados en plataformas satelitales o aerotransportadas. Estos sensores registran energía electromagnética reflejada o emitida por los objetos, lo cual facilita el estudio de variables como la cobertura del suelo, la vegetación o las condiciones ambientales, los datos generados son comúnmente procesados a través de Sistemas de Información Geográfica (SIG), que permiten analizarlos, almacenarlos y representarlos espacialmente. Según Chuvieco (2016), las imágenes satelitales están compuestas por matrices de valores numéricos que representan la intensidad de la radiación captada, los cuales pueden ser interpretados digital o visualmente para extraer información temática del territorio. Programas

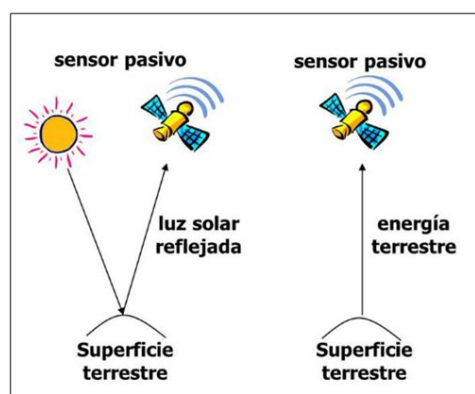
como Landsat, por su cobertura histórica y resolución espacial de 30 metros, son ampliamente utilizados en estudios ambientales y de ordenamiento territorial.

### 6.9. Sensores pasivos

Los sensores remotos pasivos son dispositivos que registran la radiación electromagnética emitida o reflejada de manera natural por los objetos en la superficie terrestre. Su funcionamiento depende de fuentes externas de energía, principalmente la radiación solar, por lo que su operatividad está limitada a condiciones de iluminación diurna y puede verse afectada por la nubosidad atmosférica (Chuvieco, 2010). Este tipo de sensores se utiliza comúnmente en teledetección por satélite y permite recolectar información sobre características físicas del territorio como la vegetación, el agua, los suelos y las áreas urbanas. Los sensores pasivos capturan datos en múltiples bandas espectrales, lo cual facilita la generación de índices espectrales (como NDVI, SAVI o NDBI) y la clasificación de coberturas del suelo (Lillesand et al., 2015). El ejercicio de un sensor pasivo en el contexto de la teledetección puede verse en la Figura 4.

#### Figura 4.

*Funcionamiento de un sensor pasivo*



*Fuente:* Agrotendencia TV (2023)

### **6.10. Resolución espacial**

La resolución espacial se refiere al tamaño del píxel en una imagen, es decir, la menor unidad de superficie que puede ser registrada por el sensor. Una resolución espacial de 30 metros, como en el caso de Landsat, significa que cada píxel representa un área de 30 x 30 metros en el terreno. A menor tamaño de píxel, mayor nivel de detalle espacial (Lillesand et al., 2015).

### **6.11. Resolución espectral**

Esta hace referencia a la cantidad y el ancho de las bandas del espectro electromagnético que el sensor puede captar. Cuantas más bandas tenga y más estrechas sean, mayor será la capacidad del sensor para discriminar diferentes tipos de cobertura (Chuvieco, 2010). Por ejemplo, los sensores de Landsat operan en varias bandas, incluyendo el visible, el infrarrojo cercano (NIR) y el infrarrojo térmico.

### **6.12. Resolución temporal**

Corresponde a la frecuencia con la que un satélite pasa por el mismo punto de la superficie terrestre. Esto es fundamental en estudios multitemporales. Landsat, por ejemplo, tiene una resolución temporal de 16 días, es decir, ofrece una imagen cada 16 días para la misma zona (Jensen, 2005).

### **6.13. Resolución radiométrica**

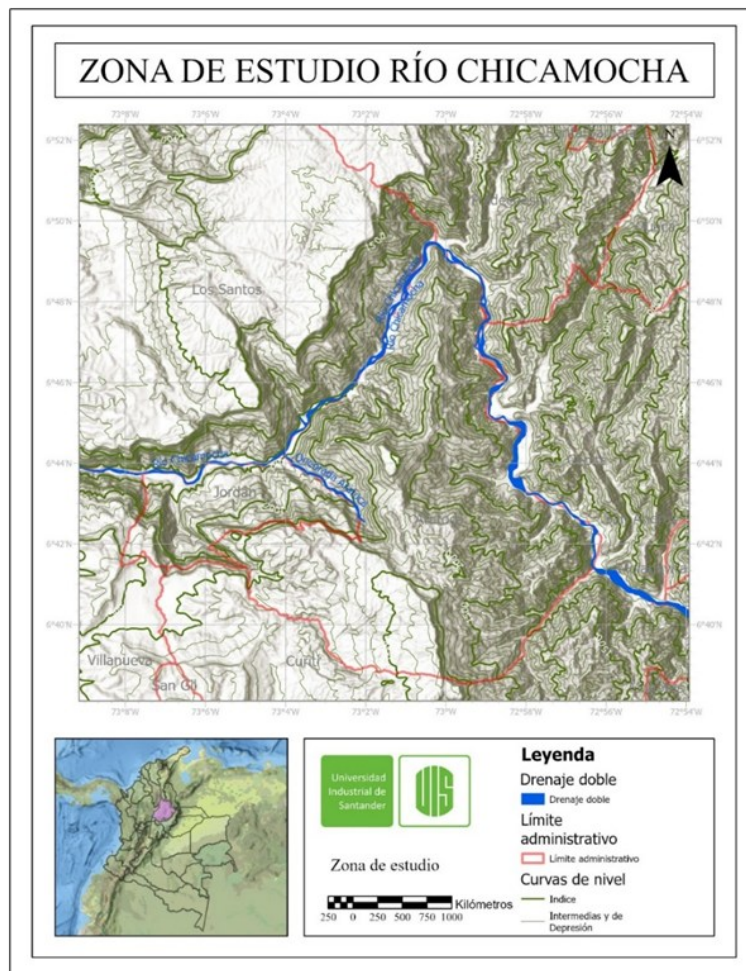
Indica la capacidad del sensor para discriminar diferencias en la intensidad de la energía reflejada o emitida, es decir, cuántos niveles de gris puede distinguir el sensor. Esta se expresa en bits. Por ejemplo, una resolución de 8 bits permite registrar 256 niveles (de 0 a 255), mientras que una de 12 bits permite 4096 niveles, lo que se traduce en mayor sensibilidad (Lillesand et al., 2015).

#### **6.14. Clasificación supervisada**

La clasificación supervisada es una técnica de procesamiento de imágenes satelitales en la cual el analista define previamente clases específicas de cobertura o uso del suelo, basándose en el conocimiento del área de estudio y en muestras representativas conocidas como "entrenamiento" o "firmas espectrales". A partir de estas muestras, el algoritmo clasifica todos los píxeles de la imagen asignándolos a la clase más probable en función de sus características espectrales. Este enfoque permite un mayor control sobre las clases generadas y es especialmente útil cuando se dispone de información de campo o conocimiento experto del territorio (Jensen, 2005).

### **7. Marco Geológico**

La zona de estudio (Figura 5) se encuentra ubicada en el flanco oeste de la Cordillera Oriental Colombiana, y corresponde a la cuenca baja del río Chicamocha entre los municipios de Cepitá y Jordán, limitando al norte con el puente de Pescadero, y al sur con las quebradas Aratoca, San Pedro y El Curo. Correspondiente a un área de 263.78 Km<sup>2</sup> y se encuentra ubicada entre las coordenadas planas X: 1125000 Y: 1250000 y X:1110000 Y: 1235000.

**Figura 5.***Zona de estudio.*

*Fuente:* Modificado del IGAC (2022) Escala 1:150.000

En la Figura 6 se observa la geología del área de estudio a una escala de 1:150.000 agrupada de la siguiente manera:

- Rocas metamórficas predevónicas: Basamento del Macizo de Santander: Neis de Bucaramanga o también denominado Complejo Bucaramanga (Clavijo, 1994 en (Rodríguez & Correa Martinez, 2020)) en esquistos, neis y migmatitas (metamorfismo de alto grado), Esquistos del Silgará compuesto por Filita, esquistos y cuarcitas.

- Rocas ígneas intrusivas del Triásico:
  - Batolito de Mogotes: Ward et al. (1973) clasificaron la roca predominante como cuarzomonzonita, mientras que la clasificación actual la identifica como monzogranito. Además de los monzogranitos, también se encuentran granodioritas en la unidad. El nombre "Batolito de Mogotes" proviene del municipio de Mogotes, en Santander, Colombia, donde se encuentra ubicado. La unidad tiene un tamaño aproximado de 45 km de largo y hasta 21 km de ancho en su parte más ancha y se extiende al oeste de la falla de Bucaramanga. El Batolito de Mogotes está compuesto principalmente por monzogranitos, pero también se encuentran granodioritas en algunas áreas. Las rocas del Batolito de Mogotes muestran un relieve montañoso con aristas subangulosas y drenaje dendrítico. La meteorización varía en intensidad, con presencia de saprolitos en lugares de intensa meteorización (Rodríguez & Correa Martínez, 2020).
  - Granito de Pescadero: su definición como una unidad geológica fue presentada por Ward et al. en 1973. Se mantiene este nombre debido a que cumple con las recomendaciones de la International Subcommission on Stratigraphic Classification of IUGS (1987, 1994). La denominación "Granito de Pescadero" se basa en la litología dominante y toma su nombre de la vereda Pescadero, cerca de Umpalá, municipio de Piedecuesta, donde fue descrito inicialmente. Aunque se propuso como una unidad distinta, se ha discutido si podría formar parte del Batolito de Mogotes. Este plutón se encuentra en las planchas 120-Bucaramanga, 121-Cerrito y 136-Málaga del INGEOMINAS en Colombia y se extiende al occidente de la falla de Bucaramanga con una orientación SENW y una extensión de aproximadamente 22

km y un ancho máximo de 4 km. Sus principales afloramientos están a lo largo de la carretera Piedecuesta-Cepitá. Tiene contactos intrusivos y fallados con el Neis de Bucaramanga al este, la Formación Silgará al oeste y al sur, y el Batolito de Mogotes al sur. Hacia el norte, está en contacto con la Formación Jordán, que contiene fragmentos del Granito de Pescadero. El Granito de Pescadero forma parte del Macizo de Santander, un bloque regional limitado por las fallas de Bucaramanga al oeste, la falla de Oca al norte y la falla de Boconó al este. En términos geológicos, las rocas más frescas se encuentran en las porciones central y meridional, mostrando tonos naranjas y textura fanerítica de grano medio. Hacia el norte, las rocas están más meteorizadas y muestran colores más claros con texturas de grano fino a muy fino. También contiene diques pegmatíticos, aplíticos y otras rocas ígneas (Rodríguez & Correa Martínez, 2020).

- Rocas sedimentarias del Jurásico: Formación Jordán limolita, arenisca de grano fino, parda rojiza, un poco calcárea en las partes más duras y Girón arenisca conglomerática y conglomerado gris amarillento a pardo rojizo, masivos y lenticulares, limolita parda rojiza.
- Rocas sedimentarias del Cretácico:
  - Formación Los Santos: constituida por tres miembros; inferior, conglomerados arenosos y areniscas conglomeráticas rojo grisáceo con cambios faciales hacia el sur; medio, limolitas y arcillolitas color marrón, a areniscas de grano muy fino hacia el oeste; superior, cuarzo areniscas y sublitoareniscas.
  - Formación Rosa Blanca: Caliza gris oscura, masiva, fosilífera, lutita gris oscuro.
  - Formación Paja: lutita negra, blanda en capas delgadas.

- Formación Tablazo: Caliza gris arenosa a arcillosa, fosilífera, arenisca de grano fino y lutita gris.
- Depósitos aluviales del cuaternario: los cuáles descansan discordantemente sobre las diferentes unidades que afloran en el área, a lo largo del drenaje principal y drenajes menores.
- Depósitos coluviales del cuaternario: depósitos de derrubios de pendientes a lo largo del drenaje principal.

Geomorfológicamente el sector se encuentra influenciado por la actividad fluvial del río Chicamocha, uno de los principales agentes modeladores del paisaje. Este sigue una trayectoria más o menos rectilínea en sentido sureste - noroeste, entre las poblaciones de Ricaurte y Pescadero debido al control ejercido por la falla Bucaramanga. Después de abandonar la línea de falla, el río Chicamocha hace un giro de  $120^\circ$  al suroeste para luego girar al noroeste hasta encontrarse con el río Suarez para formar el río Sogamoso (Salcedo & Ramírez, 2015). Durante su trayectoria en el área de estudio, se observan procesos denudacionales (Díaz Vallderuten et al., 2014) y acumulación producto de los depósitos de río y aporte lateral, entre las principales geoformas fluviales se encuentran terrazas, barras, deltas, conos aluviales, laderas erosivas, conos de deyección, llanuras de inundación, entre otras (POMCA, 2019).

Estructuralmente en la zona se encuentra la Falla de Bucaramanga, descrita como un sistema de fallas de rumbo sinistral (Boinet, 1989) con dirección NNW, que controla el cauce del río Chicamocha hasta el sector de Pescadero, municipio de Piedecuesta. En el transecto de Cepitá a Pescadero se evidencia la influencia directa de esta falla, y otras asociadas en la configuración del relieve, dando origen a geoformas morfoestructurales como lomos de presión, espolones facetados, ganchos de flexión. De esta falla se establece que su actividad es posterior al neis de Bucaramanga (Royero y Clavijo 2001 en (García Y. C. et al., 2015; Hernández & Salamanca,

2019)). También se presenta la falla del río Umpalá, la cual sigue el trayecto del río Umpalá, y se extiende a través de rocas ígneas y metamórfica, y de acuerdo con Ward et al., (1973) es una falla de rumbo con desplazamiento lateral derecho que afecta la falla Bucaramanga (Royero & Clavijo, 2001).

Desde el punto de vista litoestratigráfico, las unidades geológicas que se observan en el sector comprenden principalmente rocas ígneas del batolito de mogotes, compuesto por monzogranitos y granodioritas del Jurásico - Cretácico (Rodríguez & Correa Martinez, 2020), así como formaciones sedimentarias como la formación paja (Cretácico Temprano) y la formación Girón (Jurásico Superior), que aportan una base estratigráfica heterogénea. Esta diversidad litológica, observable en los bancos de arena, drenajes dobles y patrones de curvas de nivel del mapa base, influye directamente en la dinámica erosiva y sedimentaria del cauce, favoreciendo procesos de socavación en zonas de alta pendiente y depositación en tramos más planos y amplios. Estas condiciones geológicas y estructurales configuran un entorno de elevada complejidad morfodinámica que condiciona el comportamiento fluvial del río Chicamocha en este tramo.



## 8. Antecedentes

Diversos estudios a nivel nacional e internacional han abordado la transformación de la cobertura del suelo en ecosistemas fluviales, resaltando su impacto sobre la estabilidad geomorfológica, la calidad del agua y la sostenibilidad de los recursos hídricos. En Perú, Pillaca (2015) evidenció cómo la explotación inadecuada de canteras altera la morfología del cauce, afectando infraestructuras hidráulicas aguas abajo. En Colombia, Pantoja y Portilla (2012) analizaron el cambio de cobertura en la selva altoandina y el páramo del volcán Cumbal mientras que Hernández y Salamanca (2019) relacionaron cambios de cobertura vegetal con la generación de caudales pico en la cuenca de Sardinata, identificando un aumento de escorrentía, aunque sin una correlación directa con coberturas específicas.

