



Análisis multitemporal de la variación de la cobertura vegetal y patrones de deforestación en San José Del Guaviare (2013–2025)

Juan Alfonso Rojas Gallardo
Darwin Caviedes Canchimbo
Sergio Andrés Candela Oviedo

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

Universidad de Manizales
Facultad de Ciencias e Ingeniería
Especialización en Sistemas de Información Geográfica
Manizales, Caldas, Colombia
2025

Cita	Cita (Rojas et al.,2025)
Referencia	Rojas, J., Caviedes, D. & Candela, S. (2025). <i>Análisis multitemporal de la variación de la cobertura vegetal y patrones de deforestación en San José Del Guaviare (2013–2025)</i> [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Manizales. RIDUM: Repositorio Institucional Universidad de Manizales.
Estilo APA 7 (2020)	



Especialización en Sistemas de Información Geográfica - Virtual, II

Declaración de inteligencia artificial: el o los autores de este trabajo de grado declaran que han utilizado herramientas de inteligencia artificial (IA), tales como [ChatGPT y Gemini], de manera ética y responsable, tal como se establece en el Acuerdo UManizales 002 (julio 26 de 2023) sobre propiedad intelectual e IA. Estas herramientas son empleadas como apoyo en la redacción, revisión gramatical y generación de ideas, pero en ningún caso sustituyen el análisis crítico, la argumentación académica ni la originalidad del trabajo. Asimismo, cualquier contenido generado con asistencia de IA está citado y referenciado adecuadamente, garantizando la integridad académica y el cumplimiento de los principios éticos de la investigación.

Biblioteca y Centro de Recursos: <https://biblioteca.umanizales.edu.co/>

Repositorio Institucional: <http://ridum.umanizales.edu.co/>

Universidad de Manizales: www.umanizales.edu.co

Revistas: <http://revistasum.umanizales.edu.co/>

Fondo Editorial: <https://editorialum.umanizales.edu.co/>

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

Tabla de contenido

Contenido

Resumen	9
Introducción	11
1 planteamiento del problema	12
1.1 Antecedentes	14
2. Justificación.....	16
3. Objetivos	18
3.1 Objetivo general	18
4. Hipótesis.....	19
4.1 Hipótesis de trabajo.....	19
4.1.1 Hipótesis nula.....	19
5. Marco teórico	20
6. Metodología	22
6.1 Localización	22
6.2 Fases metodológicas.....	23
6.3 Enfoque metodológico	26
6.3.1 Técnicas Y Métodos De Análisis:.....	26
6.4 Preprocesamiento y Cálculo de Índices Espectrales	28
6.5 Generación del Conjunto de Datos de Entrenamiento	31
6.6. Clasificación Supervisada con Random Forest	33
6.7. Validación de Resultados	35
Optimización del Modelo y Replicabilidad.....	36
7. Resultados	38
7.3.1. Cruce de áreas en Informalidad	50

7.3.2. Cruce de áreas en formalidad.....	52
7.3.3. Desarrollo del tablero de control (Dashboard).....	58
8. Conclusiones	64
9. Recomendaciones.....	65
Referencias	66

Lista de tablas

Tabla 1 Tipo de bandas Landsat-8	28
Tabla 2. <i>Tipo de bandas Sentinel-2</i>	29
Tabla 3 Muestras de coberturas utilizadas	32
Tabla 4. Muestras de entrenamiento para la clasificación supervisada.....	32
Tabla 5. Tipos de usos de suelo identificados sobre las imágenes satelitales en hectáreas.	40
Tabla 6 Índices Kappa.....	42
Tabla 7 cambio de coberturas entre los años 2013 al 2019.....	45
Tabla 8 Matriz de Cambio de Cobertura 2013-2019 en Hectáreas	45
Tabla 9 cambio de coberturas entre los años 2019 al 2025.....	49
Tabla 10 Matriz de Cambio de Cobertura 2019-2025 en Hectáreas	49
Tabla 11 Areas de cobertura del suelo en predios en condicion de informalidad, año 2013	53
Tabla 12 Areas de cobertura del suelo en predios en condicion de informalidad, año 2019	54
Tabla 13 Areas de cobertura del suelo en predios en condicion de informalidad, año 2025	54
Tabla 14 Areas de cobertura del suelo en predios en condicion de formalidad, año 2013	54
Tabla 15 Areas de cobertura del suelo en predios en condicion de formalidad, año 2019	55
Tabla 16 Areas de cobertura del suelo en predios en condicion de formalidad, año 2025	55

Lista de figuras

figura 1. Localización de San José del Guaviare	22
figura 2. Imagen satelital Landsat 9, 2013.	26
figura 3. Imagen satelital sentinel 2, 2019	27
figura 4. Imagen satelital sentinel 2, 2025.	27
figura 5. Modelo Random Forest	35
figura 6. imagen satelital de clasificación de uso del suelo 2013	38
figura 7. imagen satelital de clasificación de uso del suelo 2019	39
figura 8. imagen satelital de clasificación de uso del suelo 2025	39
figura 9. Cambio de cobertura del suelo entre los años 2013 y 2019.	43
figura 10. Cambio de cobertura del suelo entre los años 2019 y 2025.	46
figura 11. Cobertura del suelo en predios en condicion de informalidad, año 2013.....	50
figura 12 Cobertura del suelo en predios en condicion de informalidad, año 2019.....	51
figura 13 Cobertura del suelo en predios en condicion de informalidad, año 2025.....	51
figura 14 Cobertura del suelo en predios en condicion de formalidad, año 2013.....	52
figura 15 Cobertura del suelo en predios en condicion de formalidad, año 2019.....	52
figura 16 Cobertura del suelo en predios en condicion de formalidad, año 2025.....	53
figura 17. Comparación de cobertura según formalidad-año 2013.....	56
figura 18. Comparación de cobertura según formalidad-año 2019.....	57
figura 19. Comparación de cobertura según formalidad-año 2025.....	57
figura 20. Inicio y configuración inicial del dashboard.	58
figura 21. Incorporación del mapa principal	59
figura 22. Configuración de la leyenda y controles del mapa.....	59
figura 23. Adición de gráficos de barras laterales	60

figura 24. Incorporación de indicadores numéricos superiores.....61

figura 25. Incorporación de indicadores numéricos inferiores.....61

figura 26. Creación de pestañas de selección para uso de suelo62

figura 27. Creación de pestañas de selección de predios en informalidad62

figura 28. Creación de pestañas de selección de predios en formalidad62

Siglas, acrónimos y abreviaturas

APA	American Psychological Association
Cms.	Centímetros
ERIC	Education Resources Information Center
Esp.	Especialista
MP	Magistrado Ponente
MSc	Magister Scientiae
Párr.	Párrafo
PhD	Philosophiae Doctor
PBQ-SF	Personality Belief Questionnaire Short Form
PostDoc	PostDoctor
UManizales	Universidad de Manizales
MSc	Magister
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
UPME	Unidad de Planeación Minero-Energética
SIG	Sistemas de Información Geográfica
UTM	Universal Transverse Mercator

Resumen

La presente investigación tiene como objetivo analizar los patrones de deforestación y la variación de la cobertura vegetal en el municipio de San José del Guaviare, cubriendo el periodo de 2013 a 2025. Se busca identificar y cuantificar la pérdida de vegetación, así como vincular estos cambios con posibles causas subyacentes como la minería ilegal, la ganadería extensiva, los cultivos ilícitos, y la tala indiscriminada de árboles. La investigación se basa en un análisis multitemporal que integra teledetección y Sistemas de Información Geográfica (SIG). Se utilizará el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) a partir de series de imágenes satelitales. Esta herramienta permitirá cuantificar los cambios en la cobertura vegetal, que serán correlacionados con información catastral de carácter multipropósito para establecer la relación entre las transformaciones del paisaje y las dinámicas territoriales y socioeconómicas.

Se espera que los resultados de este análisis proporcionen una cuantificación precisa del área deforestada y la tasa de cambio a lo largo del periodo de estudio. Los hallazgos servirán como una base robusta y objetiva para el diseño de estrategias de conservación, restauración ecológica y una planificación territorial más sostenible.

La investigación busca fortalecer la relación entre el análisis geoespacial y la formulación de políticas públicas, ofreciendo recomendaciones que permitan abordar de manera más efectiva los desafíos ambientales que enfrenta la región.

Palabras clave: Teledetección, Deforestación, Conservación, Monitoreo, Gestión sostenible.

Abstract

This research aims to analyze deforestation patterns and vegetation cover changes in the municipality of San José del Guaviare, covering the period from 2013 to 2025. It seeks to identify and quantify vegetation loss and link these changes to possible underlying causes such as illegal mining, extensive livestock farming, illicit crops, and indiscriminate logging. The research is based on a multitemporal analysis that integrates remote sensing and Geographic Information Systems (GIS). The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) will be used based on satellite image series. This tool will quantify changes in vegetation cover, which will be correlated with multipurpose cadastral information to establish the relationship between landscape transformations and territorial and socioeconomic dynamics.

The results of this analysis are expected to provide an accurate quantification of the deforested area and the rate of change over the study period. The findings will serve as a robust and objective basis for the design of conservation strategies, ecological restoration, and more sustainable territorial planning.

The research seeks to strengthen the relationship between geospatial analysis and public policymaking, offering recommendations that will more effectively address the environmental challenges facing the region.

Keywords: Remote sensing, Deforestation, Conservation, Monitoring, Sustainable management.

Introducción

La deforestación es una de las principales amenazas para la biodiversidad y el equilibrio ecosistémico a nivel global. En Colombia, este fenómeno impacta significativamente en la región amazónica, dada su vasta riqueza natural (IDEAM, 2024; FAO y PNUMA, 2020). Específicamente, el municipio de San José del Guaviare, en la zona de transición entre la Orinoquía y la Amazonía, ha experimentado una alarmante pérdida de su cobertura vegetal. Esta problemática se atribuye a factores como la expansión de la frontera agropecuaria, los cultivos ilícitos, la ganadería extensiva, la minería ilegal y los incendios forestales (Botero, 2020; Banco Interamericano de Desarrollo, 2017).

El presente estudio tiene como objetivo central realizar un análisis multitemporal de la cobertura vegetal y los patrones de deforestación en San José del Guaviare, abarcando el periodo de 2013 a 2025. La metodología se basa en la integración de la teledetección y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para cuantificar la vegetación perdida. Específicamente, se empleará el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) a partir de imágenes satelitales, complementando este análisis con información catastral de carácter multipropósito. Este enfoque busca vincular las transformaciones del paisaje con las dinámicas de uso del suelo y la tenencia de la tierra (IDEAM & UPME, 2022).

Para este estudio, se utilizaron imágenes del programa Landsat 8 y del sensor Sentinel 2, ambas fuentes de datos gratuitas y de acceso público que permiten un análisis multitemporal adecuado. Las imágenes de Landsat 8 tienen una resolución espacial de 30 metros, mientras que las de Sentinel 2 ofrecen una mayor resolución de 10 metros. Las imágenes fueron descargadas de la plataforma EarthExplorer (USGS) y del portal Copernicus Open Access Hub (ESA), respectivamente.

El procesamiento se realizó en el software QGis (Quantum Gis) e incluyó un preprocesamiento para corrección radiométrica, atmosférica y geométrica. Para la clasificación de la cobertura del suelo, se empleó un método supervisado, digitalizando polígonos de entrenamiento basados en la metodología CORINE Land Cover (CLC) adaptada a la región amazónica. Finalmente, la validación se llevó a cabo mediante una matriz de confusión para determinar la precisión del resultado.

Los resultados de esta investigación no solo enriquecerán el conocimiento técnico-científico, sino que también servirán como una base para el diseño de estrategias de conservación, restauración ecológica y planificación territorial sostenible. El estudio busca fortalecer la relación entre el análisis geoespacial y la formulación de políticas públicas, lo que permitirá abordar de manera más efectiva los complejos desafíos ambientales de la región (Bonilla-Valencia et al., 2021; CONPES, 2020).

1 planteamiento del problema

En Colombia, la pérdida de cobertura vegetal es una problemática ambiental crítica que impacta directamente la estabilidad de los ecosistemas, el ciclo hidrológico y la biodiversidad. Esta situación es particularmente grave en San José del Guaviare, un punto de transición entre la Orinoquía y la Amazonía, donde la cobertura vegetal ha disminuido progresivamente debido a factores como la expansión de la frontera agropecuaria, la ganadería extensiva, la minería ilegal y los cultivos ilícitos (Botero, 2020; Banco Interamericano de Desarrollo, 2017).

A pesar de que instituciones como el IDEAM han desarrollado estudios a nivel nacional, en San José del Guaviare persisten vacíos de información técnico-especializada para entender la magnitud y las particularidades del problema a escala municipal. Las cifras disponibles no satisfacen la necesidad de un análisis espacial detallado que permita asociar la pérdida de cobertura

vegetal con la dinámica predial y el uso actual del suelo. Esta limitación dificulta la planeación territorial, la formulación de estrategias de conservación y la implementación de acciones de restauración eficaces en el ámbito local (IDEAM, 2024; FAO y PNUMA, 2020).

La ausencia de un enfoque geoespacial que integre de manera precisa las herramientas técnicas de monitoreo impide una comprensión integral de los patrones de deforestación. Actualmente, existe una débil articulación entre los Sistemas de Información Geográfica (SIG), las imágenes satelitales, el cálculo de índices de vegetación como el NDVI y la cartografía catastral multipropósito con los procesos de toma de decisiones. Esta desconexión tecnológica y metodológica limita la efectividad de las políticas públicas orientadas a frenar la pérdida de cobertura vegetal en territorios altamente vulnerables.

Por tanto, el presente trabajo busca cerrar esta brecha metodológica y técnica. Mediante un análisis multitemporal y el uso de herramientas geoespaciales, se identificarán los cambios en la cobertura vegetal en San José del Guaviare entre 2013 y 2025. El estudio vinculará estos cambios con las dinámicas territoriales y los usos del suelo registrados en bases catastrales, proporcionando un diagnóstico geoespacial que servirá como una herramienta técnica para fortalecer la gestión ambiental y el ordenamiento territorial.

A partir de ello, surge la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo ha variado la cobertura vegetal en San José del Guaviare entre 2013 y 2025, y qué relación existe entre esta variación y el uso del suelo registrado en la cartografía catastral multipropósito?