Otros trabajos han abordado transformaciones paisajísticas complejas, por ejemplo, Mayorga (2022) estudió el área periurbana del norte de Bogotá, revelando la pérdida de conectividad ecológica estructural, proponiendo corredores funcionales a partir de análisis multitemporales basados en la metodología CORINE Land Cover y métricas de paisaje. En el caso particular del río Chicamocha, García y Añez (2017) exploraron la evolución fluvial y geomorfológica del cañón, identificando eventos de captura fluvial y cambios en los patrones de erosión lateral, con base en el análisis de paleoperfiles y DEMs. En conjunto, estas investigaciones evidencian patrones de transformación del paisaje en zonas hidrográficas clave, asociados a expansión urbana, explotación minera o agropecuaria y pérdida de coberturas naturales. Los enfoques metodológicos empleados, incluyendo sensores remotos, modelamiento hidrológico, análisis geomorfológico y clasificación CORINE, ofrecen valiosos referentes para la comprensión de las dinámicas ambientales en cuencas andinas como la del Chicamocha.

## 9. Marco metodológico

La metodología de esta investigación (Figura 7) es de tipo cuantitativo con enfoque descriptivo basada en Peñaloza, Carvajal y Hernandez, 2020, donde se plantea la realización de un análisis multitemporal de la cobertura del suelo en un área de 500 metros a cada lado del cauce del río Chicamocha, considerando que, en algunos tramos, la planicie aluvial y la zona de influencia fluvial alcanzaban ancho de hasta 200 metros, lo cual permita capturar no solo el canal activo, sino también los procesos de socavación lateral, depositación y evolución morfológica de las áreas alrededor del río. Esta zona de análisis busca reflejar la dinámica geomorfológica del sistema fluvial y su interacción con el uso del suelo.

La resolución espacial de las imágenes Landsat (30 metros) permite identificar variaciones significativas en el paisaje, adecuándose al nivel de detalle requerido para este tipo de estudios de escala regional 1:100.000 y siguiendo las recomendaciones del IDEAM en su adaptación de la metodología CORINE Land Cover propuesta en el 2010. La delimitación espacial definida en capítulos anteriores es clave para garantizar la precisión y coherencia en los análisis geoespaciales (Burrough & McDonnell, 1998). Las demás fases de la metodología se presentan a continuación:

### Figura 7.

#### *Fases de la metodología*



**Fase 1: Revisión de bibliografía, recopilación de información:**

En primer lugar, se obtiene literatura enfocada a la clasificación de la cobertura del suelo con la metodología CORINE Land Cover adaptado por el IDEAM para Colombia en el año 2010 a partir de imágenes satelitales que den luz y viabilidad al documento presente. Luego, se obtiene sobre la zona de estudio, estos datos corresponden a información temática, cartográfica y satelital.

Considerando la escala regional (1:100.000) en la que se desarrolla este estudio, se descarga la información vectorial del área de interés, incluyendo los límites administrativos, la red de drenaje correspondiente al río Chicamocha, desde el repositorio oficial del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), a través de su plataforma *Colombia en Mapas*, que actúa como fuente oficial de cartografía temática y base geoespacial del país.

Las imágenes satelitales Landsat 5 TM (para el año 2000) y Landsat 8 OLI (para el año 2018) son de temporada seca ya que, en época de lluvias, las áreas suelen estar cubiertas por nubes, humedad atmosférica y vegetación transitoria, esto dificulta la correcta clasificación y genera ruido en los datos espectrales (Chuvienco, 2016). En cambio, durante la estación seca, los suelos están más expuestos, la vegetación es más estable y los cuerpos de agua tienen límites más definidos. Adicionalmente, se puede minimizar las limitaciones provocadas por interferencia atmosférica y nubosidad, lo cual facilita su interpretación y procesamiento (Jensen, 2005).

Así mismo, en temporada de lluvias, el río puede experimentar crecidas temporales que distorsionan su morfología real. En época seca, el cauce visible corresponde más fielmente a su forma estructural, útil para el análisis fluvial (Munro, 2010) Por lo anterior, ambas imágenes corresponden al mes de septiembre, mes de transición entre temporada seca a temporada de lluvias, que se descargan directamente desde la plataforma USGS Earth Explorer con la resolución esperada de 30 metros y las siguientes bandas:

**Tabla 6.***Bandas de Landsat 5. Fuente: USGS (2021)*

Banda	Nombre	Rango espectral ( $\mu\text{m}$ )	Resolución espacial (m)	Aplicaciones comunes
1	Azul	0.45 – 0.52	30	Análisis de cuerpos de agua, vegetación en estado inicial
2	Verde	0.52 – 0.60	30	Salud de la vegetación, visualización general
3	Rojo	0.63 – 0.69	30	Detección de límites entre suelos y vegetación
4	Infrarrojo cercano (NIR)	0.76 – 0.90	30	Biomasa, vigor de la vegetación, penetración en agua
5	Infrarrojo medio (SWIR 1)	1.55 – 1.75	30	Contenido de humedad del suelo y vegetación, incendios
6	Infrarrojo térmico	10.40 – 12.50	120 (reproyectado a 30 m)	Temperatura superficial, humedad del suelo
7	Infrarrojo medio (SWIR 2)	2.08 – 2.35	30	Discriminación de tipos de rocas y suelos

**Tabla 7.***Bandas de Landsat 8. Fuente: USGS (2021)*

N° de Banda	Nombre	Rango espectral ( $\mu\text{m}$ )	Resolución espacial (m)	Uso principal
1	Coastal/Aerosol	0.43 – 0.45	30	Penetración en aguas costeras, corrección atmosférica
2	Azul (Blue)	0.45 – 0.51	30	Análisis de cuerpos de agua, vegetación poco densa
3	Verde (Green)	0.53 – 0.59	30	Salud de la vegetación, observación de algas
4	Rojo (Red)	0.64 – 0.67	30	Discriminación de vegetación, suelos y usos urbanos
5	Infrarrojo cercano (NIR)	0.85 – 0.88	30	Cálculo de NDVI, delimitación de áreas vegetadas
6	Infrarrojo medio (SWIR 1)	1.57 – 1.65	30	Evaluación de humedad del suelo, tipo de vegetación
7	Infrarrojo medio (SWIR 2)	2.11 – 2.29	30	Identificación de suelos, detección de incendios y áreas quemadas
8	Panromática (Panchromatic)	0.50 – 0.68	15	Mejora de resolución espacial mediante fusión (pan-sharpening)
9	Cirrus	1.36 – 1.38	30	Detección de nubes delgadas de gran altitud
10	Infrarrojo térmico (Thermal Infrared 1 - TIRS 1)	10.60 – 11.19	100*	Análisis térmico, temperatura superficial terrestre
11	Infrarrojo térmico (Thermal Infrared 2 - TIRS 2)	11.50 – 12.51	100*	Aplicaciones térmicas, humedad del suelo, vulcanología

## Fase 2: Preprocesamiento de imágenes satelitales

Las imágenes seleccionadas se descargan desde la plataforma USGS Earth Explorer, las cuales corresponden a productos procesados al nivel de Surface Reflectance (SR), es decir, ya han sido sometidas a corrección atmosférica por el proveedor. Posteriormente, se utiliza la capa de drenaje sencillo proporcionada por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) para el río Chicamocha, sobre la cual se genera un buffer de 500 metros a cada lado del cauce, definiendo así el Área de Interés (AOI).

Con base en este polígono, se realiza el recorte espacial de las imágenes satelitales mediante la herramienta de administración de datos Clip Raster en ArcGIS Pro, limitando el procesamiento exclusivamente al área de estudio y optimizando los recursos de máquina.

Posteriormente, se hacen combinaciones de bandas multiespectrales con el fin de facilitar la interpretación visual y preparar las condiciones para la clasificación supervisada. Dichas combinaciones se hacen a partir de las diferentes bandas que trae la plataforma Landsat que permiten hacer un reconocimiento de las clases (coberturas determinadas por el IDEAM a través de la metodología CORINE Land Cover) que se están observando en las escenas, por ejemplo, el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) permite detectar vegetación sana (Rouse et al., 1974), que a su vez, facilita la extracción de muestras para la clasificación, teniendo en cuenta que hay firmas espectrales previamente determinadas para cada cobertura (Chuvieco, 2010).

$$NDVI = \frac{NIR - ROJO}{NIR + ROJO}$$

Además del NDVI, la literatura recomienda el uso de otros índices que aportan a la discriminación de las clases de cobertura del suelo:

- NDWI (Índice de Agua de Diferencia Normalizada): útil para detectar cuerpos de agua superficiales (McFeeters, 1996).

$$NDWI = \frac{(GREEN - NIR)}{(GREEN + NIR)}$$

- NDBI (Índice de Diferencia Normalizada Edificada): para identificar áreas urbanizadas superficies impermeables (Zha et al., 2003).

$$NDBI = \frac{(SWIR - NIR)}{(SWIR + NIR)}$$

- SAVI (Índice de Vegetación Ajustado al Suelo): mejora la detección de vegetación en zonas con influencia de suelo desnudo (Huete, 1988)

$$SAVI = \left( \frac{NIR - R}{NIR + R + L} \right) * (1 + L)$$

- BSI (Índice de suelo desnudo): ayuda a identificar suelos descubiertos y áreas erosionadas.

$$BSI = \frac{(ROJO + SWIR) - (NIR + AZUL)}{(ROJO + SWIR) + (NIR + AZUL)}$$

Teniendo en cuenta los índices aquí mencionados, se explica en la siguiente tabla, las bandas necesarias de Landsat 5 y Landsat 8 necesarias para completar el estudio:

**Tabla 8.**

*Bandas utilizadas en el estudio*

Banda Landsat 5	Bandas Landsat 8	Nombre
1	2	Azul
2	3	Verde
3	4	Rojo
4	5	Infrarrojo cercano (NIR)
5	6	Infrarrojo medio (SWIR 1)

### **Fase 3: Clasificación supervisada y análisis multitemporal**

Para este estudio, se elige el algoritmo de Máxima Verosimilitud (Maximum Likelihood Classification - MLC) debido a su solidez estadística y su comprobada eficacia en estudios de cambio de uso del suelo definidos en la primera fase de revisión de bibliografía. Este método asume que los datos de cada clase siguen una distribución normal multivariada y utiliza tanto la

media como la varianza de cada firma espectral para asignar probabilísticamente cada píxel a la clase más probable (Jensen, 2005).

Se toman 50 muestras por clase, según las recomendaciones definidas por la literatura para obtener resultados óptimos con el algoritmo de Máxima Verosimilitud, definiendo las clases a partir del nivel 3 de la metodología CORINE Land Cover (Peñaloza et al., 2020), las características del área mencionadas en capítulos anteriores y la fotointerpretación a través de las imágenes de la siguiente forma:

**Tabla 9.**

*Muestras necesarias para la clasificación según la metodología CORINE Land Cover*

Código CLC	Clase sugerida	Descripción
1.1.2	Zonas urbanas discontinuas	Áreas urbanizadas de densidad media-baja, con edificaciones separadas por jardines, parques, áreas verdes u otros espacios abiertos.
1.3.1	Zonas de extracción minera	Áreas dedicadas a la extracción de minerales o materiales de construcción, canteras y minas a cielo abierto.
2.3.1	Pastos limpios	Áreas cubiertas principalmente por pastos homogéneos, con escasa o nula presencia de árboles o arbustos, destinadas a pastoreo o corte.
2.3.3	Pastos enmalezados	Pastizales con presencia significativa de especies invasoras, arbustos dispersos o vegetación no gestionada.
2.4.2	Mosaico de pastos y cultivos	Áreas en las que se alternan parcelas de pastos con áreas cultivadas, generando un patrón heterogéneo.
2.4.3	Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	Zonas rurales donde conviven cultivos, pastizales y fragmentos de vegetación natural (bosques, arbustales o cuerpos de agua pequeños).
2.4.4	Mosaico de pastos con espacios naturales	Áreas dominadas por pastos entremezclados con coberturas naturales, tales como fragmentos de bosque o vegetación secundaria.
3.1.4.	Bosque de galería y ripario	Bosques ubicados a lo largo de ríos y quebradas, con especies adaptadas a condiciones de humedad, cumpliendo funciones de protección ribereña.
3.2.1	Herbazal	Áreas dominadas por hierbas de porte bajo, generalmente de crecimiento espontáneo, en ambientes abiertos.
3.2.2	Arbustal	Áreas cubiertas por vegetación de porte arbustivo, de altura media, con escaso o nulo arbolado.
3.3.1	Zonas arenosas naturales	Playas, bancos de arena, áreas fluviales o costeras con sustrato arenoso expuesto de forma natural.
3.3.3	Tierras desnudas y degradadas	Superficies de suelo expuesto sin cobertura vegetal, afectadas por erosión, sobrepastoreo o degradación extrema.
5.1.1	Ríos	Cuerpos de agua naturales que fluyen sobre un cauce.

Ahora bien, el MLC es ampliamente recomendado cuando se cuenta con muestras representativas y cuando se busca maximizar la precisión en la clasificación de coberturas con características espectrales similares, lo cual es común en zonas de transición agrícola o ribereña (Congalton & Green, 2009). Además, este algoritmo está integrado de forma nativa en ArcGIS Pro

a través de la herramienta *Maximum Likelihood Classification*, con la extensión *Spatial Analyst*, que se ejecutan gracias al trial de 21 días, facilitando su aplicación y validación posterior.

#### Fase 4: Comparación temporal y análisis de cambios

Posteriormente, se aplica una comparación espacial post-clasificación con el fin de identificar las transformaciones en la cobertura del suelo y en el cauce fluvial. Para ello, se utilizan herramientas de detección de cambios en ArcGIS Pro que permiten superponer los mapas clasificados y calcular estadísticas sobre la transición entre clases. En ArcGIS Pro, una manera precisa de detectar los cambios entre dos mapas clasificados (por ejemplo, cobertura del año 2000 y del 2018) es aplicar una operación de resta pixel a pixel con la herramienta *Raster Calculator* dentro de la caja de herramientas *Spatial Analyst*. Este proceso consiste en restar el ráster de 2018 menos el ráster de 2000:

$$\text{Salida} = \text{Raster2018} - \text{Raster2000}$$

Un valor 0 en el ráster resultante indica que la clase no cambió entre los dieciocho años. Un valor distinto de 0 indica que hubo una transformación en la clase de cobertura, y el número resultante representa el tipo de cambio específico. Al final podrá visualizar una matriz de cambio de cobertura entre los años 2000 y 2018 que se verá como en la Tabla 10.

#### Tabla 10.

*Ejemplo de resultados esperados y su interpretación*

Clase / Año	Bosque Natural (1)	Cultivos Permanentes (2)	Pastos (3)	Zonas Urbanas (4)	Sin Información (0)	Total 2000
<b>Bosque Natural (1)</b>	1234 ha	210 ha	89 ha	15 ha	3 ha	1551 ha
<b>Cultivos Permanentes (2)</b>	140 ha	1870 ha	321 ha	30 ha	2 ha	2363 ha
<b>Pastos (3)</b>	50 ha	280 ha	1420 ha	10 ha	5 ha	1765 ha
<b>Zonas Urbanas (4)</b>	8 ha	12 ha	6 ha	350 ha	1 ha	377 ha
<b>Total 2018</b>	1432 ha	2372 ha	1836 ha	405 ha	11 ha	6056 ha

Adicional a la matriz de análisis, se puede verificar la información espacial a través de un mapa en formato PDF con calidad de impresión, que permite la visualización detallada de los resultados obtenidos. Este insumo cartográfico constituye una herramienta clave para la validación visual de los cambios espaciales, que permita identificar con claridad las transformaciones morfológicas y las variaciones en las coberturas del suelo en las zonas adyacentes al río Chicamocha durante el periodo de estudio.

## **10. Resultados**

### **Fase 1: Revisión de bibliografía, recopilación de información:**

En esta fase se logra compilar y analizar literatura técnica y científica relevante sobre la clasificación de la cobertura del suelo mediante la metodología CORINE Land Cover, adaptada al contexto colombiano por el IDEAM (2010). Este marco teórico y metodológico proporciona los lineamientos para la selección de clases, la escala de análisis y los criterios de interpretación espectral de las coberturas en el área de estudio que han sido mencionados y explicados a lo largo del documento.

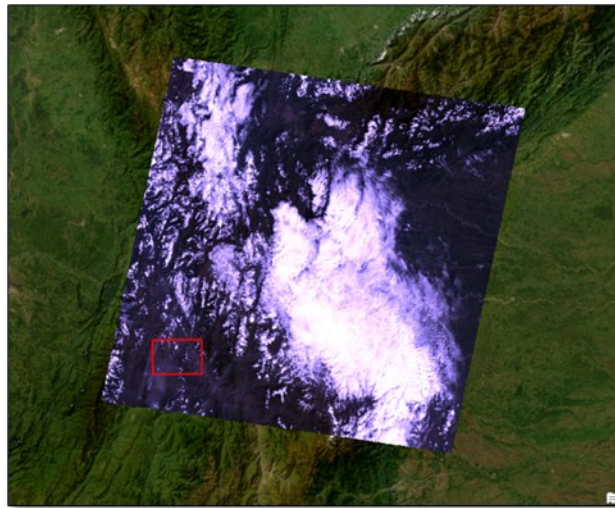
Se descarga y organiza la información temática y cartográfica básica del área de interés, incluyendo los límites administrativos de los municipios de Cepitá y Jordán, y la red hidrográfica del río Chicamocha, filtrando únicamente el afluente principal, obtenidos desde la plataforma oficial Colombia en Mapas del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).

En cuanto a los datos satelitales, se seleccionan y descargan imágenes Landsat 5 TM (año 2000) y Landsat 8 OLI (año 2018), provenientes del portal oficial USGS Earth Explorer. En primer lugar, se pensó en el mes de diciembre ya que hace parte de la temporada seca para Colombia, sin

embargo, las escenas de Landsat para el año 2000 estaban bastante limitadas y con presencia de nubes, tal y como se aprecia en la Figura 8.

**Figura 8.**

*Imagen para diciembre del año 2000 Landsat 5.*



Por consiguiente, las imágenes descargadas para el estudio corresponden al mes de septiembre, mes de transición hacia la temporada de lluvias, elegido para minimizar la nubosidad y mejorar la visibilidad de las unidades de cobertura y del cauce fluvial. Las imágenes cuentan con resolución espacial de 30 metros, y se obtuvieron las bandas multispectrales necesarias para la generación de combinaciones de bandas, índices espectrales y clasificación supervisada. Estas imágenes fueron verificadas para asegurar la mínima presencia de nubes y una adecuada calidad para los análisis posteriores.

Esta información fue organizada en una base de datos espacial que puede ser consultada y verificada mediante el uso de software de Sistemas de Información Geográfica, como ArcGIS Pro. La base de datos integra, en primer lugar, la cartografía vectorial de contexto de la zona de estudio y luego, se puede observar las capas ráster derivadas de las imágenes satelitales, en bandas individuales de Landsat 5 (LT05) y Landsat 8 (LC08), identificadas por su respectiva

nomenclatura según el sensor de cada satélite. La estructura y contenido de la base de datos espacial puede verificarse en la Figura 9.

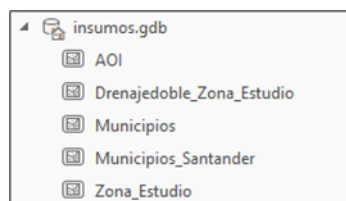
**Tabla 11.**

Insumos utilizados

Tipo de insumo	Fuente oficial	Detalles / características principales
Literatura técnica y científica	IDEAM (2010), Chuvieco (2016), (Peñaloza et al., 2020), (Condori, 2018), (Zha et al., 2003), (Hernández & Salamanca, 2019), (Pantoja & Portilla, 2012)	Documentación sobre CORINE Land Cover adaptado a Colombia, análisis fluvial, teledetección y cambios de morfologías tanto para el área de estudio como para otras zonas. Dicha literatura ha sido nombrada y utilizada a lo largo de todo el documento.
Límites administrativos	Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) Colombia en Mapas	Límites municipales de Cepitá y Jordán. Formato vectorial (shapefile) año 2022
Red hidrográfica	IGAC – Colombia en Mapas	Red de drenaje: cauce del río Chicamocha año 2022
Imágenes satelitales Landsat 5 TM	USGS Earth Explorer	Año 2000, mes de septiembre, resolución 30 m, bandas multiespectrales.
Imágenes satelitales Landsat 8 OLI	USGS Earth Explorer	Año 2018, mes de septiembre, resolución 30 m, bandas multiespectrales.
Información temática adicional	IGAC / otras fuentes	Curvas de nivel, suelos, unidades geológicas.

**Figura 9.**

*Base de datos inicial*



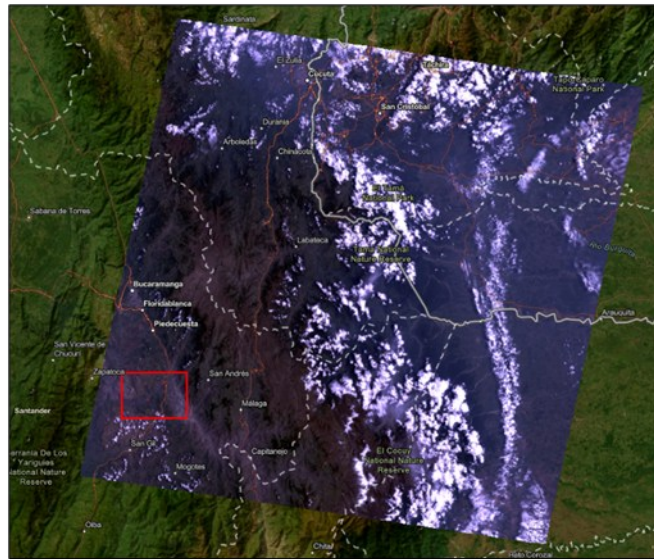
## Fase 2: Preprocesamiento de imágenes satelitales

En esta fase se completa el preprocesamiento de las imágenes Landsat 5 TM para el año 2000 (Figura 10) y Landsat 8 OLI para el año 2018 (Figura 11), previamente descargadas como productos Surface Reflectance (SR) desde el portal USGS Earth Explorer, con corrección atmosférica de origen, dicha corrección con la que venían las imágenes es verificada a través del software ArcGIS Pro y se corrobora con los metadatos que el ángulo de posición del sol es comparable para ambas escenas. Adicional, las imágenes de Landsat 8, al provenir de un sensor más moderno (2013) en comparación con Landsat 5 (1984), poseen una resolución radiométrica de 16 bits, por lo cual, fue necesario hacer la transformación de todas las bandas de Landsat 8 a

una profundidad de 8 bits, esto para que nuevamente, puedan ser comparados los resultados de la clasificación para ambos años.

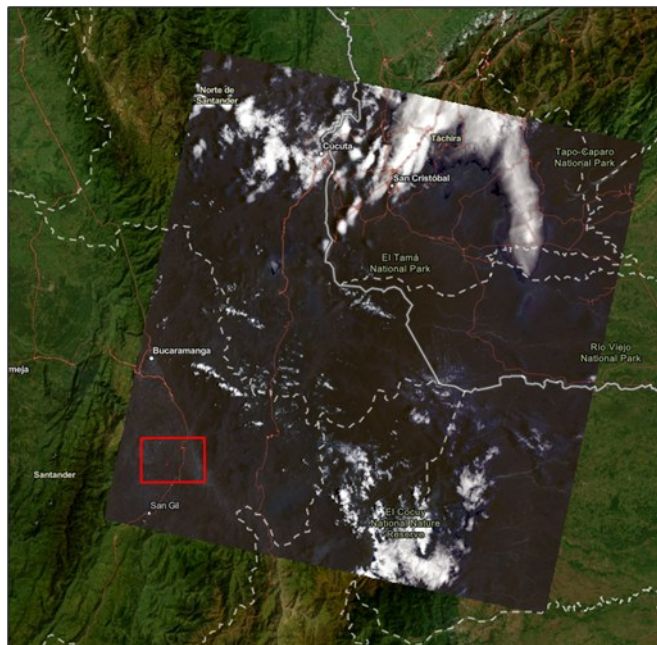
**Figura 10.**

*Imágen satelital Landsat 5 del 4 de septiembre del 2000 y el área de estudio.*



**Figura 11.**

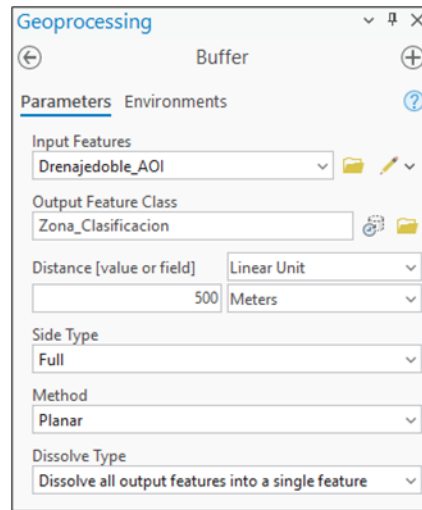
*Imágen satelital Landsat 8 del 18 de septiembre del 2018 y el área de estudio.*



A partir de la red de drenaje oficial del IGAC, se generó el polígono correspondiente al área de influencia de 500 metros a cada lado del cauce del río Chicamocha, utilizando el geoprocesamiento Buffer del software ArcGIS Pro (Figura 12).

**Figura 12.**

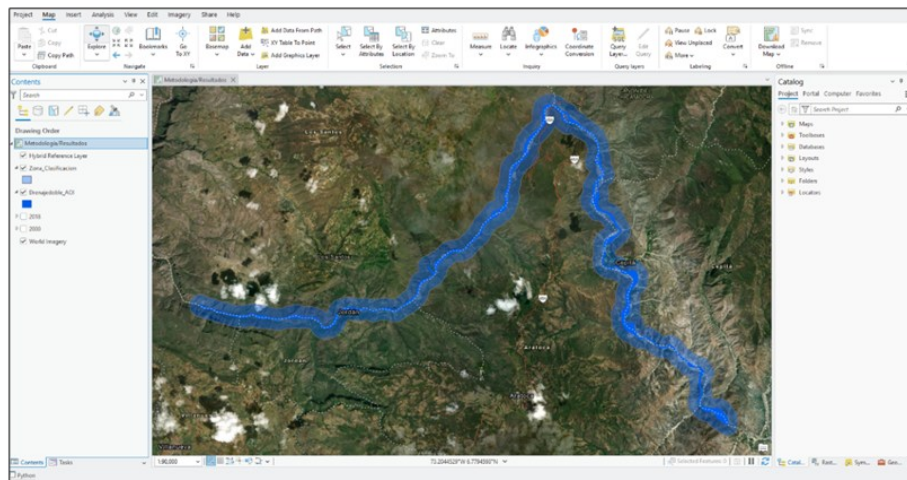
*Geoprocesamiento Buffer*



Esto sirvió como base para definir el Área de Interés (AOI) del análisis, como se aprecia en la Figura 13.

**Figura 13.**

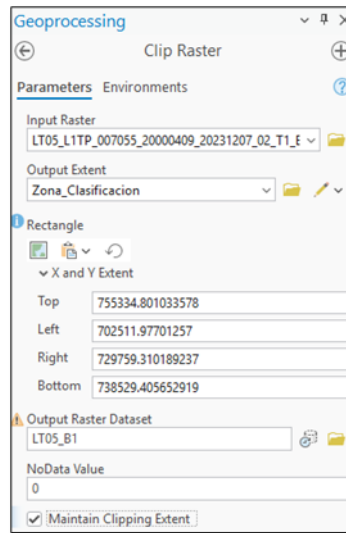
*Buffer aplicado a través de ArcGIS Pro*



Con este polígono se realizó el recorte espacial de ambas imágenes mediante la herramienta *Clip Raster* de ArcGIS Pro. En la Figura 14 se muestra la ejecución del geoprocesamiento para el recorte de la imagen Landsat 5 del año 2000.

**Figura 14.**

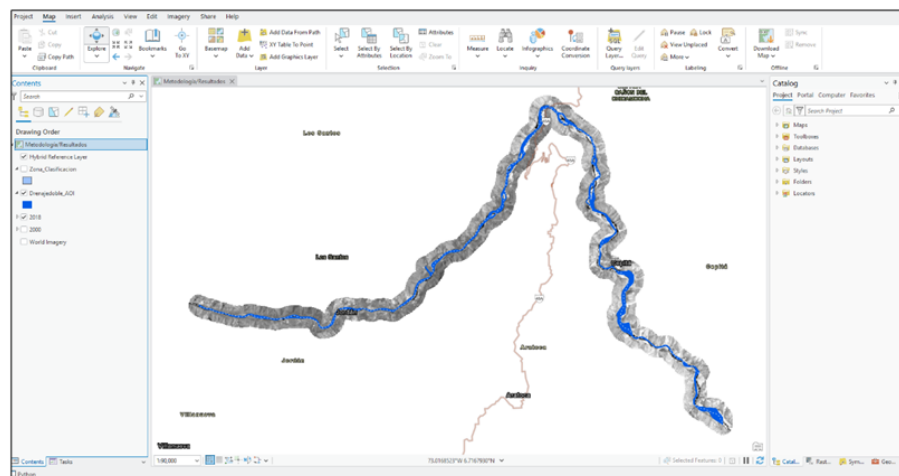
*Uso del geoprocesamiento Clip Raster*



Así se limita el procesamiento a la zona de estudio (Figura 15) y optimizando el uso de recursos computacionales.