1.1 Antecedentes

La deforestación es uno de los procesos de transformación territorial más significativos en América Latina. Colombia ha experimentado una pérdida sostenida de cobertura vegetal, lo que genera profundos impactos en la biodiversidad, los ciclos hidrológicos, los suelos y los modos de vida de las comunidades rurales. Según el IDEAM (2024), el país perdió más de un millón de hectáreas de bosque natural entre 2013 y 2022, concentradas principalmente en la región amazónica. Esta problemática se debe a dinámicas estructurales como la expansión de la frontera agropecuaria, los cultivos ilícitos y el debilitamiento institucional para el control del uso del suelo.

Diversos organismos internacionales, como la FAO y el PNUMA (2020), han advertido que la pérdida de cobertura vegetal en países megadiversos como Colombia compromete seriamente los compromisos climáticos y la conectividad ecológica. Aunque el monitoreo satelital ha avanzado, persiste una brecha importante entre la disponibilidad de datos y su aplicación efectiva en la gestión territorial. Los análisis a escala nacional a menudo carecen del nivel de desagregación espacial y contextual necesario para la toma de decisiones a nivel local.

En este escenario, el municipio de San José del Guaviare se ha consolidado como un foco crítico de deforestación. Su ubicación lo convierte en un corredor biogeográfico estratégico, pero también en un espacio altamente vulnerable a presiones antrópicas. Botero (2020) y el Banco Interamericano de Desarrollo (2017) identifican las principales causas de la pérdida de cobertura vegetal en la región: la ganadería extensiva, la minería ilegal y los cultivos de uso ilícito. Estos factores están asociados a una ocupación desordenada del territorio, exacerbada por la débil presencia institucional y la limitada articulación entre la planificación predial y la conservación ambiental.

A nivel metodológico, la literatura reciente ha demostrado la efectividad de los enfoques multitemporales que integran imágenes satelitales, índices de vegetación y Sistemas de Información Geográfica (SIG) para el análisis del cambio de cobertura vegetal. Estudios previos han utilizado estas herramientas para identificar patrones de fragmentación (Correa Ayram et al., 2020) y para la gestión territorial y la sostenibilidad energética (IDEAM y UPME, 2022). Sin embargo, gran parte de estos análisis se han mantenido en escalas regionales, limitando su aplicabilidad directa en contextos municipales. El presente estudio se diferencia al proponer un análisis geoespacial a escala local que articula el análisis multitemporal de la cobertura vegetal con el componente socioespacial del catastro.

En respuesta a esta necesidad, el presente trabajo se centra en San José del Guaviare para comprender cómo ha cambiado la cobertura vegetal entre 2013 y 2025 y cuál es la relación de estos cambios con la estructura predial y el uso del suelo. El objetivo es generar conocimiento técnico útil para la gestión ambiental local, la planificación territorial y el diseño de políticas públicas basadas en evidencia geográfica.

2. Justificación

El análisis de la cobertura vegetal desde una perspectiva multitemporal y geoespacial se ha convertido en una herramienta clave para comprender los procesos de transformación del territorio y evaluar el impacto de las actividades humanas sobre los ecosistemas. En Colombia, donde la deforestación ha sido persistente en regiones como la Amazonía y el piedemonte llanero, este tipo de estudios cobran especial relevancia para orientar estrategias de conservación y restauración, así como para apoyar procesos de planificación territorial a nivel local.

San José del Guaviare, ubicado en una zona de alta riqueza ecológica, ha experimentado un deterioro progresivo de su cobertura vegetal, producto de factores como la expansión de la frontera agropecuaria, los cultivos ilícitos, la ganadería extensiva, la minería ilegal y la ocupación informal del territorio (Botero, 2020; BID, 2017).

A pesar de los esfuerzos institucionales por monitorear la deforestación a través del IDEAM, y de los llamados de alerta emitidos por organismos internacionales como la FAO y el PNUMA (2020), existe aún una brecha significativa en el análisis detallado de estos procesos a escala municipal, que permita entender su dinámica en relación con variables territoriales y socioeconómicas.

En este contexto, la presente investigación se justifica por su potencial para aportar insumos técnicos especializados que integren herramientas de teledetección, análisis SIG y cartografía catastral multipropósito. El uso del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) sobre imágenes satelitales permite observar y cuantificar los cambios en la vegetación en el tiempo. Cuando esta información se cruza con datos catastrales, se posibilita identificar relaciones entre la

pérdida de cobertura y el uso real del suelo, la estructura predial y los patrones de ocupación del territorio (IDEAM & UPME, 2022).

Además del aporte técnico, el estudio tiene un valor institucional y social. Puede servir como base para que las autoridades locales y regionales formulen políticas de uso del suelo basadas en evidencia, fortalezcan procesos de monitoreo participativo y orienten intervenciones en áreas críticas. También contribuye a la implementación de estrategias nacionales como el Catastro Multipropósito y el Plan Nacional de Restauración Ecológica (CONPES, 2020), promoviendo el uso eficiente y sostenible del territorio.

Por último, desde el punto de vista académico, esta investigación aporta al cuerpo de conocimiento sobre los procesos de deforestación en Colombia, demostrando cómo el uso integrado de SIG, NDVI y bases catastrales puede generar análisis más robustos y útiles para la gestión ambiental local. Así, el trabajo se presenta como una propuesta pertinente, actualizada y alineada con los desafíos que enfrentan los territorios amazónicos y de frontera en el país.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Analizar y cuantificar los patrones de variación de la cobertura vegetal y la deforestación en el municipio de San José del Guaviare, para el periodo 2013-2025, mediante la integración de análisis multitemporal y el catastro multipropósito, con el fin de generar insumos técnicos para la planificación territorial y la formulación de políticas públicas.

3.2 Objetivos específicos

3.2.1 Cuantificar el área deforestada en el municipio de San José Del Guaviare entre los años 2013 y 2025, a través del análisis multitemporal de imágenes satelitales y el cálculo del NDVI, mediante la generación de mapas temáticos.

3.2.2 Relacionar los cambios en la cobertura vegetal con dinámicas territoriales locales, como expansión agropecuaria, infraestructura y ordenamiento territorial, para contribuir al diseño de políticas públicas ambientales.

3.2.3 Realizar un diagnóstico catastral de los predios ubicados en la zona de estudio, que permita conocer la realidad jurídica, física y económica de la tierra, facilitando la implementación de políticas públicas y enfrentar dicha problemática, representada en un dashboards.

4. Hipótesis

4.1 Hipótesis de trabajo

La deforestación en el municipio de San José del Guaviare entre 2013 y 2025 está directamente relacionada con la expansión de la frontera agrícola y la ganadería extensiva, mostrando una correlación espacial entre las áreas de mayor pérdida de cobertura vegetal y el aumento de estas actividades.

4.1.1 Hipótesis nula

No existe una relación significativa entre la deforestación en el municipio de San José del Guaviare entre 2013 y 2025 y la expansión de la frontera agrícola y la ganadería extensiva.

4.1.1.1 Hipótesis alterna.

Existe una relación significativa entre la deforestación en el municipio de San José del Guaviare entre 2013 y 2025 y otros factores, como la minería ilegal, la tala indiscriminada o el desarrollo de infraestructura.

4.1.1.1.1 Variables.

La variable dependiente es la deforestación medida como cambio en la cobertura vegetal, y se calcula a través del NDVI y las independientes son la expansión de la frontera agrícola, ganadería extensiva, minería ilegal, tala indiscriminada y desarrollo de infraestructura.

5. Marco teórico

El análisis multitemporal de la cobertura vegetal se ha consolidado como un enfoque fundamental para cuantificar y comprender el impacto progresivo de las actividades humanas sobre los ecosistemas terrestres. Este tipo de estudios permite identificar tendencias, zonas críticas de pérdida de vegetación y sus implicaciones ecológicas, socioeconómicas y políticas (Pettorelli et al., 2021). La incorporación de tecnologías geoespaciales como la teledetección y los sistemas de información geográfica (SIG) ha revolucionado la forma en que se monitorean, cuantifican y modelan los cambios ambientales a distintas escalas (Alonso, 2017).

La teledetección, entendida como la obtención de información de la superficie terrestre a distancia, es la base del monitoreo ambiental moderno. Una de sus aplicaciones más relevantes es el uso del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), una métrica clave en la detección de cambios en la salud y densidad de la vegetación (Peralta, 2018). Este índice, calculado a partir de la reflectancia en los espectros del rojo (RED) y el infrarrojo cercano (NIR), se utiliza globalmente para identificar procesos como la deforestación, la degradación de suelos y la desertificación (Pettorelli et al., 2021).

Complementando la teledetección, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son herramientas esenciales para el análisis, la visualización y la gestión de grandes volúmenes de datos geoespaciales. La integración de los SIG con la teledetección no solo permite la caracterización física del territorio, sino que facilita la superposición de capas de información (p. ej., infraestructura, uso del suelo y límites prediales) para comprender las presiones antrópicas que inciden sobre los ecosistemas (Correa Ayram et al., 2020). Los estudios recientes destacan que esta integración es crucial para la identificación de patrones de deforestación, permitiendo vincularlos

con variables socioeconómicas y proponer soluciones de restauración ecológica basadas en evidencia (Asner et al., 2018; Bonilla-Valencia et al., 2021).

El análisis geoespacial se enmarca en un contexto legal y estratégico que legitima su uso. La Constitución Política de Colombia (1991), en sus artículos 79 y 80, establece la responsabilidad del Estado en la protección del ambiente y la planificación del uso del suelo. A nivel de políticas públicas, documentos clave como el CONPES 4021 de 2021 y la Ley 1450 de 2011 promueven la sostenibilidad ambiental y la actualización del catastro, no solo con fines tributarios, sino como un insumo estratégico para la ordenación del territorio y el control del uso ilegal del suelo.

En este sentido, el Catastro Multipropósito se presenta como una herramienta fundamental para el monitoreo y la gestión territorial. Al integrar información física, jurídica y económica del predio, permite establecer vínculos directos entre la tenencia de la tierra, los usos actuales del suelo y los conflictos socioambientales (CONPES, 2020). La integración de esta información catastral con el análisis de cobertura vegetal, tal como lo propone esta investigación, es clave para lograr una planificación territorial más precisa y transparente (IDEAM & UPME, 2022).

6. Metodología

6.1 Localización

San José del Guaviare, capital del departamento de Guaviare, está situado en el suroccidente de Colombia, en la región amazónica. Su cabecera municipal se encuentra en las coordenadas 2°34'15" latitud norte y 72°38'25" longitud oeste, en una estratégica zona de transición ecológica entre la Amazonía y la Orinoquía, al noroccidente de la confluencia de los ríos Guaviare y Guayabero. Esta ubicación le confiere una significativa importancia geoestratégica, ambiental y socioeconómica. El municipio abarca aproximadamente 16.769 km², donde predominan la selva húmeda tropical, las sabanas y áreas de uso agropecuario, factores que han influido en la transformación del paisaje, la expansión de la frontera agrícola y la presión sobre los bosques nativos (IGAC, 2018; DANE, 2023).

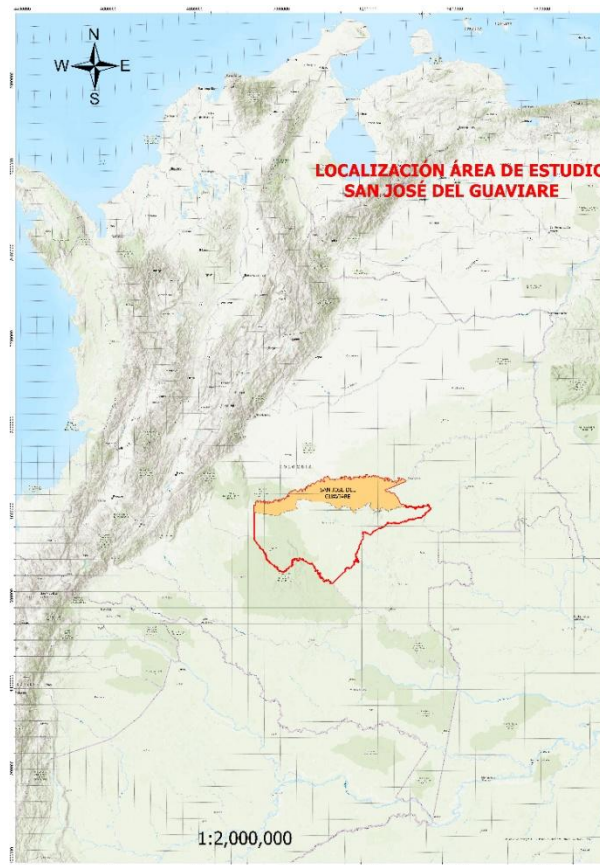


figura 1. Localización de San José del Guaviare

6.2 Fases metodológicas

La presente investigación implementa una metodología de carácter cuantitativo, centrada en el análisis geoespacial multitemporal. El enfoque se ha diseñado para seguir una secuencia lógica que responde a cada uno de los objetivos específicos planteados. El proceso se divide en tres fases principales: I. Cuantificación de la Pérdida de Cobertura Vegetal, II. Correlación de la Deforestación con la Dinámica Predial, y III. Integración de los Resultados para la Gestión Territorial.

6.2.1 Fase I: Cuantificación de la Pérdida de Cobertura Vegetal

Esta fase está directamente alineada con el Objetivo Específico 3.2.1 (Cuantificar la pérdida de cobertura vegetal). Se enfoca en el procesamiento y análisis de las imágenes satelitales para determinar la variación de la cobertura vegetal a lo largo de los 12 años de estudio.

- **Obtención y Preprocesamiento de Imágenes:** Se utilizaron imágenes de los sensores **Landsat 8** (para 2013) y **Sentinel 2** (para 2019 y 2025), descargadas de las plataformas **EarthExplorer (USGS)** y **Copernicus Open Access Hub (ESA)**. Las imágenes fueron preprocesadas mediante correcciones radiométricas, atmosféricas y geométricas para asegurar la consistencia y la comparabilidad de los datos.
- **Cálculo de Índices Espectrales:** Se calcularon los siguientes índices para cada año, utilizando las bandas espectrales adecuadas para cada sensor:
 - Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)
 - Índice Diferencial de Agua Normalizado (NDWI)
 - Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI)

- Índice de Vegetación Mejorado (EVI)
- **Clasificación y Cuantificación de Coberturas:** Mediante el software ArcGIS Pro, se aplicó una clasificación supervisada. Las muestras de entrenamiento se generaron por fotointerpretación, siguiendo la metodología CORINE Land Cover (CLC) adaptada al contexto local. Una vez obtenidos los mapas temáticos de cobertura para 2013, 2019 y 2025, se cuantificó la superficie de las áreas deforestadas en cada periodo.
- **Análisis de Tasa de Cambio:** Se calculó la tasa de pérdida de vegetación para el periodo completo (2013-2025) y los subperíodos (2013-2019 y 2019-2025), permitiendo identificar la velocidad y dirección de los cambios.