**Figura 15.**

*Imagen satelital recortada según el AOI.*

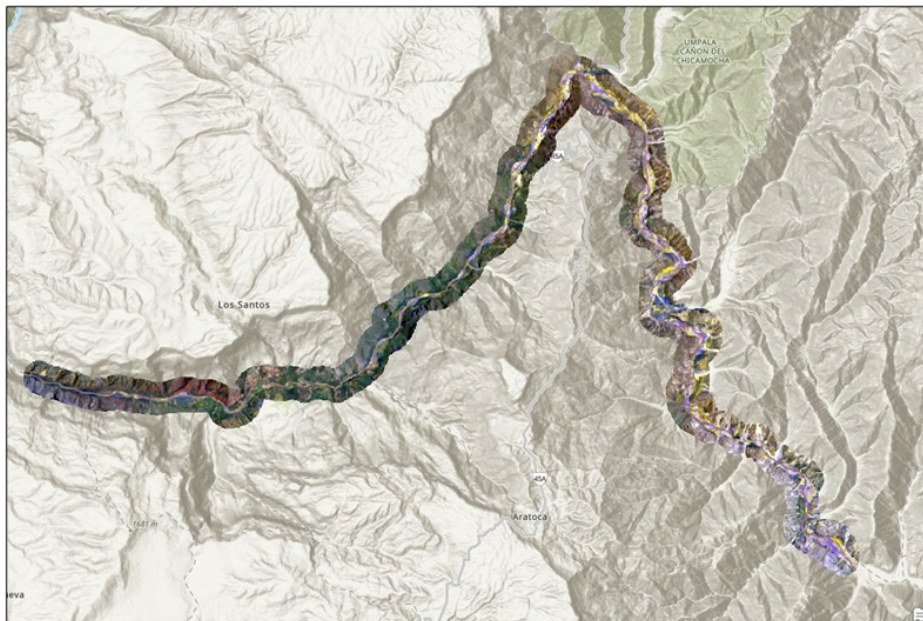


Como parte del preprocesamiento, se generaron combinaciones de bandas multiespectrales y se calcularon diversos índices espectrales que facilitaron la interpretación visual y la identificación preliminar de las clases de cobertura, separando la vegetación, también la vegetación sin la influencia del suelo, el agua y las zonas húmedas, el suelo desnudo y posibles edificaciones u hormigón presente en la zona.

La elaboración de los índices espectrales es importante para definir las clases ya que para el observador es difícil determinar la cobertura en imágenes con resoluciones espaciales como las de Landsat, además, que el rango visible del ojo humano es muy limitado en contraste con las capacidades que ofrece el sensor. Por ejemplo, en la siguiente composición de bandas RGB 4,3,2 para Landsat 8, que representan el color natural o visible, es decir, como el ojo humano percibe, el nivel de abstracción de la realidad, sin hablar de la geomorfología de la zona, es bastante limitado, como se observa en la Figura 16:

**Figura 16.**

*Composición de bandas espectrales Landsat 8 para color natural en la zona de estudio.*



Aquí es donde cobra aún más sentido la elaboración de índices espectrales que se centran en la detección de una clase en específico de la superficie de la tierra y facilitará la extracción de muestras.

Dentro del software ArcGIS Pro, existe una herramienta llamada *Raster calculator* que permite hacer las diferentes operaciones entre las bandas para obtener los índices requeridos. Dichas operaciones han sido estudiadas lo suficiente para volverse estándar según el sensor y satélite utilizado (Chuvieco, 2010), por ejemplo, para calcular el índice NDVI se debe aplicar la siguiente ecuación en Landsat 5:

$$NDVI = \frac{\text{Banda 4} - \text{Banda 3}}{\text{Banda 4} + \text{Banda 3}}$$

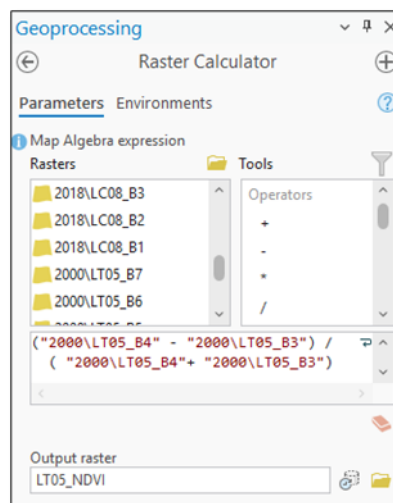
En términos generales, para cualquier otro satélite, es lo mismo que decir:

$$NDVI = \frac{NIR - ROJO}{NIR + ROJO}$$

En ArcGIS Pro, se ejecuta de la siguiente forma:

### Figura 17.

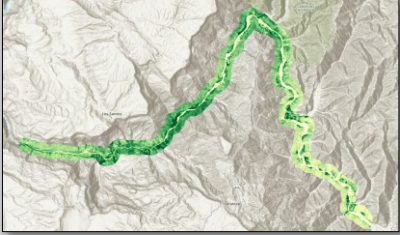









*Uso del geoprocesamiento Raster Calculator*



Usando el mismo procedimiento, se calcularon los índices mencionados en la metodología.

Los resultados se pueden observar en la siguiente tabla:

**Tabla 12.***Índices espectrales calculados en el área de estudio*

Índice	Año 2000	Año 2018
NDVI		
NDWI		
NDBI		
SAVI		
BSI		

Las bandas de las imágenes satelitales recortadas y los índices visualizados en la figura 18. se encuentran en una segunda base de datos espacial donde se guardan los productos cartográficos generados a lo largo de este capítulo (Figura 18)

**Figura 18.**

*Base de datos de resultados.*



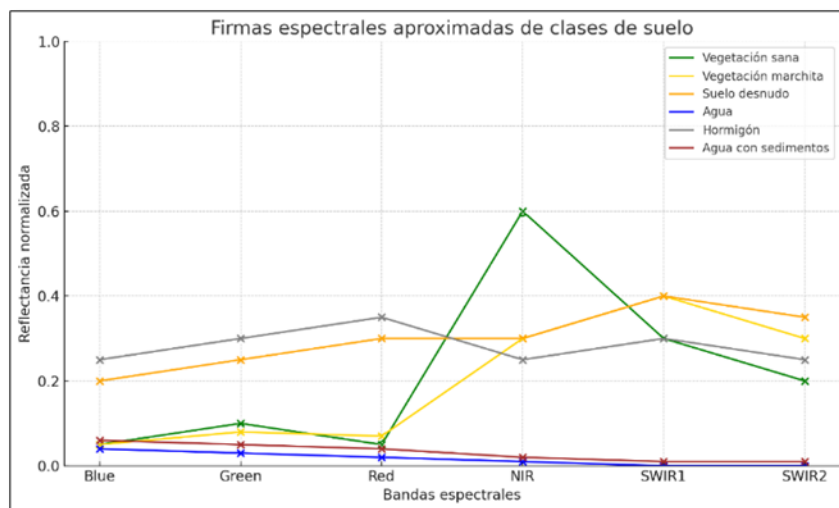
En la literatura actual existen bancos de firmas espectrales que permiten no solo extraer más información de las imágenes satelitales, sino que además de los índices, las firmas espectrales dan a entender qué tipo de vegetación o en general, qué cobertura está siendo identificada.

Las firmas espectrales presentadas en la Figura 19 reflejan la variación en la reflectancia normalizada de diferentes clases de cobertura del suelo en función de las bandas espectrales de

Landsat. Esta caracterización es fundamental para la aplicación de la metodología CORINE Land Cover, ya que permite la identificación y asociación precisa de las clases temáticas mediante la comparación de las respuestas espectrales de los píxeles de las imágenes. Por ejemplo, el agua y el agua con sedimentos muestran una baja reflectancia en todas las bandas, aunque con una leve elevación en las bandas visibles debido a la turbidez. Estas diferencias espectrales permiten entrenar adecuadamente los algoritmos de clasificación supervisada utilizados en el estudio, asegurando coherencia con las categorías CORINE Land Cover adaptadas por el IDEAM para Colombia.

### Figura 19.

*Firmas espectrales generales para Landsat*



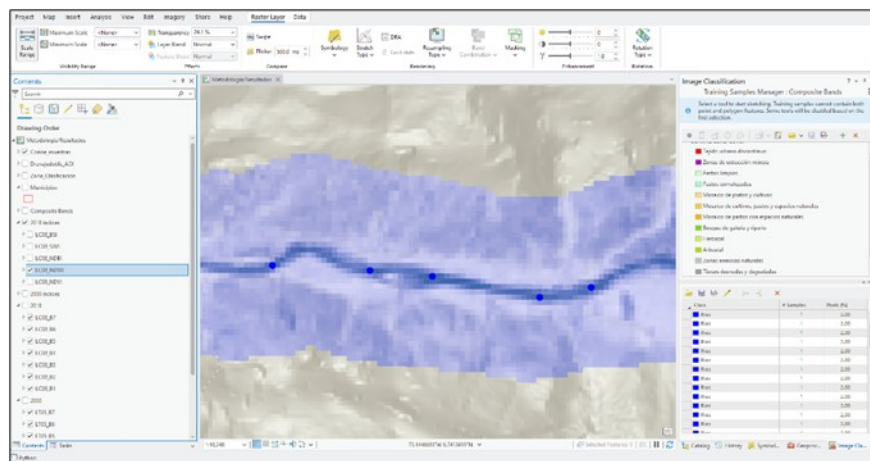
Estos productos intermedios son clave para la selección de muestras de entrenamiento para la clasificación supervisada y para el reconocimiento preliminar de los cambios de cobertura en el área de estudio.

### Fase 3: Clasificación supervisada y análisis multitemporal

Con base a la bibliografía consultada a lo largo de la presente investigación, para obtener una buena clasificación supervisada a través del algoritmo de clasificación de máxima verosimilitud o *Maximum Likelihood Classification* disponible en el software ArcGIS Pro, se requieren, como mínimo 50 muestras de pixeles de las clases que se quieren como resultado. En la Figura 20 se muestra cómo es la selección de muestras para la clase río. Para clases que son más difíciles de identificar con el ojo humano, se hizo uso de las firmas espectrales. Por tanto, y usando los productos de la fase anterior se obtiene la siguiente cantidad de muestras por clase (Tabla 13).

**Figura 20.**

*Levantamiento de muestras del río para entrenar el algoritmo de clasificación*



**Tabla 13.**

*Muestras tomadas para la imagen 2018.*

Código CLC	Clase sugerida	Número de muestras
1.1.2	Zonas urbanas discontinuas	15
1.3.1	Zonas de extracción minera	10
2.3.1	Pastos limpios	45
2.3.3	Pastos enmalezados	30
2.4.2	Mosaico de pastos y cultivos	80
2.4.3	Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	80
2.4.4	Mosaico de pastos con espacios naturales	13
3.1.4.	Bosque de galería y ripario	23
3.2.1	Herbazal	70

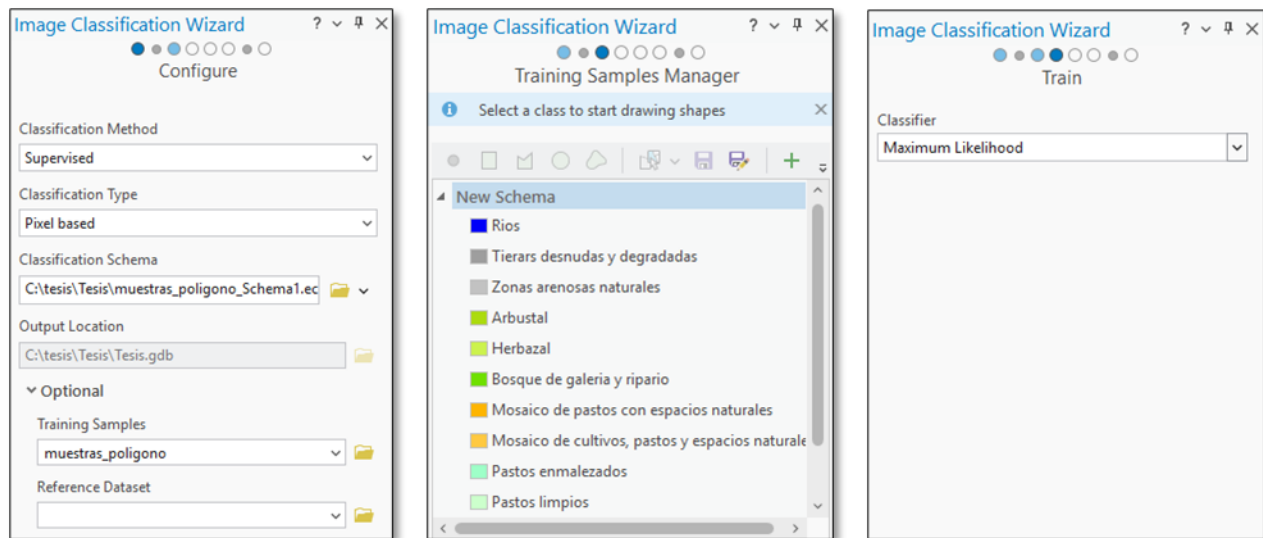
Código CLC	Clase sugerida	Número de muestras
3.2.2	Arbustal	60
3.3.1	Zonas arenosas naturales	34
3.3.3	Tierras desnudas y degradadas	55
5.1.1	Ríos	50

Asimismo, como se mencionó en la metodología, según los estudios previos de la zona, en la anterior tabla se puede observar las clases que se pueden identificar en el Área de Estudio, sin embargo, a la hora de levantar las muestras de cada clase para entrenar el algoritmo de clasificación, varias de estas no alcanzan el mínimo requerido de muestras como por ejemplo, el mosaico de pastos con espacios naturales, debido a que estos con los mosaicos de cultivos, pastos y espacios naturales son muy similares, sobre todo con la resolución espacial de las imágenes Landsat, el algoritmo fácilmente los confunde, por tanto, la clasificación obtenida en esta primera tentativa no resulta satisfactoria, ya que muchas de las clases entrenadas no aparecen en la clasificación y zonas muy definidas como el mismo río aparecen sin continuidad.

Para ejecutar una clasificación mediante el algoritmo de máxima verosimilitud en ArcGIS Pro se utiliza la herramienta de *Image Classification Wizard* la cual ofrece una guía para el usuario de forma secuencial en el proceso de preparación. En primer lugar, se define el tipo de clasificación a realizar, en este caso, una clasificación supervisada basada en píxeles. Posteriormente, el esquema de clases es generado automáticamente por el software a partir de las muestras de entrenamiento previamente cargadas. Finalmente, el algoritmo se entrena usando dichas muestras. Este procedimiento se resume en la Figura 21.

Uso del geoprocetamiento Image Classification Wizard

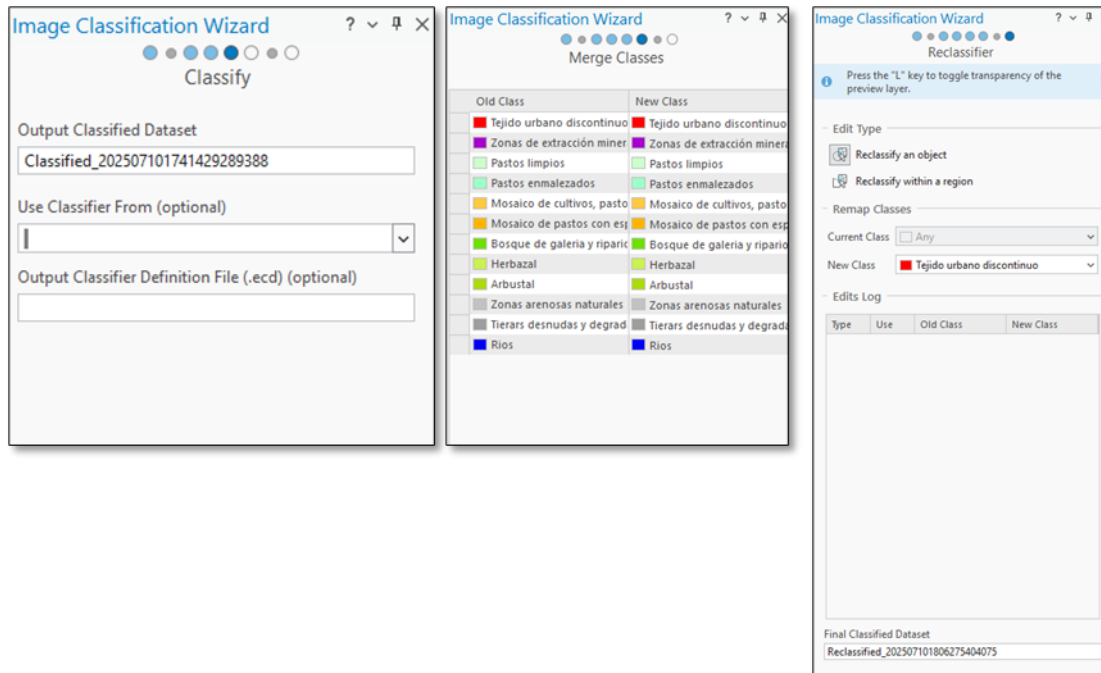
**Figura 21.**

*Uso del geoprocesamiento Image Classification Wizard*

Una vez se ejecutaban los primeros tres pasos, se especifica el nombre del archivo de salida, que, para el caso de las primeras pruebas, se dejó el nombre por defecto. Luego, en la sección *Merge classes*, el software permite agrupar clases similares o redundantes para facilitar la interpretación y armonizar la clasificación con la leyenda CORINE Land Cover adaptada por el IDEAM. Aquí se revisan las clases antiguas (determinadas por las muestras) y las nuevas (arrojadas por el algoritmo clasificador), asegurando que no se dupliquen coberturas y que se mantenga la coherencia. Finalmente se ejecuta el paso de *Reclassifier* para realizar ajustes puntuales en la clasificación, reasignando manualmente aquellos píxeles que fueron erróneamente etiquetados por el algoritmo y que son de fácil detección (Figura 22)

**Figura 22.**

*Uso del geoprocesamiento Image Classification Wizard parte 2*

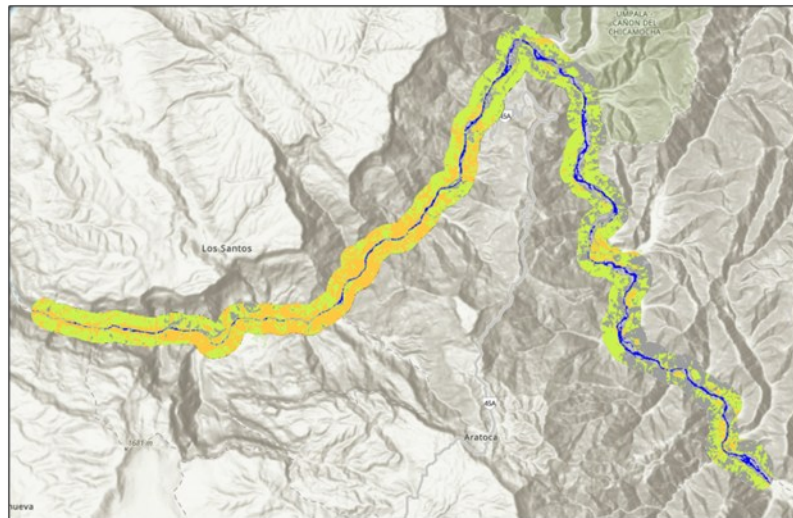


Finamente y como último paso, el software ArcGIS Pro presenta el error *002088: La clase de entidad no contiene información suficiente para la formación supervisada*. Así pues, se observa claramente que la clasificación no es satisfactoria y el software tampoco puede completar la validación cruzada para determinar el ajuste de los datos por parte del modelo. Esto sucede debido a que las clases se asemejan mucho espectralmente y el software necesita más información para poder diferenciar una clase de otra.

Por ejemplo, aunque se sabe que en la zona hay una cantera y se puede visualizar en la figura 23, el clasificador no puede diferenciar la cantera de la zona de las zonas arenosas naturales, las tierras desnudas y degradadas y el tejido urbano discontinuo (Figura 23)

**Figura 23.**

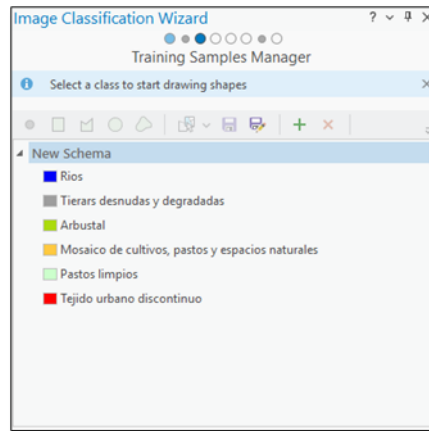
*Primera clasificación para el año 2018*



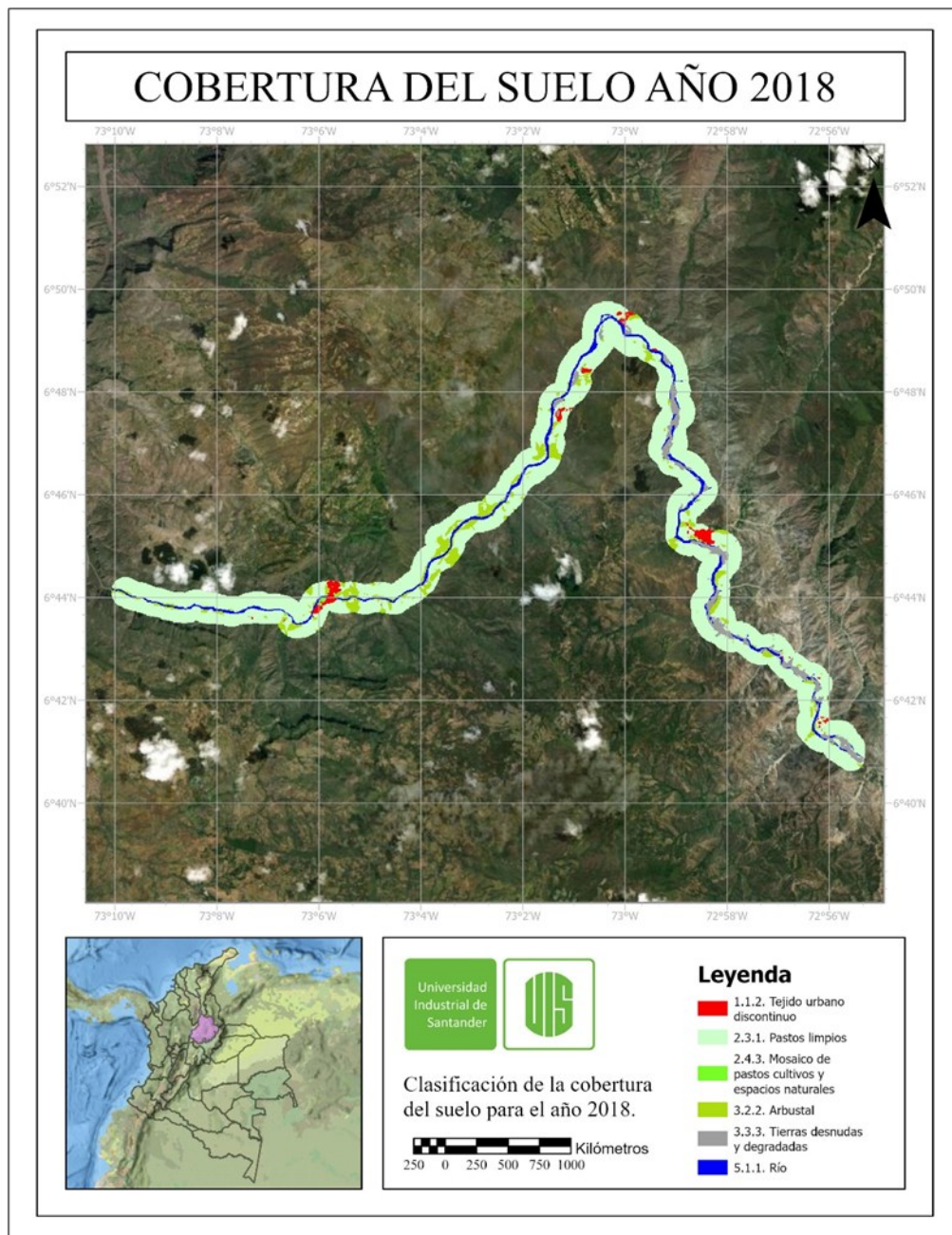
En este paso del análisis se decide eliminar las clases que no alcanzan el mínimo de muestras viables o que pueden presentar confusión al algoritmo por su similitud en la firma espectral y se entrena nuevamente el algoritmo de clasificación. Las clases resultantes usadas son como se muestra en la Figura 24.

**Figura 24.**

*Clases finales usadas para entrenar el algoritmo*



Dando como resultado una clasificación más limpia, que señala las principales coberturas de uso del suelo de la zona, como se presenta en la Figura 25 muestra una clasificación más depurada, que indica las coberturas de uso del suelo más relevantes en la región. La validación de datos en campo se vuelve crucial en este momento, porque es posible incluir diversas variables al algoritmo de clasificación, además de los índices espectrales o, en términos más generales, la respuesta espectral que se obtiene de las bandas de los sensores Landsat 5 y Landsat 8. Esta afirmación es una recomendación contundente para futuras investigaciones que busquen comprender las transformaciones geomorfológicas experimentadas por el cauce del río Chicamocha a lo largo del último siglo.

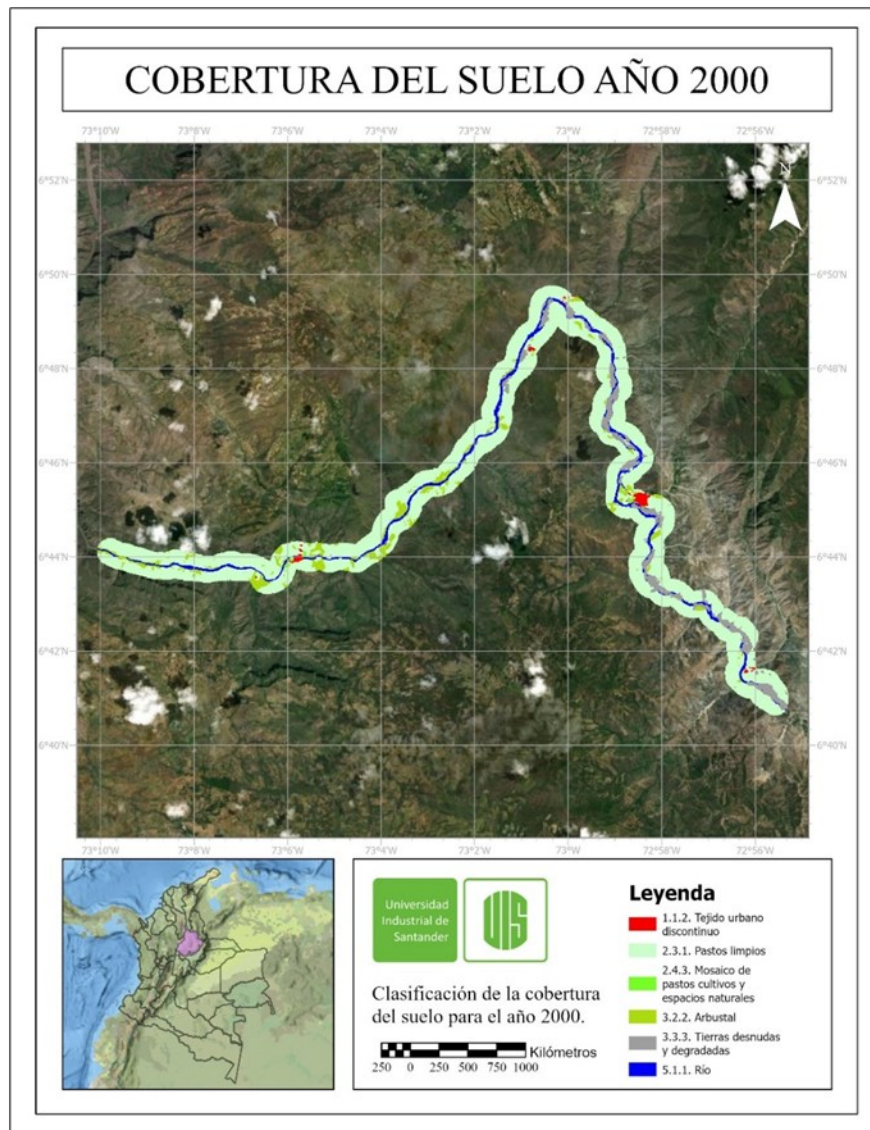
**Figura 25.***Clasificación de la cobertura del suelo para el año 2018.*

Se repite este mismo flujo para el año 2000 (Figura 26), donde usando como referencias los índices obtenidos en la fase anterior, se generan muestras para cada clase definida y se ejecuta

el clasificador *Maximum Likelihood Classification*, obteniendo así clasificación del uso de la tierra para el año 2000 y 2018.

**Figura 26.**

*Clasificación de la cobertura del suelo para el año 2000.*



A simple vista, se puede observar cómo el algoritmo de clasificación *Maximum Likelihood Classification*, confundió el tejido urbano discontinuo con una clase que no pudo detectar correctamente: zonas de extracción minera, probablemente debido a la similitud espectral de sus

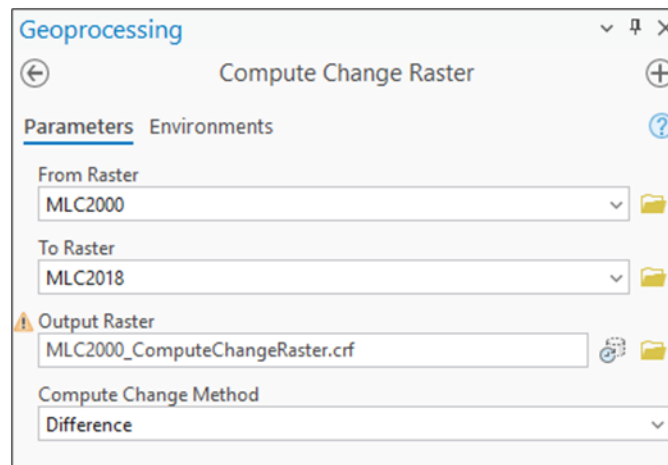
firmas en las bandas trabajadas, problema que ya había surgido anteriormente y que no se pudo solventar debido a los insumos usados y la escala regional de la investigación. Aquí se confirma la importancia del conocimiento humano para validar e interpretar los productos cartográficos generados automáticamente, corrigiendo posibles inconsistencias o señalándolas, como es el caso.

Asimismo, los resultados muestran una constante actividad antrópica en la franja de influencia del río Chicamocha, ya que, al pasar los 18 años de estudio, se observa una amplia asociación de la clasificación a pastos limpios, relacionado con la ganadería. Se hará énfasis en las consecuencias de estas actividades en la geomorfología del cauce el río Chicamocha en la siguiente fase y en el capítulo de conclusiones. Ahora bien, para profundizar en el estudio de estos cambios, con un enfoque cuantitativo y geológico, se desarrolla en la siguiente fase un análisis de cambio comparativo entre las dos clasificaciones obtenidas para los periodos de referencia.