6.2.2 Fase II: Correlación de la Deforestación con la Dinámica Predial

Esta fase se vincula directamente con el Objetivo Específico 3.2.2 (Relacionar los cambios en la cobertura vegetal...). Su propósito es encontrar la conexión entre los patrones de deforestación identificados en la Fase I y la información del catastro multipropósito.

- **Adquisición y Preparación de Datos Catastrales:** Se obtuvieron los datos de catastro del municipio de San José del Guaviare. Se realizó una limpieza y validación de la información para asegurar la calidad de las bases de datos.
- **Análisis de Superposición Espacial:** Utilizando herramientas SIG, se superpusieron los mapas de deforestación generados en la Fase I con la capa de predios catastrales. Esta técnica permite identificar los predios específicos en los que ha ocurrido la pérdida de cobertura vegetal.
- **Análisis Atributivo:** Se vincularon los atributos de los predios (p. ej., área, tipo de tenencia, uso del suelo legal) con la magnitud de la deforestación. Este análisis permitirá determinar

si existen patrones de deforestación asociados a la estructura de la propiedad (por ejemplo, predios de mayor o menor tamaño, propiedades formales vs. informales).

6.2.3 Fase III: Integración de los Resultados para la Gestión Territorial

Esta fase corresponde al Objetivo Específico 3.2.3 (Generar un diagnóstico geoespacial...).

El objetivo es consolidar y presentar los resultados de las fases anteriores de una manera que sea útil y aplicable para la toma de decisiones.

- **Elaboración del Diagnóstico Geoespacial:** Se integraron los hallazgos de las fases I y II para crear un diagnóstico integral. Se generaron mapas temáticos detallados que muestran la ubicación de los puntos críticos de deforestación y los predios afectados, junto con la información catastral.
- **Desarrollo de un Tablero de Control (Dashboard):** Se diseñó y construyó un dashboard interactivo en ArcGIS pro, que permite visualizar de forma dinámica los resultados clave. Este tablero incluirá gráficos y mapas que muestren la tasa de deforestación, los predios más afectados, y las correlaciones encontradas entre la pérdida de vegetación y las características del catastro.
- **Formulación de Conclusiones y Recomendaciones:** Con base en el diagnóstico geoespacial y el tablero de control, se formularán conclusiones claras y se propondrán recomendaciones técnicas y de política pública dirigidas a las entidades del orden local y nacional.

6.3 Enfoque metodológico

6.3.1 Técnicas Y Métodos De Análisis:

El análisis de los datos recolectados se llevará a cabo utilizando el enfoque cuantitativo. El objetivo es ofrecer una comprensión integral de la deforestación en San José Del Guaviare, en el período de 2013 a 2023, a través de herramientas avanzadas de procesamiento y análisis de imágenes satelitales y de datos espaciales.

Para este estudio, se empleó una imagen Landsat 8 del año 2013, y dos imágenes Sentinel 2 de los años 2019 y 2025. Las imágenes se descargaron de forma gratuita desde la plataforma EarthExplorer del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), lo que asegura su acceso público y la trazabilidad del proceso. Para la selección de las imágenes, se utilizaron los criterios de baja nubosidad, alta calidad radiométrica y cobertura completa del área de estudio.

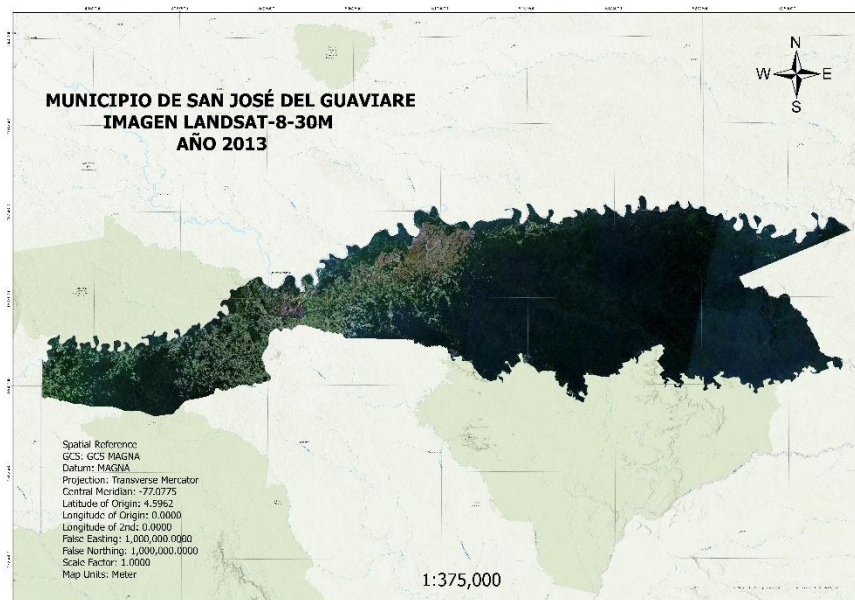


figura 2. Imagen satelital Landsat 9, 2013.

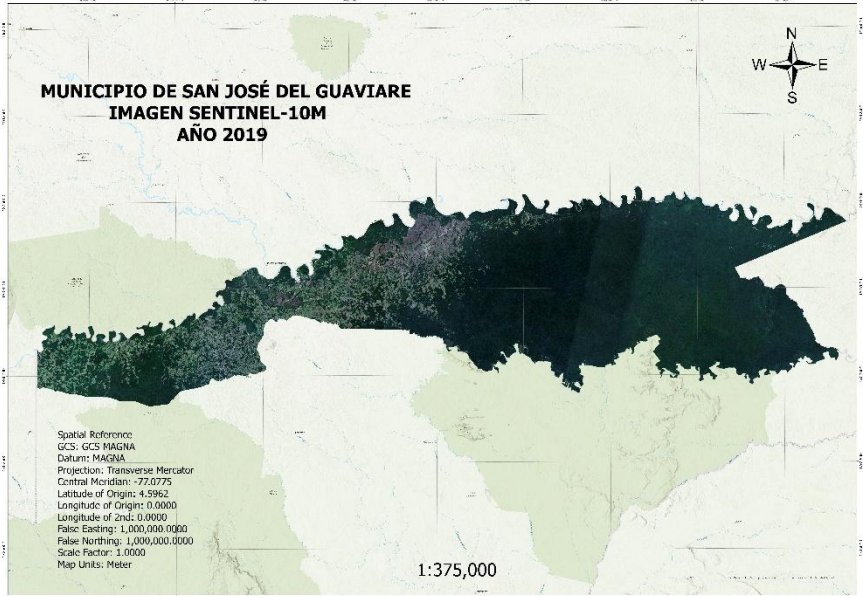


figura 3. Imagen satelital sentinel 2, 2019

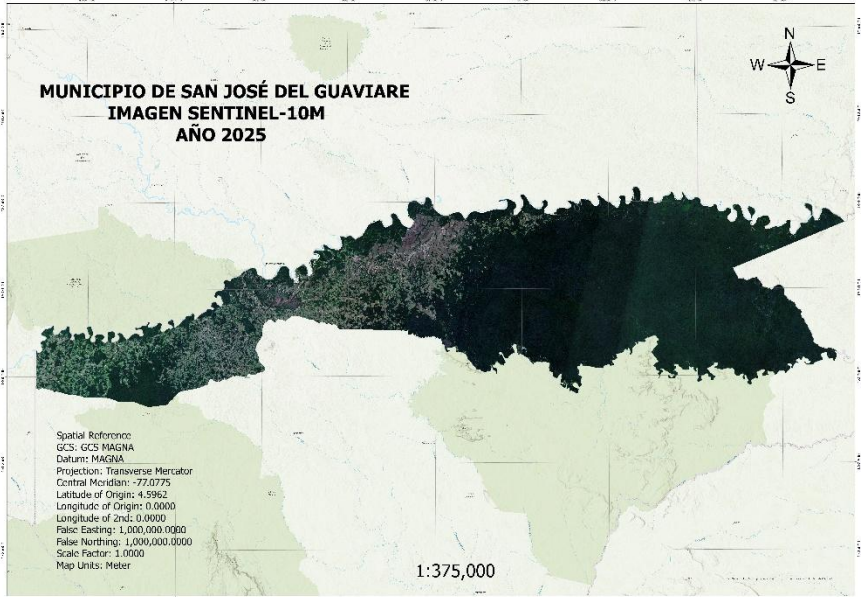


figura 4. Imagen satelital sentinel 2, 2025.

6.4 Preprocesamiento y Cálculo de Índices Espectrales

Para mejorar la precisión en la clasificación del uso del suelo y detectar patrones de deforestación en el municipio de San José del Guaviare, se aplicó un preprocesamiento a las imágenes satelitales multispectrales. Este proceso incluyó la corrección geométrica, reproyección al sistema de referencia adecuado (UTM zona 18N, EPSG:32618), y la generación de índices espectrales derivados de las bandas originales. Estos índices resaltan propiedades biofísicas clave que ayudan a diferenciar coberturas como vegetación densa, agua, suelo desnudo y áreas urbanas.

Se utilizaron imágenes satelitales provenientes de diferentes sensores y años del análisis temporal: imágenes Landsat para el año 2013, y Sentinel-2 para los años 2019 y 2025. Las imágenes Landsat proporcionan una resolución espacial de 30 metros, mientras que Sentinel-2 ofrece 10 metros en las bandas visibles e infrarrojo cercano. Cada conjunto fue corregido y calibrado para asegurar consistencia espectral y espacial.

Tabla 1 Tipo de bandas Landsat-8

BANDAS	LONGITUD DE ONDA (micrómetros)	RESOLUCIÓN (metros)
Banda 1 - Aerosol Costero	0,43 - 0,45	30
Banda 2 - Azul	0,45 - 0,51	30
Banda 3 - Verde	0,53 - 0,59	30
Banda 4 - Rojo	0,64 - 0,67	30
Banda 5 - Infrarrojo cercano (NIR)	0,85 - 0,88	30
Banda 6 - SWIR 1	1,57 - 1,65	30
Banda 7 - SWIR 2	2,11 - 2,29	30
Banda 8 - Pancromático	0,50 - 0,68	15
Banda 9 - Cirrus	1,36 - 1,38	30
Banda 10 - Infrarrojo térmico (TIRS) 1	10,60 - 11,19	100
Banda 11 - Infrarrojo térmico (TIRS) 2	11,50 - 12,51	100

Tabla 2. Tipo de bandas Sentinel-2

BANDAS	RESOLUCIÓN	LONGITUD DE ONDA	DESCRIPCIÓN
B1	60 m	443 nm	Ultra azul (Costa y Aerosol)
B2	10 m	490 nm	Azul
B3	10 m	560 nm	Verde
B4	10 m	665 nm	Rojo
B5	20 m	705 nm	Visible e infrarrojo Cercano (VNIR)
B6	20 m	740 nm	Visible e infrarrojo Cercano (VNIR)
B7	20 m	783 nm	Visible e infrarrojo Cercano (VNIR)
B8	10 m	842 nm	Visible e infrarrojo Cercano (VNIR)
B8A	20 m	865 nm	Visible e infrarrojo Cercano (VNIR)
B9	60 m	940 nm	Onda Corta Infrarroja (SWIR)
B10	60 m	1375 nm	Onda Corta Infrarroja (SWIR)
B11	20 m	1610 nm	Onda Corta Infrarroja (SWIR)
B12	20 m	2190 nm	Onda Corta Infrarroja (SWIR)

A partir de las imágenes de **Landsat 8** y **Sentinel 2**, se extrajeron las bandas espectrales necesarias (azul, verde, rojo e infrarrojo cercano) para el cálculo de los siguientes índices, los cuales permiten discriminar distintas coberturas del suelo y condiciones de la vegetación:

6.4.1 NDVI - Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada El NDVI permite discriminar zonas con vegetación densa, suelos desnudos y cuerpos de agua. Utiliza la relación entre las bandas del infrarrojo cercano (NIR) y la roja (RED).

- Fórmula general: $NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$
- Bandas utilizadas:
 - Para Landsat 8: $NDVI = (Banda\ 5 - Banda\ 4) / (Banda\ 5 + Banda\ 4)$
 - Para Sentinel 2: $NDVI = (Banda\ 8 - Banda\ 4) / (Banda\ 8 + Banda\ 4)$

6.4.2 NDWI - Índice Diferencial de Agua Normalizado El NDWI facilita la detección de cuerpos de agua y suelos con alta humedad, usando las bandas verde (GREEN) e infrarrojo cercano (NIR).

- Fórmula general: $NDWI = (GREEN - NIR) / (GREEN + NIR)$
- Bandas utilizadas:
 - Para Landsat 8: $NDWI = (Banda\ 3 - Banda\ 5) / (Banda\ 3 + Banda\ 5)$
 - Para Sentinel 2: $NDWI = (Banda\ 3 - Banda\ 8) / (Banda\ 3 + Banda\ 8)$

6.4.3 SAVI - Índice de Vegetación Ajustado al Suelo El SAVI corrige el efecto del fondo del suelo sobre el NDVI en áreas con vegetación escasa. Introduce un parámetro L, usualmente 0.5.

- Fórmula general: $SAVI = ((NIR - RED) / (NIR + RED + L)) * (1 + L)$
- Bandas utilizadas:
 - Para Landsat 8: $SAVI = ((Banda\ 5 - Banda\ 4) / (Banda\ 5 + Banda\ 4 + L)) * (1 + L)$
 - Para Sentinel 2: $SAVI = ((Banda\ 8 - Banda\ 4) / (Banda\ 8 + Banda\ 4 + L)) * (1 + L)$

6.4.4 EVI - Índice de Vegetación Mejorado El EVI es útil en vegetación densa y reduce las saturaciones del NDVI. Utiliza las bandas infrarrojo cercano (NIR), rojo (RED) y azul (BLUE).