#### Fase 4: Comparación temporal y análisis de cambios

##### Figura 27.

*Uso del geoprocesamiento Compute change raster*

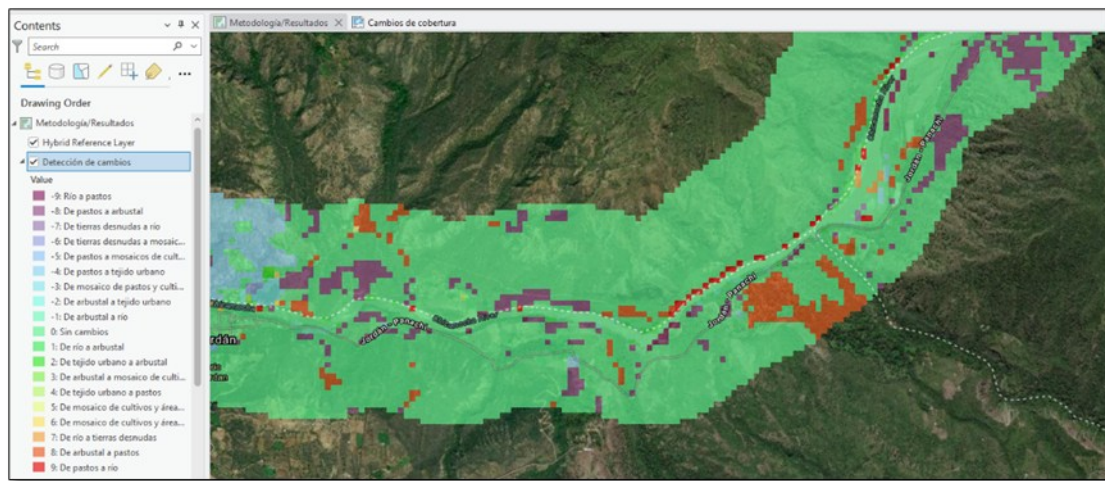


Una vez llegados a este punto y haciendo uso de la documentación disponible en la web para el uso del software ArcGIS Pro, se identifica el *Asistente de Detección de Cambios* (Figura

27), una herramienta de la extensión *Image Analyst*. Este geoprocesamiento permite detectar los cambios de píxeles (30 metros cuadrados), es decir, entre clases que ya fueron generados previamente.

El resultado es un producto ráster con valores desde los -9 hasta 9, donde los valores negativos corresponden a clases que desaparecieron desde el 2000 hasta el 2018, mientras que los valores positivos son las clases se intensificaron pasado esta misma cantidad de tiempo. Finalmente, el valor de cero corresponde a las clases o coberturas del suelo que no cambiaron en este rango de tiempo.

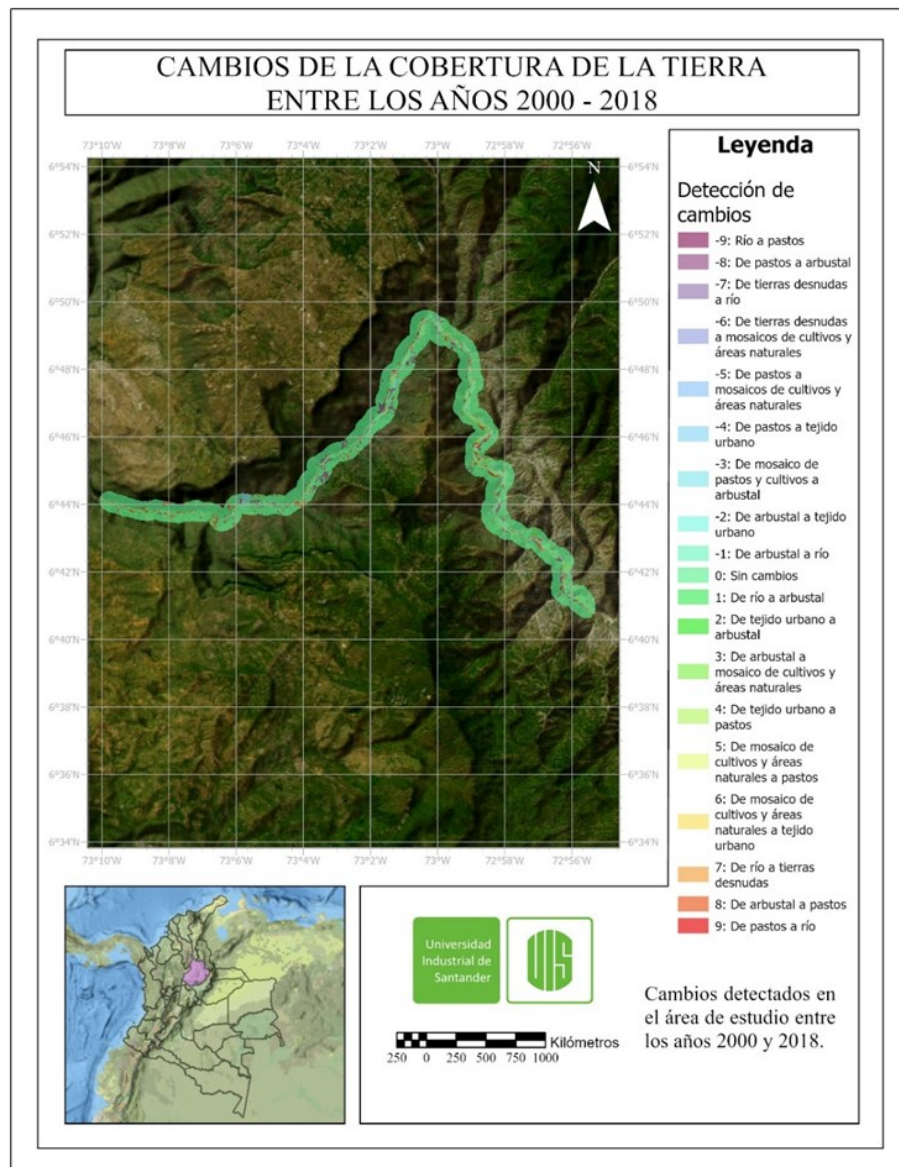
De manera preliminar, se observa que la clase de tierra Pastos limpios, que corresponde a la cobertura más amplia en el área de estudio, ha permanecido casi inalterada ya que el color dado por el software corresponde al valor 0, es decir, sin cambios (Figura 28), esto puede interpretarse como un indicador de estabilidad relativa en la dinámica geomorfológica de la ronda hídrica, ya que no ha habido cambios sustanciales en el régimen de sedimentación o erosión fluvial que modifiquen drásticamente la disponibilidad de suelos fértiles sobre las terrazas bajas o planicies de inundación.

**Figura 28.***Cobertura de pastos limpios*

Desde la perspectiva geológica, estas zonas de pastos limpios estables reflejan un balance en la morfodinámica del cauce, donde no se ha producido ni incisión fluvial significativa, es decir, profundización del lecho del cauce, ni procesos de avulsión o migración lateral extensiva, condiciones que, de darse, afectarían o desplazarían la cobertura herbácea. El resultado completo se puede apreciar en la Figura 29.

**Figura 29.**

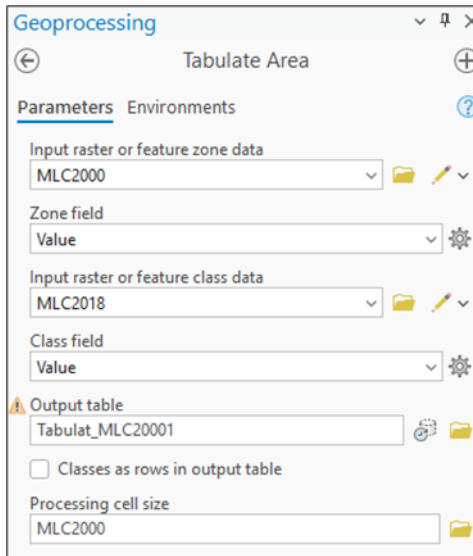
*Cambios de la cobertura de la tierra entre los años 2000 y 2018.*



Este mismo mapa está disponible en los anexos en formato PDF de alta resolución para que pueda ser consultado y observado con un nivel de detalle más apropiado y así mismo se puedan entender los cambios en el área de estudio. Para entrar más a detalle sobre aquellos cambios que no son perceptibles a simple vista, se ejecuta la herramienta *Tabulate Area* de la extensión *Spatial Analysis* de ArcGIS Pro (Figura 30).

**Figura 30.**

*Uso del geoprocesamiento Tabulate Area*



La tabla generada a partir de este geoprocesamiento permite cuantificar los cambios dados en cada una de las coberturas, estas cifras son dadas por defecto en metros cuadrados, pero teniendo en cuenta que la investigación se hace a una escala regional, se presentan los resultados en hectáreas, tal y como se ve a continuación:

**Tabla 14.**

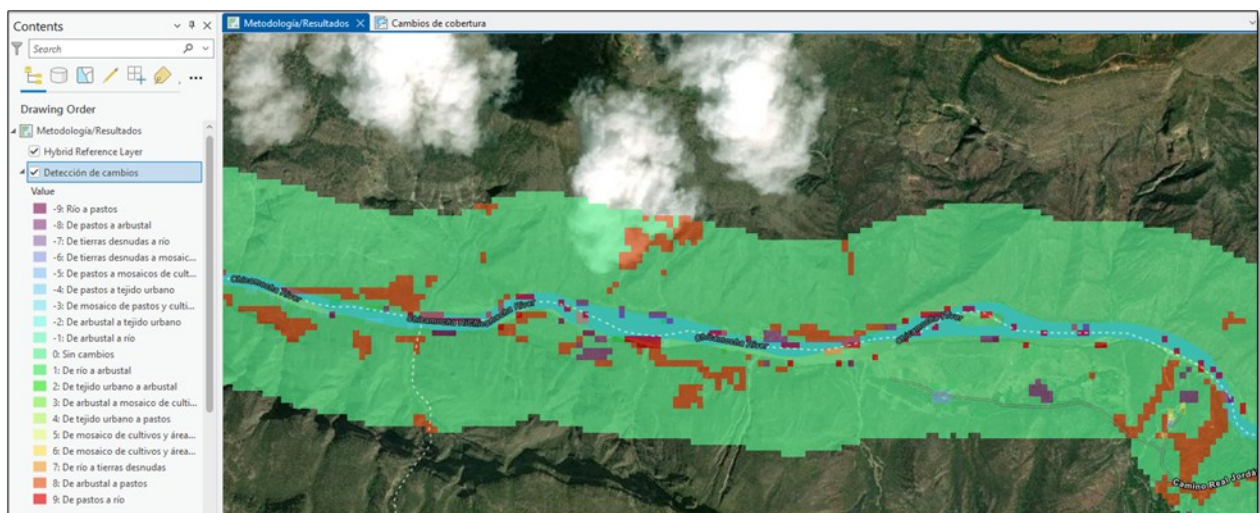
*Matriz de cambios de cobertura en hectáreas.*

Clase 2000 \ Clase 2018	Río	Arbustal	Mosaico de pastos, cultivos y áreas naturales	Tejido urbano discontinuo	Tierras desnudas y degradadas	Pastos limpios
Río	246.73	15.12	0.09	3.23	44.16	46.1
Arbustal	6.73	245.26	0.28	4.15	0.65	113.96
Mosaico de pastos, cultivos y áreas naturales	0.09	2.21	2.77	4.79	0	4.06
Tejido urbano discontinuo	0	0.74	0.37	39.92	0.18	7.38
Tierras desnudas y degradadas	54.21	5.72	0	4.89	260.93	128.25
Pastos limpios	30.33	192.98	1.66	44.9	10.7	3992.42

En primer lugar, cabe resaltar la estabilidad del área que comprende el cauce principal, ya que como se observa 246.73 hectáreas no cambiaron en el tiempo de 18 años, lo que indica que la morfometría fluvial no experimentó modificaciones mayores, lo que a su vez sugiere ausencia de procesos de avulsión o migración lateral significativos, tal y como se dedujo anteriormente por los pocos cambios presentados en los pastos limpios. Este comportamiento está asociado a la influencia de factores estructurales como la falla de Bucaramanga que precisan el canal, y a la resistencia geotécnica de los materiales aluviales en este tramo. Todos los cambios en la forma del río se han dado, al menos dentro del alcance de esta investigación, de manera natural. La ausencia de cambios se puede visualizar en una parte de la zona de estudio en la Figura 31.

### Figura 31.

#### *Cauce el río Chicamocha con pocos cambios*



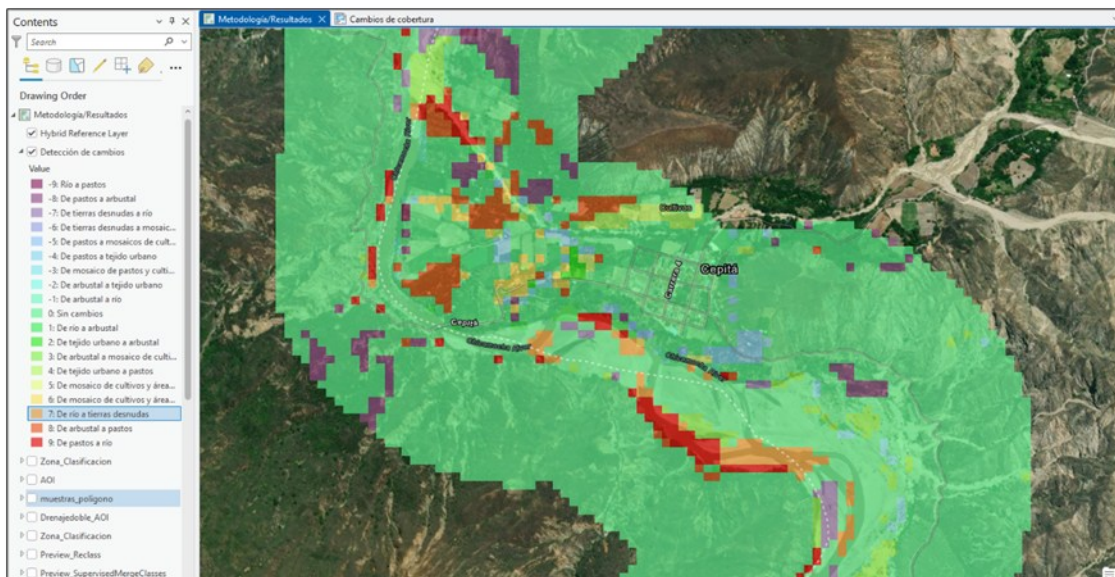
Ahora bien, la conversión de áreas clasificadas en el año 2000 como cauce del río Chicamocha y que para el 2018 están representadas por tierras desnudas y degradadas (44.16 hectáreas) indican probable retracción del espejo de agua durante el periodo seco del último año

estudiado, con exposición a barras de arena, terrazas bajas o zonas de sedimentación. Geomorfológicamente esto se asocia a procesos de incisión fluvial o migración de barras centrales.