- Fórmula general: $EVI = G * (NIR - RED) / (NIR + C1 * RED - C2 * BLUE + L)$
- Bandas utilizadas:
 - Para Landsat 8: $EVI = 2.5 * (Banda\ 5 - Banda\ 4) / (Banda\ 5 + 6 * Banda\ 4 - 7.5 * Banda\ 2 + 1)$
 - Para Sentinel 2: $EVI = 2.5 * (Banda\ 8 - Banda\ 4) / (Banda\ 8 + 6 * Banda\ 4 - 7.5 * Banda\ 2 + 1)$

6.5 Generación del Conjunto de Datos de Entrenamiento

La extracción de las muestras de entrenamiento para la clasificación supervisada se llevó a cabo mediante la digitalización de polígonos directamente sobre el stack multibanda. Este procedimiento se basó en una fotointerpretación visual minuciosa, utilizando combinaciones de bandas sintéticas y referencias históricas de Google Earth Pro para identificar las coberturas. Las clases de cobertura fueron definidas según la metodología CORINE Land Cover (CLC) adaptada al contexto amazónico.

- Para el año 2013 (Landsat 8): Se integraron las bandas 2 (Azul), 3 (Verde), 4 (Rojo) y 5 (Infrarrojo Cercano), junto con los índices calculados. Las combinaciones RGB sintéticas como la 4-3-2 y la 5-4-3 fueron utilizadas para la identificación visual.
- Para los años 2019 y 2025 (Sentinel 2): Se integraron las bandas 2 (Azul), 3 (Verde), 4 (Rojo) y 8 (Infrarrojo Cercano), junto con los índices calculados. Las combinaciones RGB sintéticas como la 4-3-2 y la 8-4-3 fueron utilizadas para la identificación visual.

Las clases de cobertura utilizadas fueron:

Tabla 3 Muestras de coberturas utilizadas

Clase	Cobertura
0	Agua
1	Bosque / Arbustivo denso
2	Suelo desnudo
3	Zona urbana
4	Arbustos y pastos

Las muestras fueron distribuidas espacialmente en diferentes zonas del municipio para capturar la variabilidad espectral de cada clase, reduciendo el riesgo de sobreajuste del modelo. Las imágenes fueron LandSat (2013), Sentinel 2 (2019) y Sentinel 2 (2025), las cuales se encuentran reflejadas en la siguiente tabla.

Tabla 4. Muestras de entrenamiento para la clasificación supervisada

Clase	Cobertura	Numero de muestras de entrenamiento		
		2013	2019	2025
0	Agua	96	201	137
1	Bosque / Arbustivo denso	100	216	100
2	Suelo desnudo	121	449	221
3	Zona urbana	13	197	80
4	Arbustos y pastos	35	231	87

6.6. Clasificación Supervisada con Random Forest

Se aplicó el algoritmo Random Forest (Breiman, 2001), una técnica de aprendizaje supervisado basada en un conjunto de árboles de decisión entrenados sobre subconjuntos aleatorios de datos (bagging). Cada árbol vota por una clase, y la predicción final se obtiene por mayoría.

Entre sus ventajas se destacan:

- **Alta precisión en problemas multiclase**

Esta ventaja se refiere a la capacidad del Random Forest para manejar eficazmente problemas de clasificación donde hay más de dos clases a predecir.

Random Forest combina múltiples árboles de decisión, cada uno entrenado en un subconjunto aleatorio de los datos.

Al agregar las predicciones de muchos árboles, el modelo puede capturar patrones complejos en los datos. Esta agregación de múltiples modelos (ensemble) mejora la precisión general, especialmente en situaciones donde hay múltiples clases a predecir.

Cada árbol en el bosque puede especializarse en diferentes aspectos de los datos, lo que permite al modelo capturar una gama más amplia de patrones y relaciones.

- **Tolerancia al sobreajuste:**

El sobreajuste (overfitting) es un problema común en los modelos de aprendizaje automático, especialmente cuando el modelo memoriza los datos de entrenamiento en lugar de aprender patrones generalizables. Esto provoca un rendimiento elevado en los datos de entrenamiento, pero una baja capacidad predictiva en datos nuevos o no vistos. Sin embargo, el algoritmo Random Forest incorpora varios mecanismos que permiten mitigar

eficazmente este problema, convirtiéndolo en una de sus principales ventajas frente a otros modelos más sensibles al sobreentrenamiento.

Random Forest utiliza una técnica conocida como bagging (bootstrap aggregating), en la cual cada árbol del conjunto se entrena sobre un subconjunto aleatorio del conjunto de datos original, generado mediante muestreo con reemplazo. Esta estrategia introduce variabilidad entre los árboles, reduce la varianza general del modelo y disminuye la posibilidad de que se reproduzcan patrones espurios específicos del conjunto de entrenamiento.

- **Capacidad de manejar datos con alta colinealidad:**

La colinealidad se refiere a la situación en la que dos o más variables predictoras están altamente correlacionadas entre sí. Esto puede ser problemático para algunos algoritmos, pero Random Forest lo maneja bien.

En el contexto mencionado (índices espectrales), es común tener variables que están altamente correlacionadas.

Random Forest selecciona aleatoriamente un subconjunto de características en cada división de árbol. Esta selección aleatoria reduce la dependencia de cualquier conjunto específico de características correlacionadas. El algoritmo puede utilizar diferentes combinaciones de características en diferentes árboles, permitiendo capturar información útil incluso cuando las variables están altamente correlacionadas.

Esto hace que Random Forest sea particularmente útil en aplicaciones como el análisis de imágenes satelitales o espectrales, donde muchos índices derivados pueden estar correlacionados.

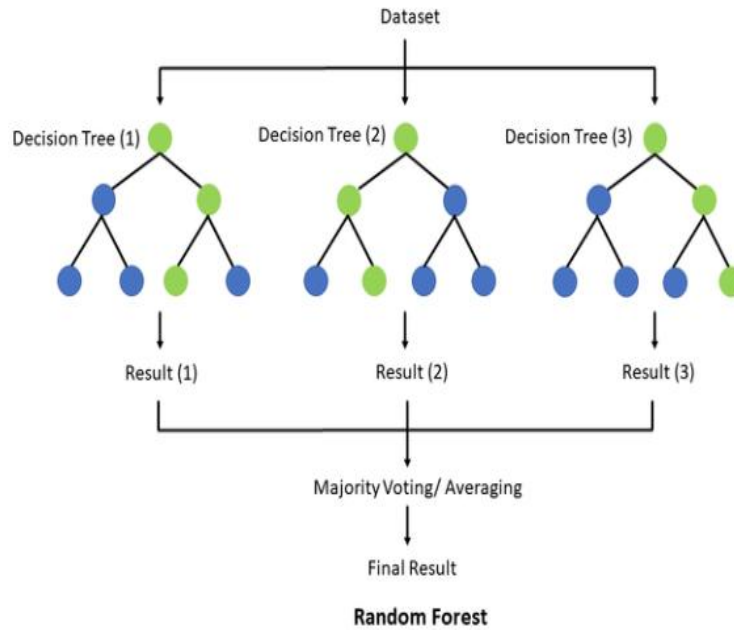


figura 5. Modelo Random Forest

Se utilizó un conjunto de 100 árboles y se optimizaron hiperparámetros como la profundidad máxima y el número mínimo de muestras por hoja mediante validación cruzada.

6.7. Validación de Resultados

La validación de los mapas de clasificación es un paso crítico para garantizar la fiabilidad de los resultados. Para ello, se empleó un conjunto de puntos de control independientes, cuya cobertura del suelo fue verificada mediante fotointerpretación de imágenes satelitales de muy alta resolución (Google Earth Pro). Se utilizó una estrategia de muestreo estratificado aleatorio, asegurando que el número de puntos de validación para cada clase (bosque, pastos, etc.) fuera proporcional a la superficie que ocupa en el mapa.

- **Matriz de Confusión y Métricas de Precisión:** La exactitud de la clasificación se evaluó mediante una matriz de confusión. A partir de esta matriz, se calcularon métricas de precisión:

- Precisión del Productor: Indicando la fiabilidad de la clasificación de cada clase.
- Precisión del Usuario: Reflejando la probabilidad de que un pixel clasificado realmente pertenezca a esa clase.
- Precisión Global: Muestra el porcentaje total de píxeles clasificados correctamente.

- **Coefficiente de Kappa:** Se calculó el coeficiente de Kappa (Cohen, 1960) para cuantificar el acuerdo entre la clasificación obtenida y los datos de referencia, corrigiendo la coincidencia por azar. Un valor de Kappa > 0.75 se considera una buena concordancia (Landis & Koch, 1977).

- $K = (P_o - P_e) / (1 - P_e)$
- Donde P_o es la proporción de acuerdo observado, y P_e es el acuerdo esperado por azar.

Optimización del Modelo y Replicabilidad

Para seleccionar el modelo de clasificación óptimo, se probaron múltiples combinaciones de bandas e índices espectrales (por ejemplo, NDVI, EVI, SAVI). Se evaluó el desempeño de cada combinación para cada año, buscando una precisión global superior al 85% y un coeficiente Kappa

mayor a 0.8. Este umbral se estableció para garantizar la robustez de los mapas y su utilidad en la toma de decisiones, siguiendo los estándares de validación de modelos de teledetección (Foody, 2002).

La replicabilidad del análisis se garantiza mediante la documentación detallada del proceso de preprocesamiento, la definición de las clases de entrenamiento, el tamaño de la muestra de validación, y los parámetros del algoritmo de clasificación supervisada. Los datos de validación y la matriz de confusión detallada se presentarán en la sección de Resultados para respaldar las afirmaciones sobre la precisión.

7. Resultados

Con base en la metodología se desarrolló una clasificación automática del uso del suelo mediante el algoritmo de Random Forest, utilizando imágenes satelitales multispectrales. A partir de estas combinaciones y el conjunto de entrenamiento, se entrenó el clasificador Random Forest para identificar las coberturas presentes en las imágenes. El resultado fue la detección de 4 clases generales que agrupan 10 tipos de cobertura. En las figuras (2), (3), (4) y (5) se presenta la cartografía del uso del suelo generada automáticamente a partir del procesamiento de imágenes de los satélites Landsat 8, Sentinel-2

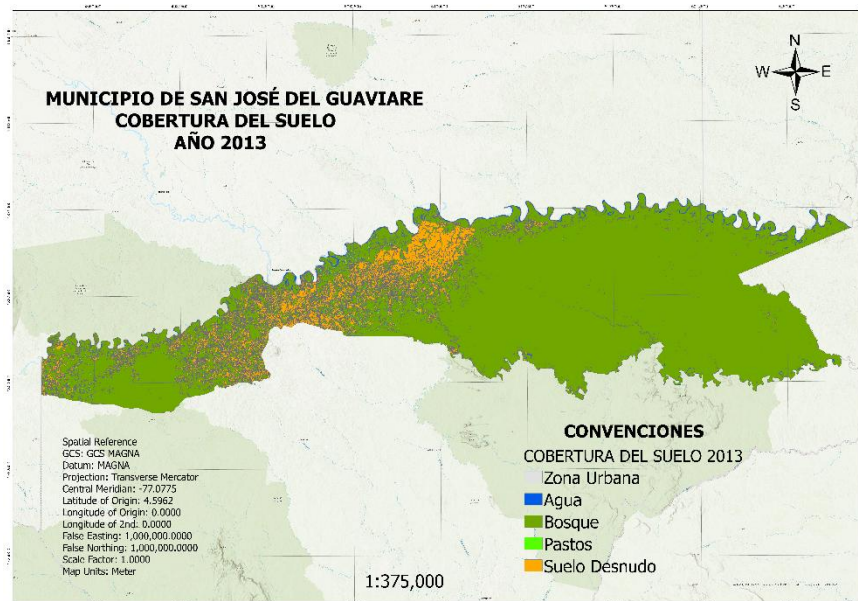


figura 6. imagen satelital de clasificación de uso del suelo 2013

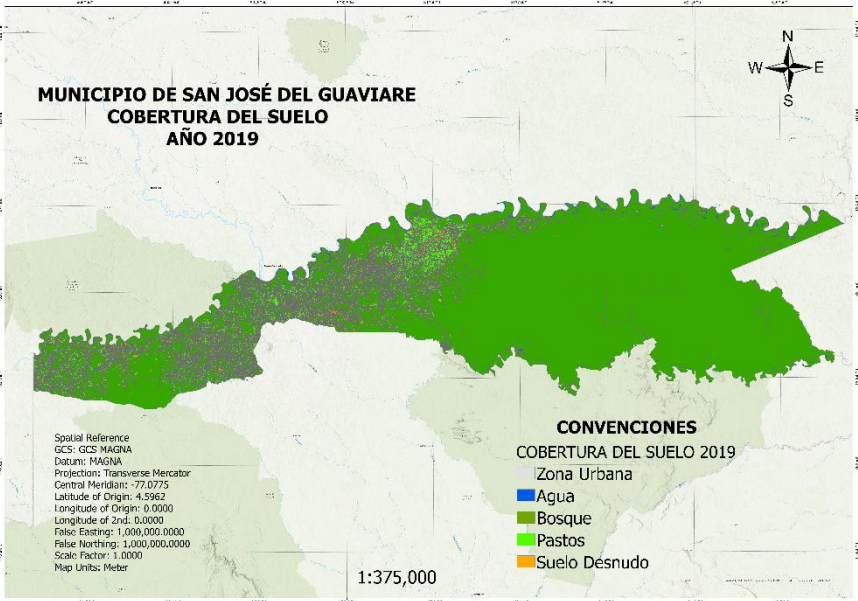


figura 7. imagen satelital de clasificación de uso del suelo 2019

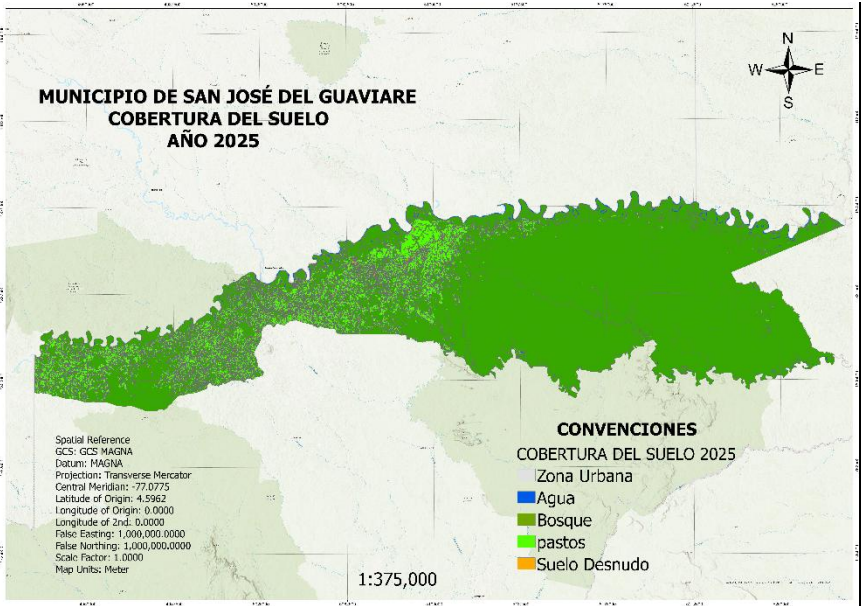


figura 8. imagen satelital de clasificación de uso del suelo 2025

Tabla 5. Tipos de usos de suelo identificados sobre las imágenes satelitales en hectáreas.

CLASES	COBERTURAS	FECHAS					
		2013		2019		2025	
		hec	%	hec	%	hec	%
Cuerpos de agua	Artificiales	25133,76	1,52	15599,81	0,94	17801,04	1,07
	Lagunas						
Suelo desnudo	Zonas sin o poca vegetación	176331,15	10,66	88756,41	5,36	12769,87	0,77
Vegetación	Vegetación herbácea	63492,21	3,84	200393,6	12,12	273465,09	16,54
	Vegetación arbustiva						
	Bosque	1387928,7	83,96	1347802,96	81,53	1348722,4	81,58
Zona urbana	Urbanizadas	175,86	0,01	504,97	0,03	311,37	0,01
	Industriales						
TOTAL		1653061,68		1653057,75		1653069,77	

Vectorizadas todas las clases de las imágenes teniendo en cuenta la metodología del CORINE LAND COVER, se procedió a calcular las respectivas áreas para las de tipo polígono en hectáreas; permitiendo así cuantificar los diferentes cambios en las coberturas del suelo en el municipio de San José del Guaviare ocurrido en las 4 épocas seleccionadas (ver tabla 6 y 7).

Tabla. Áreas y porcentajes por clase

- Cuerpos de agua:** Esta cobertura presentó una disminución entre 2013 (25.134 ha) y 2019 (15.600 ha), equivalente a una pérdida de aproximadamente 9.534 ha. Sin embargo, en 2025 se observa una leve recuperación, alcanzando 17.801 ha, lo que podría asociarse a un aumento de cuerpos de agua artificiales o cambios estacionales. Esta clase representó cerca del 1.5% en 2013 0.94% en 2019 y 1.07% en 2025, según la tabla 2.
- Suelo desnudo:** Mostró un comportamiento marcadamente decreciente, pasando de 176.331 ha en 2013(10.66%) a tan solo 12.770 ha en 2025 (0.77%), una pérdida superior al 90% del área inicial. Este descenso sugiere una fuerte recuperación de cobertura vegetal,

posiblemente por procesos de revegetación, cambios en el uso del suelo o reforestación pasiva/activa en la zona de estudio.

- **Vegetación (herbácea y arbustiva):** Esta categoría registró un incremento notable a lo largo del periodo. En 2013 cubría 63.492 ha (3.84%), mientras que en 2019 aumentó a 200.394 ha (12.12%), y en 2025 alcanzó su punto más alto con 273.465 ha (16.54%). El crecimiento sostenido de esta cobertura podría explicarse por la conversión de áreas degradadas o agrícolas hacia vegetación secundaria.
- **Bosque:** A pesar de una ligera reducción entre 2013 (1.387.929 ha) y 2019 (1.347.803 ha), el área boscosa se estabilizó hacia 2025 (1.348.722 ha), representando más del 81% del total en todos los años. Esto indica que el bosque es la cobertura dominante y relativamente estable, con variaciones menores atribuibles probablemente a errores de clasificación, dinámica natural o disturbios puntuales.
- **Zona urbana:** Aunque representa un porcentaje muy bajo del área total (0.01%–0.03%), se observa una expansión entre 2013(176 ha) y 2019 (505 ha), seguida de una leve disminución en 2025 (311 ha). Esto podría reflejar el desarrollo urbano incipiente o clasificaciones marginales en zonas industriales o de infraestructura.

La clasificación realizada evidencia una recuperación significativa de coberturas vegetales (particularmente herbácea y arbustiva), una reducción considerable del suelo desnudo, y una relativa estabilidad en las áreas boscosas. Los cuerpos de agua muestran variabilidad, posiblemente influenciada por condiciones climáticas, cobertura vegetal ribereña o resolución de las imágenes. Las zonas urbanas, aunque mínimas, tienden a una expansión moderada.

Tabla 6 Índices Kappa

Índice Kappa: 0.99						Índice Kappa: 0.98						Índice Kappa: 0.95					
88	0	0	0	0	0	12	0	0	0	1	0	38	0	0	0	0	0
0	984	0	0	0	0	0	736	4	0	2	0	0	1788	7	7	10	0
0	16	62	0	0	0	0	17	60	0	3	0	0	59	49	0	11	1
0	4	0	199	3	0	0	0	0	281	0	0	0	17	0	277	3	0
0	0	0	0	199	0	1	2	0	1	236	0	0	22	4	1	454	0
0	0	0	0	0	25	0	0	0	0	0	197	0	0	0	0	0	147
A) 2013						B) 2019						C) 2025					

El análisis de las matrices de confusión para las fechas de 2013, 2019 y 2025 demuestra una alta precisión en la clasificación realizada mediante el algoritmo Random Forest, con índices Kappa de 0.99, 0.98 y 0.95 respectivamente. En todas las fechas, la mayoría de las clases fueron correctamente identificadas, destacándose especialmente la consistencia en la clasificación de coberturas como cuerpos de agua, zonas urbanas y bosque denso. Las principales confusiones se presentaron en las clases relacionadas con vegetación herbácea y arbustiva, debido a su similitud espectral con otras coberturas, especialmente en la imagen del 2025. A pesar de estas variaciones, los resultados reflejan una clasificación robusta y confiable a lo largo del tiempo.

El modelo Random Forest logró resultados robustos en las tres fechas, con valores de índice Kappa superiores a 0.95, lo que indica un acuerdo muy alto con la realidad del terreno. Las pequeñas disminuciones en 2025 podrían estar asociadas a cambios fenológicos, condiciones atmosféricas, resolución espacial o la similitud espectral entre clases como vegetación arbustiva y bosque.

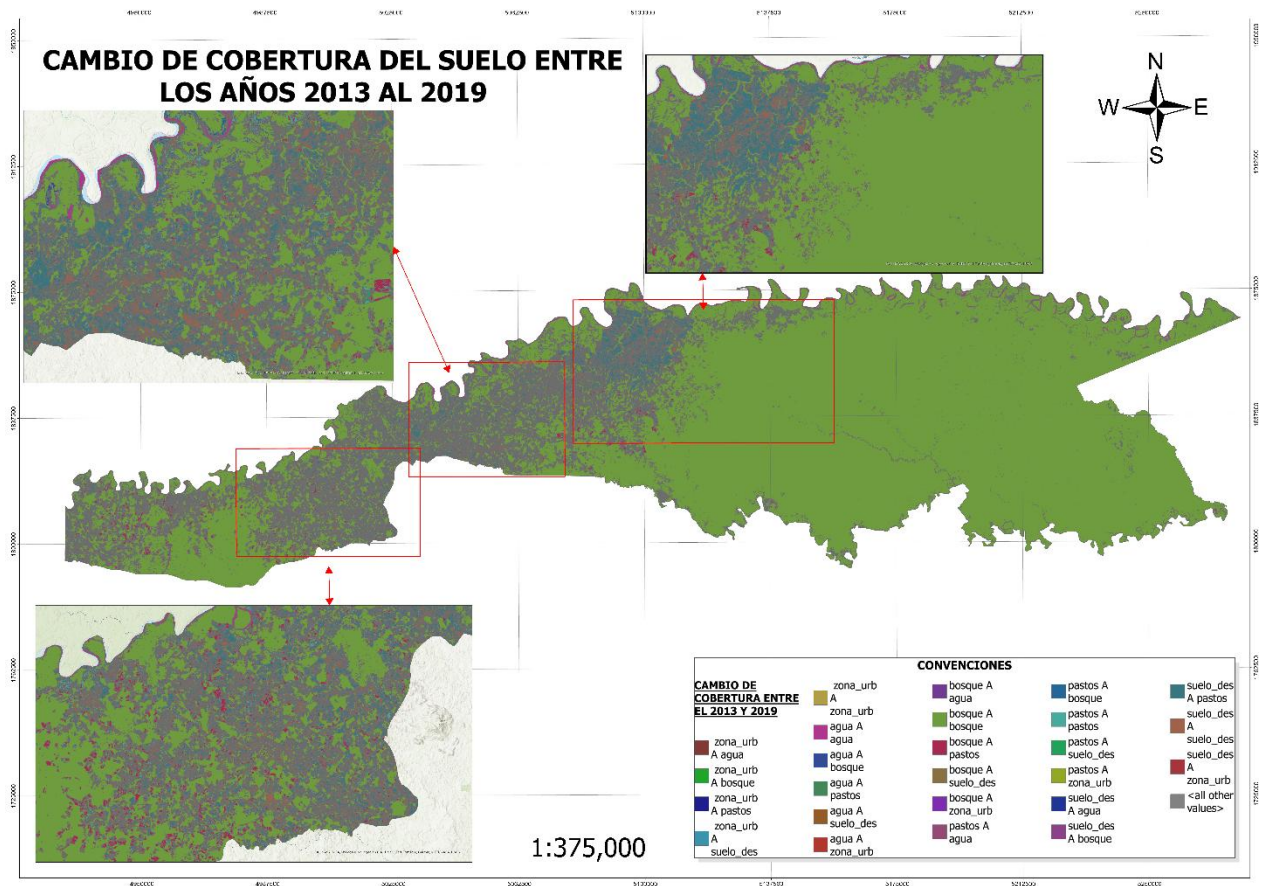


figura 9. Cambio de cobertura del suelo entre los años 2013 y 2019.

Como parte del análisis multitemporal, se realizó una intersección espacial entre las coberturas correspondientes a los años 2013 y 2019 en el municipio de San José del Guaviare. Esta operación permitió identificar los cambios específicos entre clases de cobertura en el periodo analizado. El resultado se consolidó en una matriz de cambio que expresa, en hectáreas, la superficie que transitó de una clase a otra. *tabla 7*.

Los resultados evidencian que la cobertura con mayor estabilidad fue el bosque, con un total de 1.315.819,5 ha que permanecieron como bosque entre ambos años. Sin embargo, también es la clase que más superficie perdió, al presentar transiciones hacia:

- Pastos: 57.165,8 ha
- Suelos desnudos: 16.537,2 ha
- Zonas urbanas: 55,9 ha
- Agua: 345,1 ha.

Estas cifras reflejan un proceso significativo de deforestación y conversión del bosque a usos agropecuarios y urbanos, siendo los pastos la principal cobertura receptora, lo cual sugiere una intensificación de la ganadería extensiva en la región.

Por su parte, los suelos desnudos presentan dos aspectos los cuales son: mientras que 57.224,4 ha se conservaron, por otro lado, se observan importantes cambios hacia:

- Pastos: 110.556,3 ha •
- Bosque: 9.149,2 ha (posible reforestación)
- Zonas urbanas: 245,2 ha.

En sentido contrario, los pastos también fueron origen de cambios importantes, perdiendo cobertura hacia:

- Suelos desnudos: 10.516,7 ha,
- Bosque: 19.723,5 ha (revegetación)
- Agua: 91,8 ha y Zonas urbanas: 20,6 ha.

La cobertura agua mostró una estabilidad parcial, manteniéndose en 14.339,3 ha, aunque también se registran transformaciones hacia pastos (2.558,8 ha) y suelos desnudos (4.110,7 ha), lo

que puede estar relacionado con procesos de sedimentación, drenaje artificial o desecación de cuerpos de agua.

Finalmente, las zonas urbanas, aunque con menor extensión relativa, mostraron dinámicas interesantes: pasaron a convertirse en suelos desnudos (105 ha), pastos (18,7 ha) e incluso bosque (1,17 ha), indicando procesos de abandono o reconfiguración del uso del suelo urbano.

Tabla 7 cambio de coberturas entre los años 2013 al 2019

CAMBIO DE COBERTURA DEL SUELO ENTRE LOS AÑOS 2013 AL 2019		
COBERTURA AÑO 2013	COBERTURA AÑO 2019	AREA (HA)
SUELO DESNUDO	ZONA URBANA	245.221003
SUELO DESNUDO	SUELO DESNUDO	57224.41361
SUELO DESNUDO	BOSQUE	9149.228613
SUELO DESNUDO	AGUA	88.437469
SUELO DESNUDO	PASTOS	110556.2993
PASTOS	PASTOS	30382.95881
PASTOS	ZONA URBANA	20.593853
PASTOS	SUELO DESNUDO	10516.66105
PASTOS	BOSQUE	19723.45919
PASTOS	AGUA	91.829215
BOSQUE	ZONA URBANA	55.923865
BOSQUE	SUELO DESNUDO	16537.20629
BOSQUE	AGUA	345.085558
BOSQUE	PASTOS	57165.76658
BOSQUE	BOSQUE	1315819.501
AGUA	PASTOS	2558.776561
AGUA	ZONA URBANA	92.848607
AGUA	SUELO DESNUDO	4110.716994
AGUA	BOSQUE	3220.074909
AGUA	AGUA	14339.25251
ZONA URBANA	PASTOS	18.677605
ZONA URBANA	ZONA URBANA	40.361527
ZONA URBANA	SUELO DESNUDO	105.021323
ZONA URBANA	BOSQUE	1.16757
ZONA URBANA	AGUA	0.80229

Tabla 8 Matriz de Cambio de Cobertura 2013-2019 en Hectáreas

	COBERTURA_2013	AGUA	BOSQUE	PASTOS	SUELO DESNUDO	ZONA URBANA
1	AGUA	14339.25251	3220.074909	2558.776561	4110.716994	92.848607
2	BOSQUE	345.085558	1315819.501	57165.76658	16537.20629	55.923865
3	PASTOS	91.829215	19723.45919	30382.95881	10516.66105	20.593853
4	SUELO DESNUDO	88.437469	9149.228613	110556.2993	57224.41361	245.221003
5	ZONA URBANA	0.80229	1.16757	18.677605	105.021323	40.361527

transición construida revela las trayectorias de transformación entre coberturas y sus respectivas magnitudes, expresadas en hectáreas.