Sin embargo, al estudiar los cambios en la clasificación, se observa que los lugares donde el río dio paso a zonas desnudas y degradadas fueron precisamente cerca de los centros poblados de Cepitá y Jordán, lo que denota que la actividad antrópica intensa, como la actividad urbana tiene consecuencias en el cauce el río Chicamocha (Figura 32)

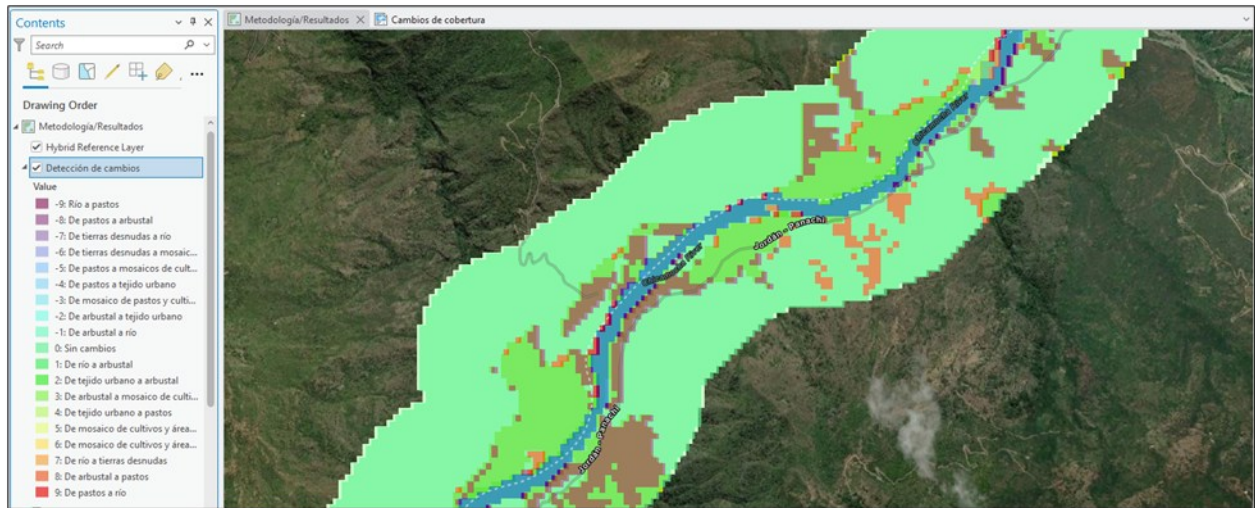
### Figura 32.

*Cambios de río a tierras desnudas en color naranja.*



También, se observa la permanencia de la clase arbustal, con 245.56 hectáreas que permanecieron invariables, esto es un signo de estabilidad de las márgenes, con vegetación riparia que contribuye a la protección de taludes frente a procesos erosivos. Esto confirma un equilibrio entre aporte y extracción de sedimentos en la ronda hídrica, manteniendo el cinturón de vegetación natural como estabilizador geomorfológico. La permanencia de esta clase se evidencia en la siguiente imagen:

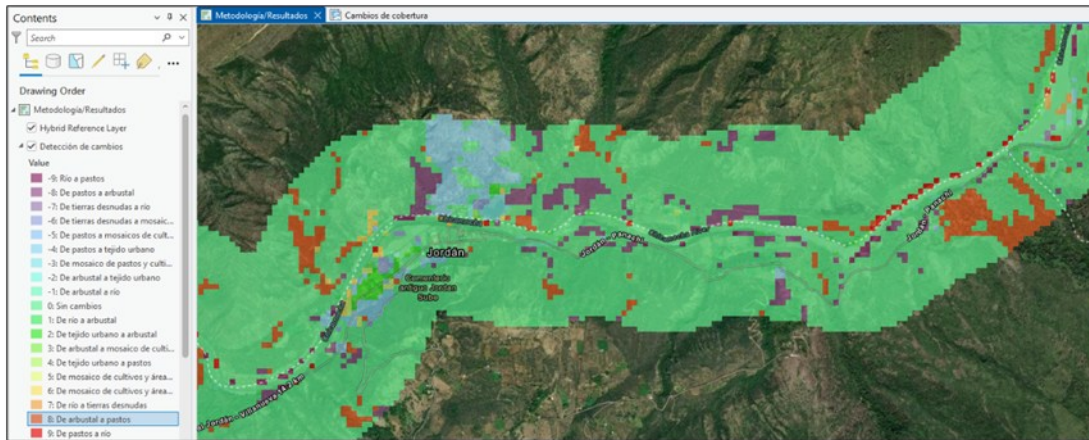
### Figura 33.

*Invariabilidad en las zonas arbustivas (en color verde)*

Sin embargo, también se aprecia el cambio de la clase arbustal por pastos limpios (Figura 34), con unas 113.96 hectáreas afectadas, esta transformación puede interpretarse como intervención antrópica, donde la vegetación riparia fue reemplazada por áreas de uso agropecuario. Desde el punto de vista geológico, implica una reducción de la rugosidad marginal y por tanto una menor resistencia a eventos de socavación lateral, aumentando la vulnerabilidad a procesos de erosión en futuros cercanos.

**Figura 34.**

*Cambios de zonas arbustivas a pastos limpios (En naranja).*



Finalmente, el aumento de área clasificada como zona urbana, correspondiente a 44,9 hectáreas que previamente se identificaban como pastos limpios, evidencia una transformación significativa del paisaje (Figura 34). No obstante, es necesario complementar estos resultados mediante la comparación con imágenes de mayor resolución, por ejemplo, las disponibles en plataformas como Google Earth, dado que en muchos casos este cambio no corresponde realmente a desarrollo urbano, sino a la presencia de canteras o posibles zonas de extracción minera. En cualquiera de estas situaciones, el cambio responde a presiones antrópicas sobre el territorio. Desde una perspectiva geológica, estas transformaciones generan una mayor impermeabilización del suelo, disminuyendo la capacidad de infiltración y elevando el riesgo de escorrentía superficial, lo que incrementa la probabilidad de procesos de socavación local y alteraciones en la morfología del cauce durante eventos hidrometeorológicos extremos.

En conjunto, la matriz de cambios revela un sistema fluvial que mantiene su configuración geomorfológica principal, con modificaciones localizadas producto de expansión urbana y sustitución de coberturas riparias hacia usos agropecuarios. Desde el punto de vista geológico, esto

indica un equilibrio dinámico en el canal principal, pero con amenazas potenciales sobre las márgenes a futuro por la pérdida de vegetación estabilizadora y el incremento de áreas urbanas. Para terminar, se compara la cantidad de píxeles representados para el río Chicamocha entre ambas imágenes y se obtiene lo siguiente:

**Tabla 15.**

*Hectáreas de clase río totales*

Imagen	Número de píxeles	Hectáreas
Landsat 5 2000	3856	347.04
Landsat 8 2018	3667	330.03

Esta diferencia de 17,01 hectáreas puede interpretarse como una contracción espacial del cauce visible, posiblemente relacionada con procesos de depositación fluvial o reducción del caudal base, fenómenos comunes en sistemas fluviales semiáridos y con fuerte estacionalidad como el Chicamocha. También podría explicarse por factores antrópicos, tales como el represamiento o la captación de agua. Este resultado resalta la importancia de continuar con el monitoreo periódico del comportamiento geomorfológico del río a escalas más detalladas, especialmente en contextos donde superponen dinámicas naturales con presiones antrópicas significativas.

Nuevamente cabe resaltar que correlación no significa causalidad, por lo que se sugiere, hacer estudios que tengan en cuenta más variables para analizar las posibles causas profundas que derivan la pérdida de vegetación señalada y de esta manera dar soluciones amplias que se puedan aplicar en toda la cuenca del río Chicamocha, más allá del área de estudio planteada en la presente investigación.

Además del análisis de coberturas, se realizó una interpretación geomorfológica del comportamiento del cauce del río Chicamocha entre los años 2000 y 2018. Se evidenciaron

procesos de migración lateral del canal principal en varios tramos, lo cual sugiere erosión de márgenes y reconfiguración del cauce. Igualmente, se identificó la desaparición o transformación de algunas barras de sedimentación, posiblemente asociadas a variaciones en el régimen de caudal o a cambios en la cobertura de laderas cercanas.

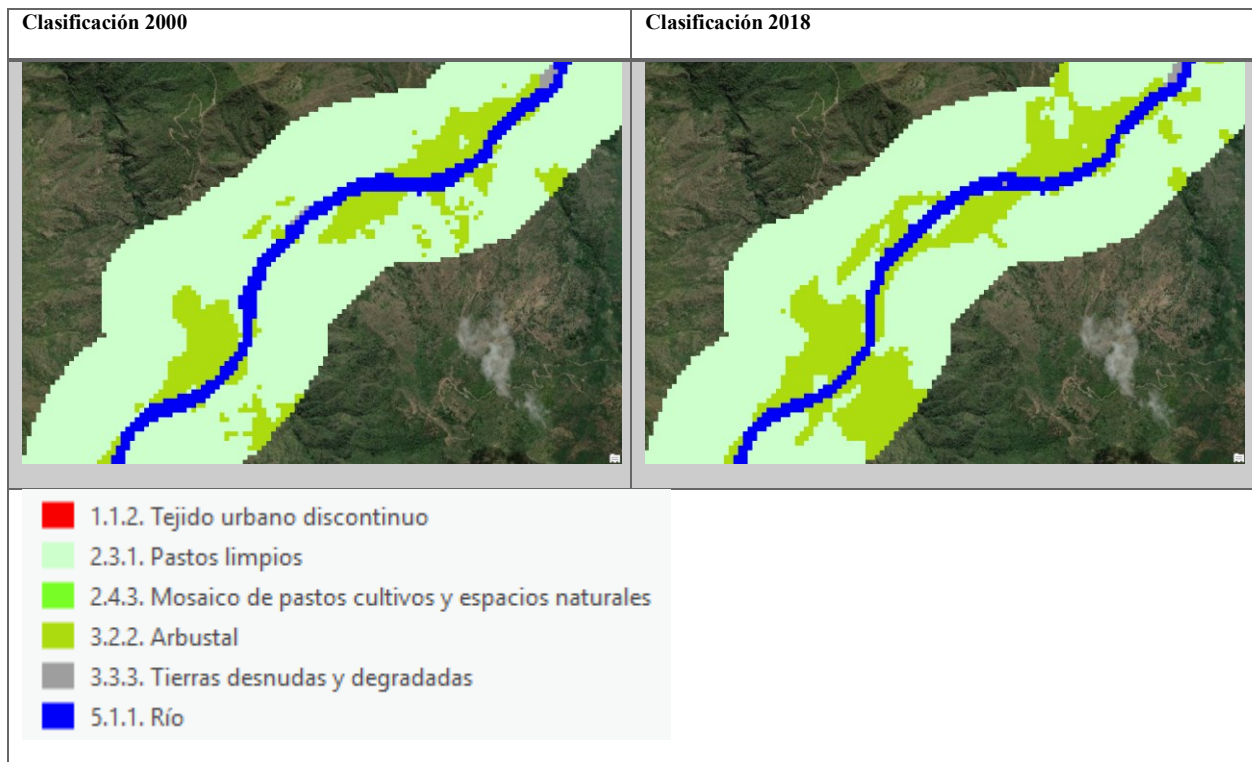
Las terrazas fluviales, inicialmente presentes como unidades diferenciadas, muestran en algunos sectores cambios de uso hacia coberturas antrópicas como pastos limpios, lo cual sugiere pérdida de geoformas por transformación del relieve. También se observó un retraimiento de taludes fluviales y una reducción en la cobertura vegetada de las llanuras de inundación, lo que indica una presión creciente sobre estos espacios funcionales.

Estos cambios reflejan una dinámica fluvial activa, influida tanto por procesos geomorfológicos naturales como por intervenciones humanas no planificadas, y refuerzan la necesidad de incluir el componente geomorfológico en los procesos de planificación territorial y gestión de cuencas.

## 11. Discusión

El análisis multitemporal realizado en el tramo del río Chicamocha comprendido entre los municipios de Cepitá y Jordán permitió identificar patrones de cambio en la cobertura del suelo a lo largo de 18 años (2000 - 2018). Al comparar las clasificaciones supervisadas a partir de imágenes Landsat, se evidencian transformaciones relevantes asociadas principalmente a la expansión de áreas urbanas discontinuas, que como se mencionó en el capítulo de Resultados, se ve claramente como los cascos urbanos de los municipios se han expandido, y esto ha afectado el cauce del río Chicamocha, sin embargo, muchos de estos cambios están relacionados con la actividad minera (lejos de los cascos urbanos), que dado el alcance de este proyecto y la escala regional adoptada, no se alcanza a identificar plenamente, además también se evidencian procesos de reconversión de coberturas naturales (como arbustales y mosaicos de cultivos y áreas naturales) hacia usos agropecuarios más intensivos, representados por pastos limpios.

Desde una perspectiva geomorfológica, la estabilidad observada en amplias zonas de vegetación arbustiva alrededor del cauce sugiere la existencia de mecanismos de autorregulación fluvial, en los cuales la vegetación riparia ha desempeñado un papel fundamental como elemento de protección de las márgenes y de estabilización de los taludes (Gurnell, 2014; Thorne, 1990). Esta cobertura perenne reduce la probabilidad de erosión lateral y retarda la migración del cauce, reforzando la conectividad geomorfológica longitudinal del sistema fluvial. Esta situación se puede ver claramente representada en la siguiente comparativa:

**Tabla 16.***Invaración en tramos del río*

Claramente es visible que las zonas que mantienen o incrementan una vegetación arbustiva sostienen un cauce del río prácticamente inalterado en los 18 años de diferencia entre una clasificación y la otra. Por otra parte, el avance de superficies clasificadas como tejido urbano discontinuo sobre áreas previamente destinadas a pastos limpios constituye una señal de presión antrópica creciente, la cual, de mantenerse en el tiempo, podría incrementar los procesos de impermeabilización del suelo. Esta condición puede traducirse en mayor escorrentía superficial, menor infiltración y aumento de caudales pico durante eventos extremos (Schumm, 1977), factores que intensifican la susceptibilidad a procesos de socavación fluvial y modificación morfológica del cauce, además de eventos siniestrales asociados a pérdidas de cultivos, vivienda y en el peor de los casos vidas animales y humanas.

Un aspecto que merece especial atención es la transformación de áreas clasificadas como arbustales hacia coberturas de pastos limpios o mosaicos de uso agropecuario. Este cambio puede implicar la disminución de la rugosidad superficial en los corredores de inundación, facilitando la propagación de flujos de alta energía durante crecidas, y, en consecuencia, modificando patrones de sedimentación y deposición fluvial (Leopold et al., 1995). Tales cambios podrían alterar el balance sedimentario local, aumentando el riesgo de incisión y profundización del cauce principal.

Estos hallazgos concuerdan con estudios en otras cuencas de la región Andina colombiana, donde la presión antrópica y el cambio de coberturas naturales hacia usos productivos han estado estrechamente vinculados con la inestabilidad de las geformas fluviales, incrementando fenómenos de erosión, sedimentación desequilibrada y pérdida de funciones ecosistémicas asociadas al corredor ribereño (Restrepo & Escobar, 2018).

Otro aspecto relevante es la relación entre cobertura y agua. Al analizar los cambios en la clasificación de la categoría “río”, se evidencia una leve disminución en su extensión aparente, lo cual puede deberse a factores tanto naturales (épocas de menor caudal) como a la sedimentación progresiva en algunos tramos, posiblemente influenciada por los cambios en cobertura aledaños. Se recuerda que este es una de las razones por las que se eligieron imágenes satelitales de temporada seca, para minimizar la distorsión en la forma del cauce provocada por crecidas temporales.