Se observa que la clase bosque sigue siendo la cobertura dominante con la mayor estabilidad: 1.312.853,1 ha permanecieron como bosque en el periodo. No obstante, continúa el proceso de transformación hacia otros usos, principalmente:

- Pastos: 41.963,8 ha
- Suelos desnudos: 925,7 ha
- Agua: 669,4 ha
- Zonas urbanas: 25,9 ha.

Aunque la pérdida directa de bosque es menor en magnitud comparada con el periodo anterior (2013–2019), persiste la tendencia de conversión a usos agropecuarios, especialmente pastos, lo que refuerza la hipótesis sobre la incidencia de la ganadería extensiva en los procesos de deforestación.

La cobertura de pastos, por su parte, mantiene una notable estabilidad, con 157.676,3 ha que se conservaron bajo este uso. Sin embargo, presenta también dinámicas de cambio relevantes:

- Bosque: 38.174 ha (posible revegetación natural o reforestación)
- Suelos desnudos: 5.049,8 ha
- Zonas urbanas: 55,5 ha
- Agua: 776,7 ha.

Esto sugiere que algunas zonas de pastos han sido abandonadas, reforestadas o incluso convertidas en cuerpos de agua por procesos naturales o antrópicos.

Respecto a los suelos desnudos, se registra una importante superficie que transita hacia:

- Pastos: 74.822,6 ha
- Agua: 2.178,4 ha
- Bosque: 6.102,4 ha
- Zonas urbanas: 139,2 ha.

Aunque 5.721,2 ha permanecen como suelos desnudos, es notorio un proceso de reconversión o cobertura del suelo, lo que puede indicar procesos de revegetación o intervención para estabilización del terreno.

La cobertura agua, si bien mantiene su núcleo más estable con 13.930,1 ha, también presenta pérdidas hacia:

- Suelos desnudos: 525,7 ha
- Bosque: 502 ha
- Zonas urbanas: 34,4 ha.

Este comportamiento puede deberse a eventos de desecación o intervenciones antrópicas en cuerpos de agua naturales, como ciénagas o caños.

Las zonas urbanas, por su parte, mantienen relativa estabilidad (26,7 ha) pero también muestran expansión sobre:

- Suelos desnudos: 174,5 ha
- Pastos: 185,7 ha
- Bosque: 25,9 ha
- Agua: 44,8 ha.

Lo anterior puede interpretarse como indicio de crecimiento periurbano, informal o de ampliación de núcleos habitacionales, posiblemente asociados a procesos de migración o cambios en el uso del suelo por presión demográfica.

Tabla 9 cambio de coberturas entre los años 2019 al 2025

CAMBIO DE COBERTURA DEL SUELO ENTRE LOS AÑOS 2019 AL 2025		
COBERTURA AÑO 2019	COBERTURA AÑO 2025	AREA (HA)
AGUA	SUELO DESNUDO	525.658712
AGUA	ZONA URBANA	34.432509
AGUA	AGUA	13930.15253
AGUA	BOSQUE	501.956576
BOSQUE	AGUA	669.409143
BOSQUE	SUELO DESNUDO	925.651807
BOSQUE	ZONA URBANA	25.864256
BOSQUE	BOSQUE	1312853.145
BOSQUE	PASTOS	41963.84372
PASTOS	AGUA	776.66448
PASTOS	BOSQUE	38174.02855
PASTOS	SUELO DESNUDO	5049.785919
PASTOS	ZONA URBANA	55.45915
PASTOS	PASTOS	157676.3443
SUELO DESNUDO	AGUA	2178.359817
SUELO DESNUDO	BOSQUE	6102.417133
SUELO DESNUDO	SUELO DESNUDO	5721.222202
SUELO DESNUDO	ZONA URBANA	139.190558
SUELO DESNUDO	PASTOS	74822.57603
ZONA URBANA	AGUA	44.762386
ZONA URBANA	BOSQUE	25.900408
ZONA URBANA	SUELO DESNUDO	174.537734
ZONA URBANA	ZONA URBANA	26.744912
ZONA URBANA	PASTOS	185.7477

Tabla 10 Matriz de Cambio de Cobertura 2019-2025 en Hectáreas

COBERTURA_2019	AGUA	BOSQUE	PASTOS	SUELO DESNUDO	ZONA URBANA	
1	AGUA	13930.15253	501.956576	0.00000	525.658712	34.432509
2	BOSQUE	669.409143	1312853.145	41963.84372	925.651807	25.864256
3	PASTOS	776.66448	38174.02855	157676.3443	5049.785919	55.45915
4	SUELO DESNUDO	2178.359817	6102.417133	74822.57603	5721.222202	139.190558
5	ZONA URBANA	44.762386	25.900408	185.7477	174.537734	26.744912

En el marco del diagnóstico catastral de los predios de la zona de estudio, se exploraron las realidades jurídicas, físicas y económicas de la tierra. A través de este análisis, se revelaron cómo

los predios formales mantuvieron mejor la cobertura boscosa, mientras que las áreas informales enfrentaron desafíos con la expansión de pastos.

Las siguientes son los resultados de los cruces realizados en el software ArcGIS Pro mediante el uso de las capas entre el área formal e informal del año 2024 (Base de datos geográfica del IGAC) y las coberturas para obtener los porcentajes y estos presentados tanto en salidas graficas como en tablas para su posterior análisis:

7.3.1. Cruce de áreas en Informalidad

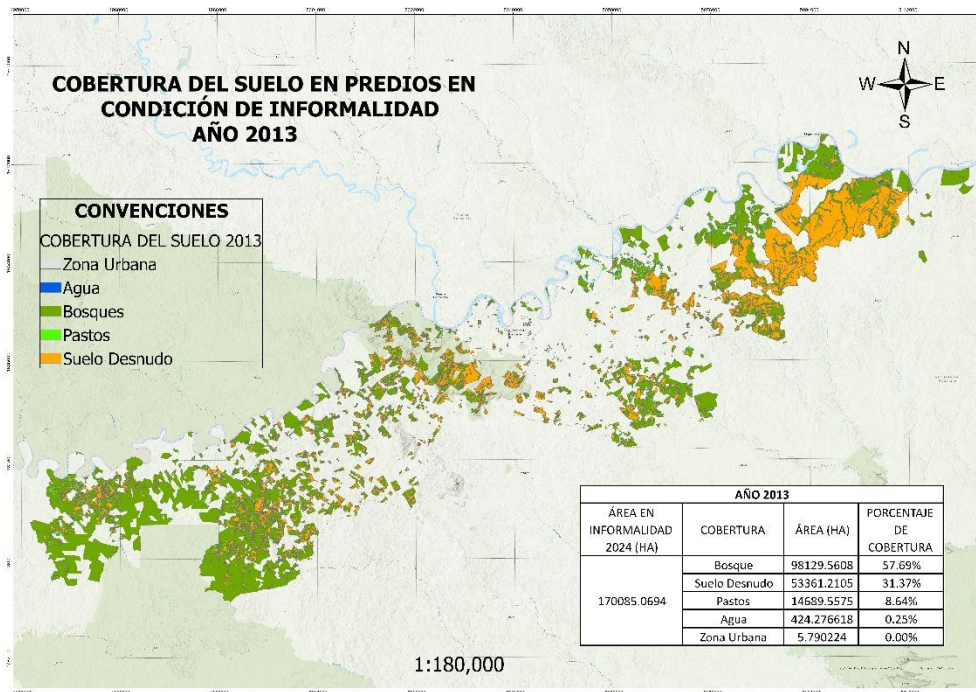


figura 11. Cobertura del suelo en predios en condicion de informalidad, año 2013

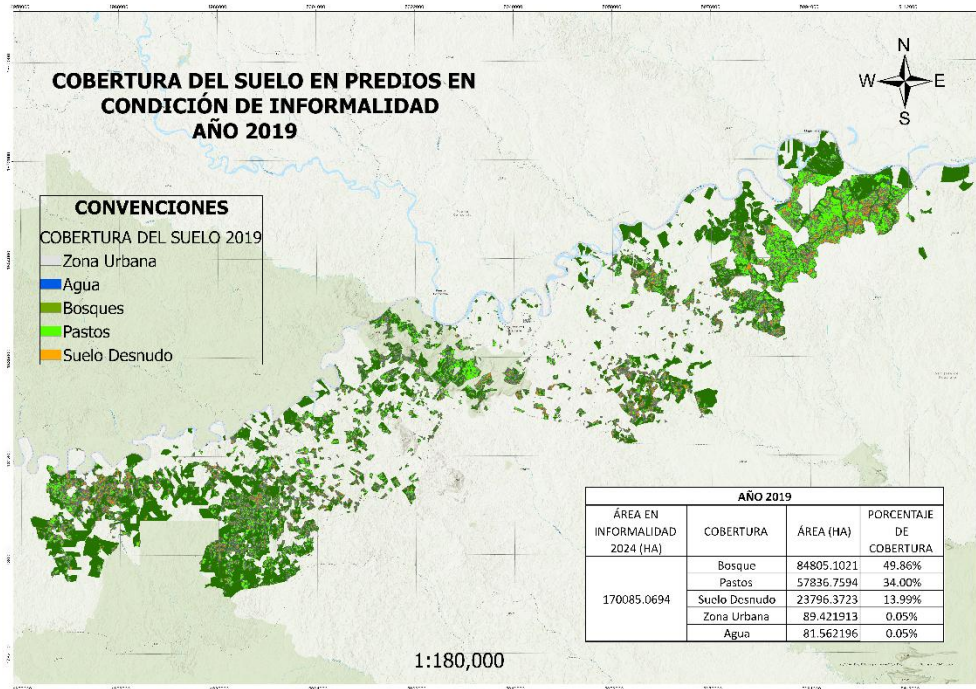


figura 12 Cobertura del suelo en predios en condición de informalidad, año 2019

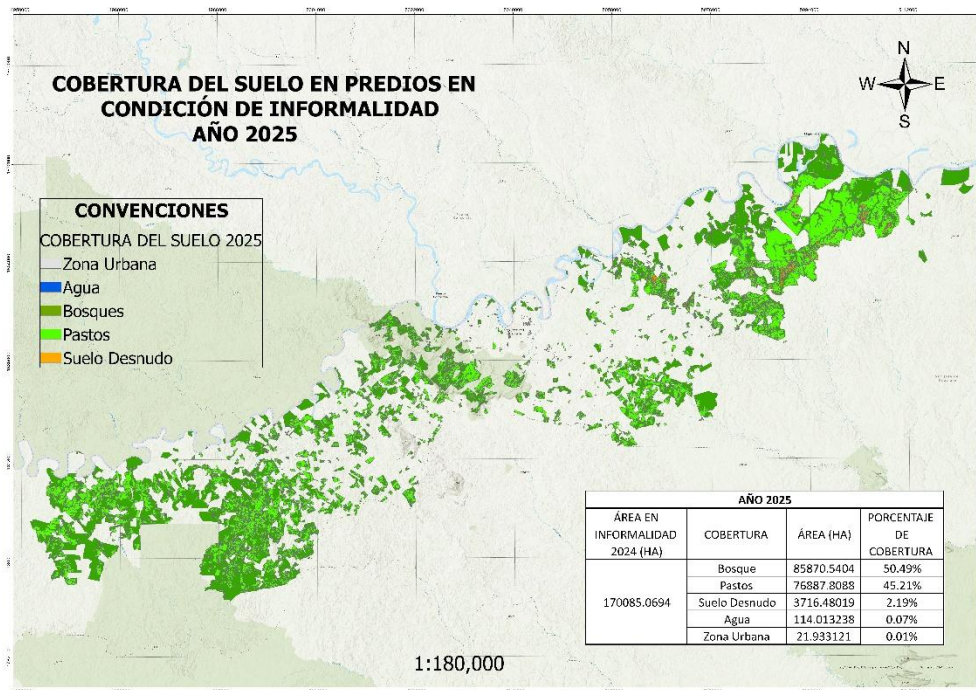


figura 13 Cobertura del suelo en predios en condición de informalidad, año 2025

7.3.2. Cruce de áreas en formalidad

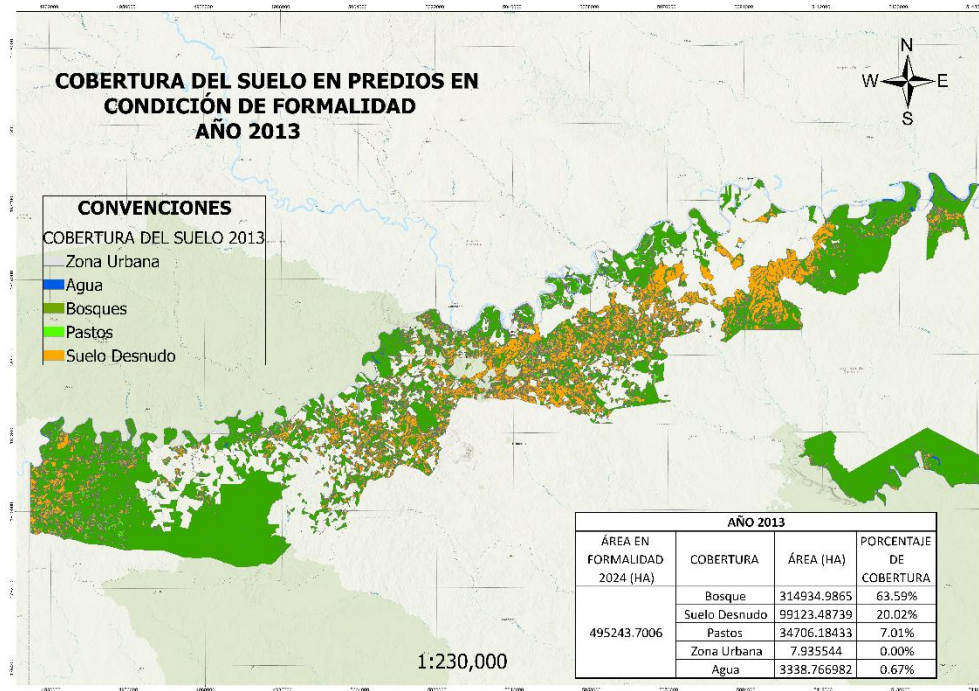


figura 14 Cobertura del suelo en predios en condicion de formalidad, año 2013

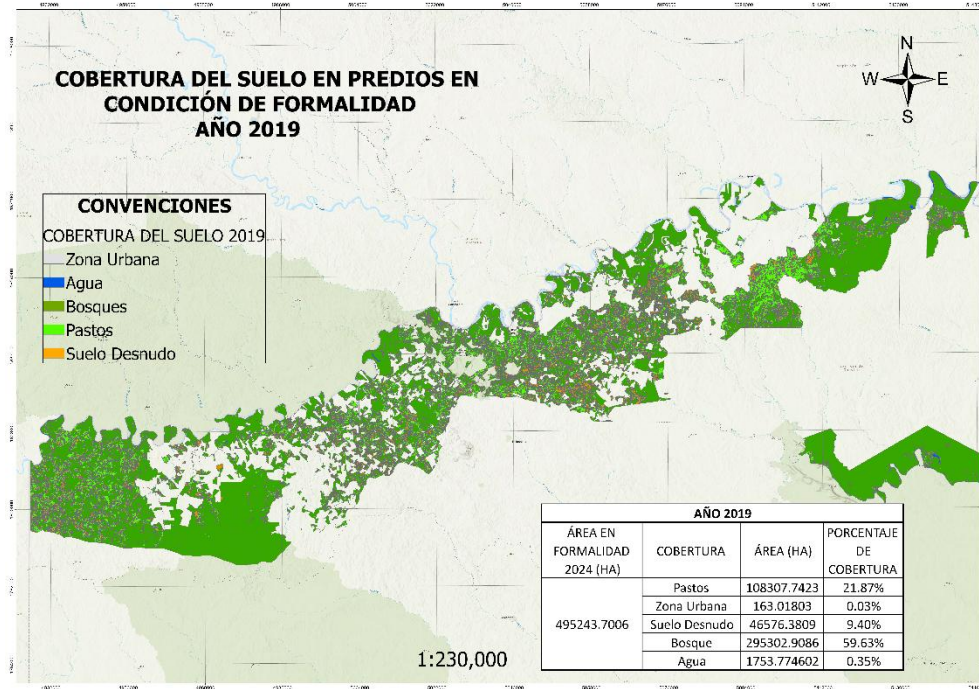


figura 15 Cobertura del suelo en predios en condicion de formalidad, año 2019

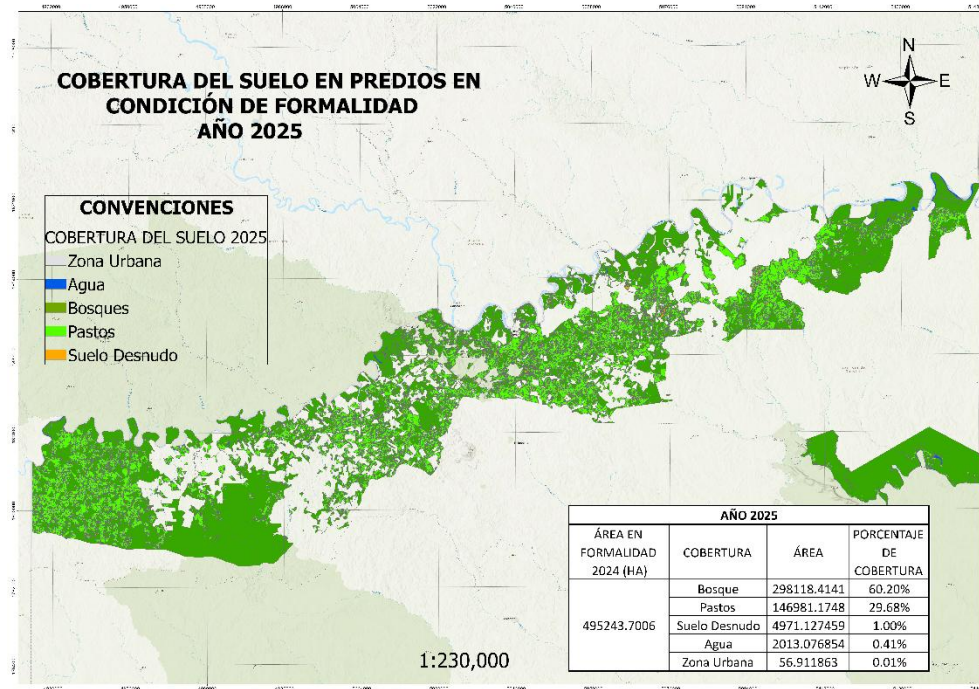


figura 16 Cobertura del suelo en predios en condicion de formalidad, año 2025

Tablas de áreas en informalidad:

Tabla 11 Areas de cobertura del suelo en predios en condicion de informalidad, año 2013

AÑO 2013			
AREA EN INFORMALIDAD 2024 (Ha)	COBERTURA	AREA (HA)ER	PORCENTAJE COBERTURA
170085.0694	BOSQUE	98129.5608	57.69
	SUELO DESNUDO	53361.2105	31.37
	PASTOS	14689.5575	8.64
	AGUA	424.276618	0.25
	ZONA URBANA	5.790224	0.00

Tabla 12 Areas de cobertura del suelo en predios en condicion de informalidad, año 2019

AÑO 2019			
AREA EN INFORMALIDAD 2024 (Ha)	COBERTURA	AREA (HA)	PORCENTAJE COBERTURA
170085.0694	BOSQUE	84805.1021	49.86
	PASTOS	57836.7594	34.00
	SUELO DESNUDO	23796.3723	13.99
	ZONA URBANA	89.421913	0.05
	AGUA	81.562196	0.05

Tabla 13 Areas de cobertura del suelo en predios en condicion de informalidad, año 2025

AÑO 2025			
AREA EN INFORMALIDAD 2024 (Ha)	COBERTURA	AREA (HA)ER	PORCENTAJE COBERTURA
170085.0694	BOSQUE	85870.5404	50.49
	PASTOS	76887.8088	45.21
	SUELO DESNUDO	3716.48019	2.19
	AGUA	114.013238	0.07
	ZONA URBANA	21.933121	0.01

Tablas de áreas en formalidad:

Tabla 14 Areas de cobertura del suelo en predios en condicion de formalidad, año 2013

AÑO 2013			
AREA EN FORMALIDAD 2024 (Ha)	COBERTURA	AREA (HA)ER	PORCENTAJE COBERTURA
495243.7006	BOSQUE	314934.986	64%
	SUELO DESNUDO	99123.4874	20%
	PASTOS	34706.1843	7%
	ZONA URBANA	7.935544	0%
	AGUA	3338.76698	1%

Tabla 15 Areas de cobertura del suelo en predios en condicion de formalidad, año 2019

AÑO 2019			
AREA EN FORMALIDAD 2024 (Ha)	COBERTURA	AREA (HA)	PORCENTAJE COBERTURA
495243.7006	PASTOS	108307.742	22%
	ZONA URBANA	163.01803	0%
	SUELO DESNUDO	46576.3809	9%
	BOSQUE	295302.909	60%
	AGUA	1753.7746	0%

Tabla 16 Areas de cobertura del suelo en predios en condicion de formalidad, año 2025

AÑO 2025			
AREA EN FORMALIDAD 2024 (Ha)	COBERTURA	AREA	PORCENTAJE COBERTURA
495243.7006	BOSQUE	298118.414	60%
	PASTOS	146981.175	30%
	SUELO DESNUDO	4971.12746	1%
	AGUA	2013.07685	0%
	ZONA URBANA	56.911863	0%

A continuación, se presenta el análisis de los cruces de la formalidad e informalidad del área de estudio con la clasificación del suelo, para los años 2013, 2019 y 2025; con el fin de comparar los porcentajes y realizar un diagnóstico más acertado, para las siguientes coberturas, cuyos porcentajes se pueden observar en las *tablas 10, 11, 12, 13, 14 y 15*:

Bosque: en todos los años, los predios con tenencia formal mantienen consistentemente mayor cobertura boscosa. En 2025, los formales se mantienen en 60% de bosque, mientras que los informales apenas alcanzan el 50,49%. Esta diferencia sugiere que la formalización está asociada con mayor conservación forestal, posiblemente por el control institucional y la conciencia del propietario sobre su responsabilidad legal y ambiental.

Pastos: Los pastos aumentan considerablemente en zonas informales: en 2013 eran solo 8,64%, pero en 2025 representan 45,21%. En contraste, los predios formales pasan de 7% (2013) a 30% (2025), evidenciando también una transformación, pero mucho menos acelerada. Esto puede interpretarse como un patrón claro de expansión ganadera no regulada en áreas sin titulación.

Suelo desnudo: Su porcentaje en informalidad baja de 31,37% en 2013 a solo 2,19% en 2025, lo que podría reflejar un proceso de ocupación por pastos o uso agropecuario. En predios formales también disminuye (20% a 1%), pero de forma más moderada.

Zonas urbanas y agua: Su representación es mínima en ambas categorías, aunque se ve una ligera presencia de zonas urbanas en formalidad en 2025 (0,01%), probablemente por consolidación de pequeños caseríos legalizados.

Las siguientes figuras muestran la comparación porcentual de cobertura y los tipos de coberturas tenidas en cuenta para el desarrollo del trabajo.

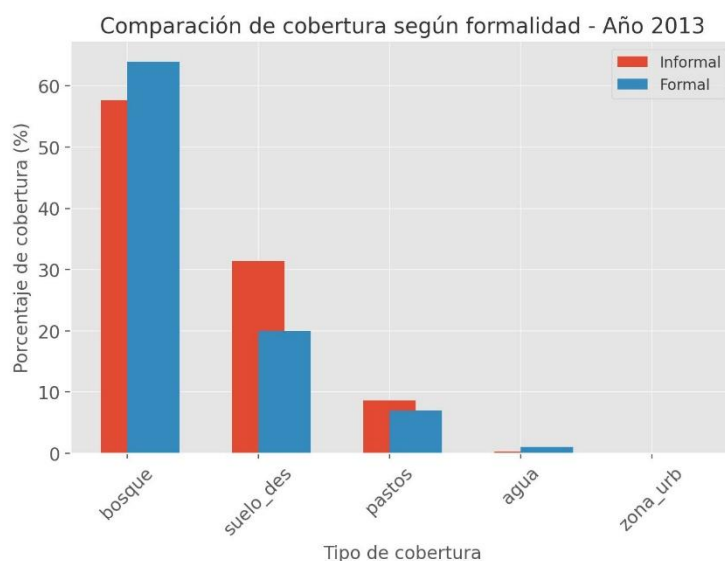


figura 17. Comparación de cobertura según formalidad-año 2013

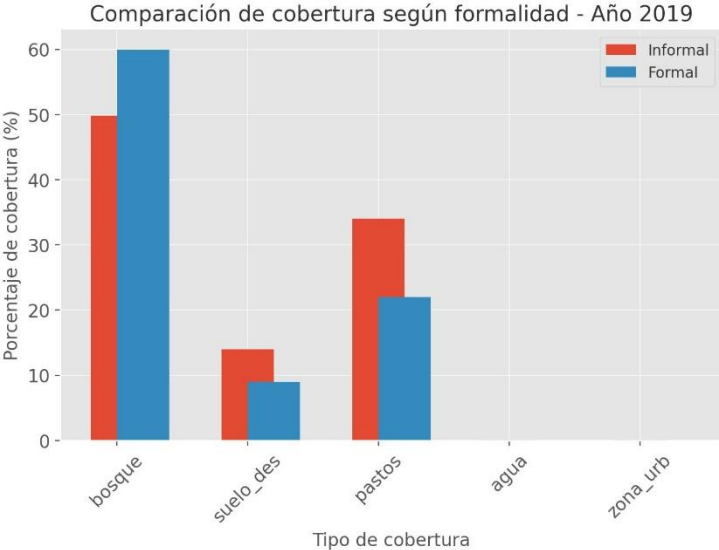


figura 18. Comparación de cobertura según formalidad-año 2019.

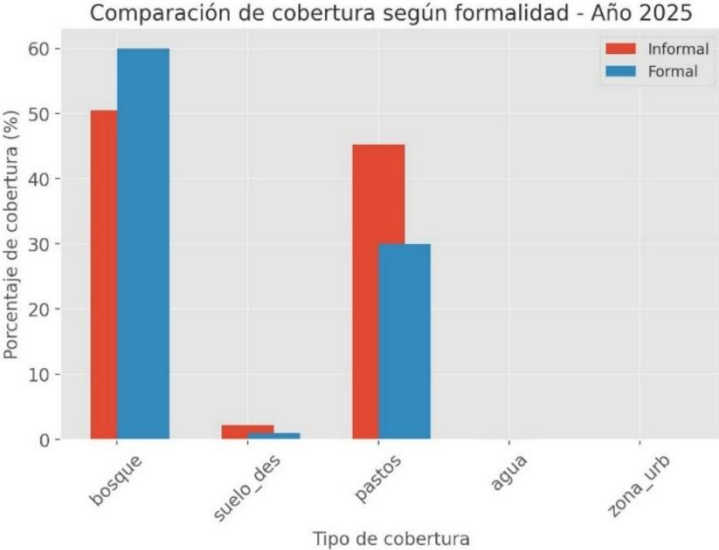


figura 19. Comparación de cobertura según formalidad-año 2025.

7.3.3. Desarrollo del tablero de control (Dashboard)

Para el desarrollo del tablero de control se realizaron los siguientes pasos:

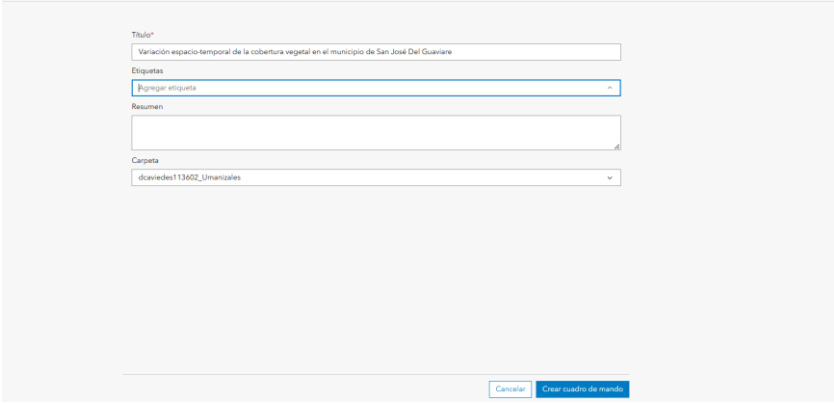
1. Inicio y configuración inicial:

Se accedió a ArcGIS Online y se creó un nuevo dashboard.