En términos metodológicos, el empleo de imágenes Landsat con resolución de 30 metros permitió realizar una evaluación de mediana escala coherente con los objetivos de análisis regional, pero tiene sus limitaciones. Por tanto, para precisar los cambios en superficies de menor tamaño, sería pertinente complementar esta información con imágenes de alta resolución (por

ejemplo, Sentinel - 2) a fin de minimizar errores de confusión espectral, especialmente entre categorías urbanas y áreas de extracción minera. Además, también existen tecnologías que se pueden integrar como el uso de imágenes de radar, tales como Sentinel - 1 y ALOS PALSAR y con ayuda de validación de campo en puntos críticos daría como resultado un análisis mucho más profundo y a escala local.

Finalmente, los resultados obtenidos aportan insumos relevantes para la planificación territorial y la gestión integral del recurso hídrico en la cuenca del Chicamocha, destacando la necesidad de proteger las coberturas riparias estables como elemento de mitigación frente a procesos de degradación geomorfológica, y promoviendo medidas de ordenamiento territorial que regulen el avance urbano y la intervención minera sobre zonas ambientalmente sensibles.

## 12. Conclusiones

El análisis multitemporal del cauce del río Chicamocha, en el tramo comprendido entre los municipios de Cepitá y Jordán, permitió identificar una notable estabilidad morfométrica en el canal principal durante el periodo 2000 - 2018. A pesar de una leve reducción en el área clasificada como río (de 347,04 ha a 330,03 ha), equivalente a una disminución de 17,01 hectáreas, esta variación puede interpretarse como una posible contracción del cauce visible, atribuible a procesos de colmatación, depositación de sedimentos, aumento de la vegetación riparia o incluso a errores de clasificación derivados de diferencias espectrales o de resolución temporal entre las imágenes analizadas, por tanto, se recomienda a futuros investigadores fortalecer los procesos de monitoreo del Cañón del Chicamocha mediante la integración de imágenes satelitales de mejor resolución, tecnologías como el radar de apertura sintética (SAR) y la verificación y levantamiento de variables adicionales directamente en campo.

Geomorfológicamente, este comportamiento también podría estar vinculado a una disminución del caudal base, influenciada por cambios en el régimen hídrico o por una mayor presión antrópica, como la captación de agua, el represamiento o la extracción de materiales del lecho fluvial. Esta variación es relevante para la gestión integral de la ronda hídrica, ya que evidencia modificaciones en la dinámica fluvial que podrían afectar la conectividad ecológica, la disponibilidad de hábitats acuáticos y la vulnerabilidad del entorno ante eventos hidrometeorológicos extremos.

La dinámica geomorfológica del tramo analizado se caracteriza por un comportamiento generalmente estable, en buena parte asociado a la presencia de vegetación riparia que actúa como estabilizador natural de los taludes ribereños. Los cambios puntuales observados, especialmente

en cercanías a zonas urbanas, sugieren intervenciones humanas que podrían estar generando efectos localizados de socavación o modificación artificial del cauce. A partir del análisis multitemporal con imágenes Landsat, fue posible identificar y hacer seguimiento a diversas geformas fluviales como meandros, barras de sedimentación, terrazas aluviales, taludes y llanuras de inundación. A pesar de las limitaciones impuestas por la resolución espacial de 30 metros, la metodología empleada permitió distinguir patrones relevantes de migración lateral del cauce, reconfiguración de barras, cambios en el uso del suelo sobre terrazas y retracción de zonas de ribera. Estos hallazgos reafirman la utilidad de las herramientas de teledetección y SIG para la evaluación de procesos geomorfológicos en cuencas de alta sensibilidad ambiental, y evidencian la necesidad de integrar la geomorfología fluvial en los diagnósticos territoriales y en la planificación ambiental, especialmente en contextos donde confluyen presiones antrópicas y funciones ecosistémicas clave.

Por otra parte, las transformaciones en la cobertura del suelo reflejan una tendencia hacia el uso más intensivo del territorio, con expansión de áreas urbanas y conversión de vegetación natural a pastos limpios. Estas modificaciones, aunque no generalizadas, representan riesgos geomorfológicos específicos al favorecer procesos como el aumento de escorrentía superficial, la impermeabilización del terreno y la reducción de la capacidad reguladora del paisaje sobre la dinámica fluvial.

La implementación de una metodología de clasificación de cobertura adaptada al contexto colombiano CORINE Land Cover, que cuenta con una amplia literatura tanto en entidades oficiales como IDEAM e IGAC, además de investigaciones previas, permitió una lectura detallada y coherente de los procesos observados. La priorización del nivel de detalle en la leyenda

cartográfica facilitó la diferenciación entre clases de uso similares, lo que contribuyó a una interpretación más precisa de las dinámicas espaciales en el entorno inmediato del río.

Finalmente, aunque esta investigación se desarrolló a escala regional, ofrece aportes clave para comprender la relación entre los cambios en la cobertura del suelo y la estabilidad morfológica del río Chicamocha. En términos metodológicos, demuestra que el análisis multitemporal, apoyado en herramientas SIG y una clasificación temática rigurosa, es una estrategia eficaz para diagnosticar transformaciones espaciales con implicaciones geomorfológicas. Así, este trabajo establece una base técnica y conceptual que puede ser ampliada en futuras investigaciones orientadas a otras secciones de la cuenca o a modelos hidrológicos más complejos.

En conjunto, los resultados no solo enriquecen el conocimiento académico, sino que también ofrecen insumos concretos para una gestión territorial más sostenible y para la conservación de uno de los paisajes más representativos del oriente colombiano.

### Referencias Bibliográficas

- Alcaldía de Cepitá. (2024). *Plan de Desarrollo Municipal 2024–2027: Cepitá, corazón del Cañón del Chicamocha*. Obtenido de <https://cepita-santander.gov.co>
- Boinet, T. (1989). *Geología de la hoja Lebrija, 97*. INGEOMINAS.
- Bridge, J. (2003). *Rivers and Floodplains: Forms, Processes, and Sedimentary Record*. Blackwell Publishing.
- Burrough, P., & McDonnell, R. (1998). *Principles of Geographical Information Systems*. Oxford University Press.
- Carrillo Lombana, E. J., Castro Marin, E., & Bernal Vargas, L. E. (1993). *Estudio de estabilidad geológica en la cuenca baja del río Chicamocha, Santander*. Bucaramanga: Ministerio de minas y energía Instituto de investigaciones en geociencias minería y química.
- Chuvieco, E. (2010). *Teledetección ambiental: La observación de la Tierra desde el espacio*. Ariel.
- Chuvieco, E. (2016). *Fundamentos de Teledetección Espacial*. Rialp.
- Condori, W. (2018). *Estimación de la pérdida de cobertura boscosa por actividades antrópicas en el distrito Nueva Requena, mediante análisis multitemporal de imágenes satelitales*. Universidad César Vallejo. Repositorio Latinoamericano Académico. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12692/20512>
- Congalton, R., & Green, K. (2009). *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices* (2 ed.). CRC Press.
- CORPOBOYACÁ. (2015). *Corporación Autónoma Regional de Boyacá*. Obtenido de Plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica del río Chicamocha – POMCA Chicamocha Medio: <https://www.corpoboyaca.gov.co/cms/wp-content/uploads/2015/11/informe-aprestamiento-chicamocha1.pdf>
- DANE. (2022). *Departamento Administrativo Nacional de Estadística*. Obtenido de Estimaciones y proyecciones de población por municipios 1985–2035: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/proyecciones-de-poblacion>
- Díaz Vallderuten, J., Velásquez, S., Velandia, F., Chaparro, J., Neiza Mora, N., Duarte, W., . . . Bayona, N. (2014). *Memoria explicativa del mapa geomorfológico aplicado a movimientos en masa, escala 1:100.000 – Plancha 134: Puerto Parra, Departamento de Santander*. Bucaramanga, Colombia: Servicio Geológico Colombiano (SGC) en convenio con Universidad Industrial de Santander (UIS).
- DNP. (2020). *Departamento Nacional de Planeación*. Obtenido de Bases del Plan Nacional de Desarrollo 2022–2026.: <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Prensa/Publicaciones/plan-nacional-de-desarrollo-2022-2026-colombia-potencia-mundial-de-la-vida.pdf>

- Fernández Rubio, A. (2011). ¿Qué es cuenca hidrográfica? *Foro Peruano para el Agua*.  
Obtenido de [https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam\\_files/publicaciones/varios/cuenca\\_hidrologica.pdf](https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/cuenca_hidrologica.pdf)
- García, M. (2008). *Sedimentation engineering: processes, measurements, modeling, and practice*. American Society of Civil Engineers (ASCE). doi:10.1061/9780784408148
- García, Y. C., Añez, M., Struth, L., Tesón, E., & Caballero, V. (2015). *Ríos Chicamocha y Suárez: Un ejemplo de la evolución de la red de drenaje en orógenos de inversión*. Bucaramanga.
- García, Y., & Añez, M. (2017). *Evolución reciente de los drenajes de los ríos Chicamocha y Suárez*. Universidad Industrial de Santander.
- Halifa Marín, A., Perez, P., Almagro, M., Boix, C., & Martínez, M. (2019). Vegetación de ribera en humedales altoandinos de Chile: patrones espaciales y propuesta metodológica. *Revista Chilena de Historia Natural*, 92, artículo 3 (sin paginación tradicional). doi:<https://doi.org/10.4067/S0717-92002019000100003>
- Hernández, C., & Salamanca, J. (2019). *Análisis multitemporal del cambio de cobertura vegetal y su influencia en la generación de caudales pico de la cuenca Sardinata, del departamento Norte de Santander–Colombia*. Universidad Católica de Colombia. Obtenido de [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwifpL23g8yOAxUDt4QIHxtLAgIQFnoECBYQAQ&url=https%3A%2F%2Frepository.ucatolica.edu.co%2Fentities%2Fpublication%2F3513ab0-100d-4cae-bbf2-5ae7a78ecc98&usq=AOvVaw2VpQq--JOLQ\\_w7rMUobxFI&o](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwifpL23g8yOAxUDt4QIHxtLAgIQFnoECBYQAQ&url=https%3A%2F%2Frepository.ucatolica.edu.co%2Fentities%2Fpublication%2F3513ab0-100d-4cae-bbf2-5ae7a78ecc98&usq=AOvVaw2VpQq--JOLQ_w7rMUobxFI&o)
- Huete, A. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25, 205-309.
- IDEAM. (2010). *Leyenda nacional de coberturas de la tierra: Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia a escala 1:100 000*. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IGAC. (2022). *Instituto Geográfico Agustín Codazzi*. Obtenido de Geografía de Colombia: Divisiones político-administrativas y características territoriales: <https://www.colombiaenmapas.gov.co/?u=19001&t=23>
- Jensen, J. (2005). *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective* (2 ed.). Prentice Hall. Obtenido de <https://archive.org/details/remotesensingofe0000jens/mode/2up>
- Knighton, D. (2014). *Fluvial Forms and Processes: A New Perspective* (2 ed.). Routledge. doi:10.4324/9780203784662
- Leopold, L., Wolman, M., & Miller, J. (1995). *Fluvial Processes in Geomorphology*. Dover Publications.
- Lillesand, T., Kiefer, R., & Chipman, J. (2015). *Remote Sensing and Image Interpretation* (7 ed.). Wiley.

- Lu, D., & Weng, Q. (2007). A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance. *International Journal of Remote Sensing* (28(5)), 823-870.
- Mayorga, J. (2022). *Análisis multitemporal de la transformación del paisaje en áreas periurbanas del norte de Bogotá D.C para el periodo 1956-2021*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Obtenido de <https://repository.udistrital.edu.co/items/cf8b111d-07d6-422d-9789-b8ac41691ab6>
- McFeeters, S. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425-1432.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2014). *Guía técnica para la formulación de los planes de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas*. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Obtenido de [https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/GUIA\\_DE\\_POMCAS.pdf](https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/GUIA_DE_POMCAS.pdf)
- Montgomery, D., & Buffington, J. (1997). Channel-reach morphology in mountain drainage basins. *Geological Society of America Bulletin*, 109(5), 596-611.
- Munro, S. (2010). *El río y la forma. Introducción a la geomorfología fluvial*. RIL Editores.
- Pantoja, G., & Portilla, N. (2012). *Análisis multitemporal de la cobertura del suelo, en la selva altoandina y el páramo del volcán Cumbal, departamento de Nariño - Colombia, en el periodo 1987 - 2009*. Universidad de Nariño. Obtenido de <https://sired.udenar.edu.co/10073/1/85346.pdf>
- Peñaloza, L., Carvajal, F., & Hernandez, N. (2020). Análisis multitemporal del cambio de cobertura vegetal de la microcuenta El Volcán a partir de la compra de áreas estratégicas. *Revista ambiental agua, aire y suelo*, 1.
- Pillaca Palomino, R. (2015). *Evaluación de efectos de la explotación de canteras de agregados en cauce de Río Yucaes a la bocatoma del sistema de riego Mayzondo – Ayacucho*. Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga. Obtenido de <https://repositorio.unsch.edu.pe/server/api/core/bitstreams/2caaf65f-468b-46f7-a4ad-fca2b08f8db3/content>
- Restrepo, J., & Escobar, H. (2018). Sediment load trend in Andean rivers of Colombia. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22, 2207-2222.
- Rodríguez, G., & Correa Martínez, A. M. (2020). *Catálogos de las unidades litoestratigráficas de Colombia. Macizo de Santander* (Vol. 1). Bogotá: Servicio Geológico Colombiano. doi:<https://doi.org/10.32685/9789585279445>
- Rouse, J., Haas, R., Schell, J., & Deering, D. (1974). *Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS*. NASA.

- Roy, D., Wulder, M., Loveland, T., Woodcock, C., Allen, R., Anderson, M., . . . Zhu, Z. (2014). Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. *Remote Sensing of Environment*, 145, 154-172. doi:10.1016/j.rse.2014.02.001
- Royero, J., & Clavijo, J. (2001). *Mapa geológico generalizado del departamento de Santander*. Bogotá: Ingeominas.
- Salcedo, J., & Ramírez, M. (2015). *Cartografía geológica y cálculo del balance hídrico para la construcción del túnel de carga en la Central Hidroeléctrica Chicamocha - municipio de Aratoca, Santander*. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Obtenido de <https://repositorio.uptc.edu.co/handle/001/1581>
- Sandoval, P., Candela, L., & Suárez, C. (2023). *Morfogénesis y patrimonio geomorfológico del sector Pescadero- Cepitá (área proyecto Geoparque Cañon del Chicamocha-Colombia)*. Zaragoza.
- Schumm, S. (1977). The fluvial system. *Earth surface Processes*, 4(1), 97-98. doi:10.1002/esp.3290040121
- Simons, D., & Şentürk, F. (1992). *Sediment Transport Technology: Water and Sediment Dynamics*. Water Resources Publications.
- USGS. (2021). *United States Geological Survey*. Obtenido de Landsat Missions: <https://www.usgs.gov/landsat-missions>
- Ward, D., Goldsmith, R., Cruz, B., & Restrepo, A. (1973). Geología de los cuadrángulos H-12 Bucaramanga y H-13 Pamplona, Departamento de Santander. *Boletín Geológico*, 21(1-3), 1-134.
- Zha, Y., Gao, J., & Ni, S. (2003). Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 24(3), 583-594.