Se tituló el dashboard "Variación espacio-temporal de la cobertura vegetal en el municipio de San José Del Guaviare". *Figura 19.*

Se seleccionó un fondo oscuro para mejorar la visibilidad de los datos.

Crear nuevo cuadro de mando



Título*
 Variación espacio-temporal de la cobertura vegetal en el municipio de San José Del Guaviare

Etiquetas
 [Agregar etiqueta]

Resumen
 []

Carpeta
 dcaviedes113602_Umanizales

Cancelar Crear cuadro de mando

figura 20. Inicio y configuración inicial del dashboard.

2. Incorporación del mapa principal:

Se añadió un mapa web centrado en San José Del Guaviare.

Se cargaron capas de cobertura vegetal para los años 2013, 2019 y 2025.

Se incluyeron capas que diferencian los predios en condición de formalidad e informalidad.

Figura 20.

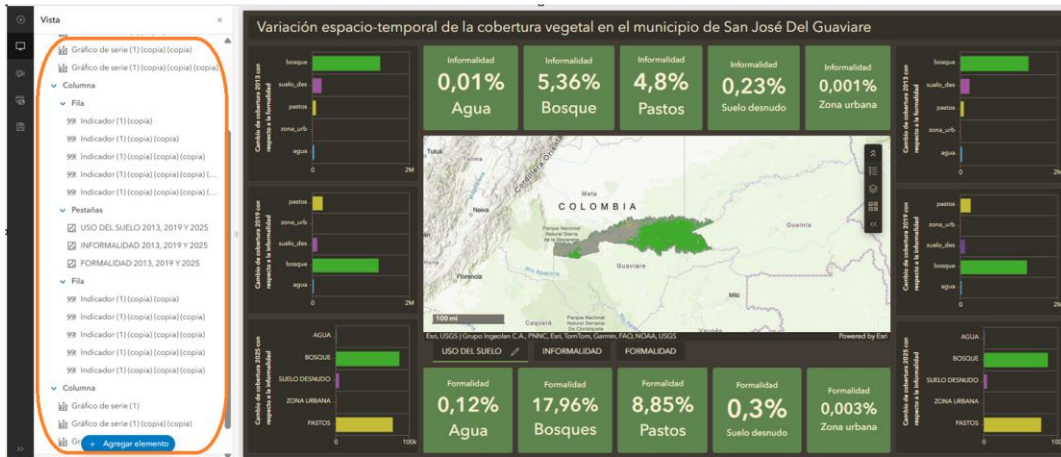


figura 21. Incorporación del mapa principal

3. Configuración de la leyenda y controles del mapa:

Se añadió una leyenda que muestra los diferentes tipos de cobertura (bosque, pastos, suelo desnudo, zona urbana, agua).

Se incorporaron controles para alternar la visualización de capas por año y tipo de tenencia (formalidad/informalidad). *Figura 21.*

14



figura 22. Configuración de la leyenda y controles del mapa

4. Adición de gráficos de barras laterales:

Se crearon gráficos de barras a ambos lados del mapa para mostrar el cambio de cobertura en 2013 y 2025, diferenciando entre formalidad e informalidad.

Se configuraron para mostrar las categorías: bosque, suelo desnudo, pastos, zona urbana y agua. *Figura 22.*

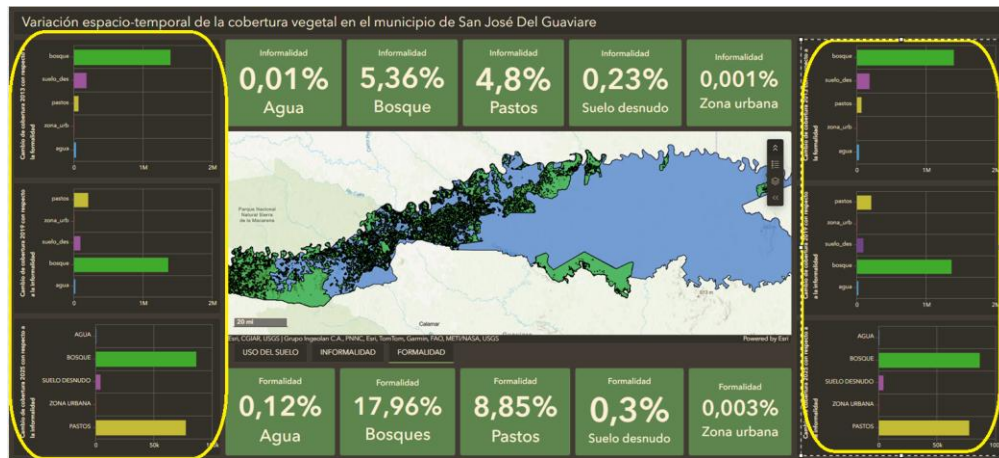


figura 23. Adición de gráficos de barras laterales

5. Incorporación de indicadores numéricos:

Se añadieron indicadores en la parte superior para mostrar porcentajes de cobertura en condición de informalidad.

Se incluyeron datos para agua, bosque, pastos, suelo desnudo y zona urbana. *Figura 23.*

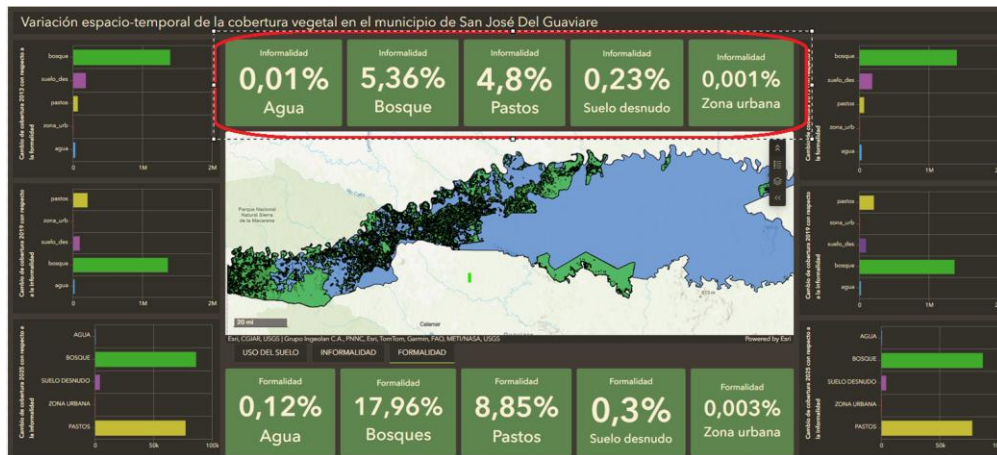


figura 24. Incorporación de indicadores numéricos superiores.

6. Adición de indicadores para la condición de formalidad:

En la parte inferior, se incorporaron indicadores similares mostrando los porcentajes de cobertura en condición de formalidad. *Figura 24*

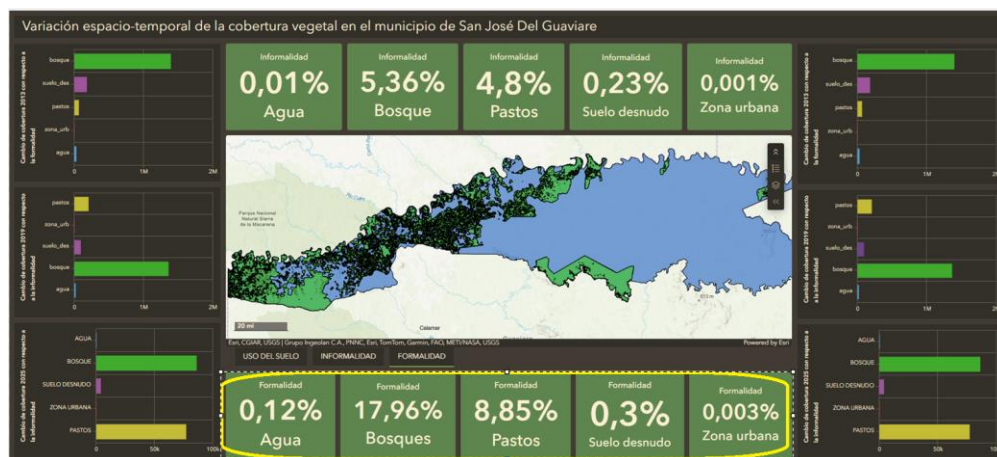


figura 25. Incorporación de indicadores numéricos inferiores

7. Creación de pestañas de selección:

Se añadieron pestañas en la parte inferior para permitir al usuario alternar entre "USO DEL SUELO", "INFORMALIDAD" y "FORMALIDAD". *Figura 25,26 y 27.*

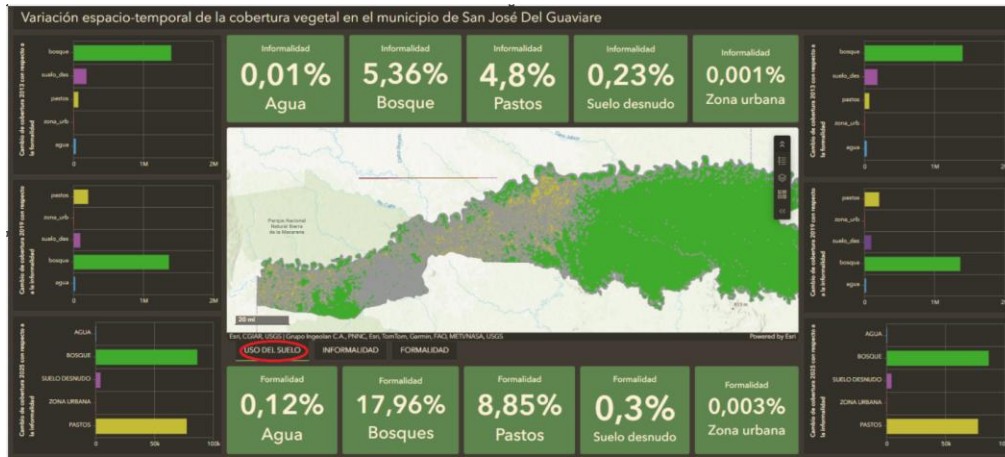


figura 26. Creación de pestañas de selección para uso de suelo

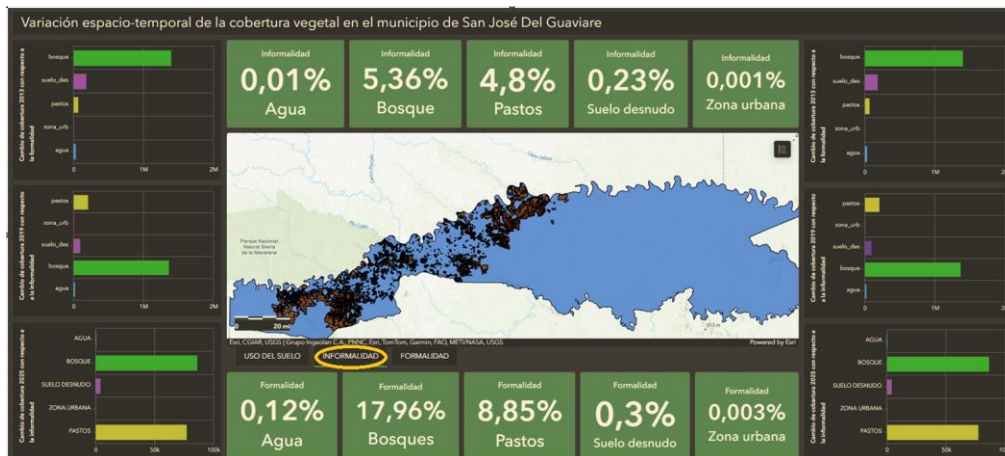


figura 27. Creación de pestañas de selección de predios en informalidad

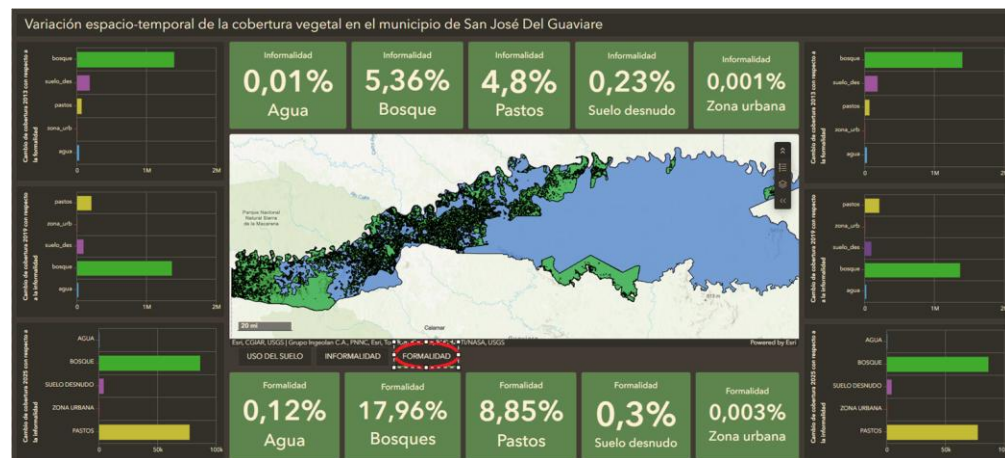


figura 28. Creación de pestañas de selección de predios en formalidad

8. Configuración de interactividad:

Se vincularon los elementos para que la selección en una parte del dashboard actualice los datos en otras secciones.

9. Ajustes finales de diseño:

Se organizaron todos los elementos para lograr un diseño equilibrado y fácil de leer.

Se ajustaron los colores para mantener una coherencia visual (verdes para bosques, amarillos para pastos, etc.).

8. Conclusiones

El análisis multitemporal geoespacial demostró una significativa pérdida de cobertura boscosa en San José del Guaviare, con una disminución del 83.96% en 2013 al 81.58% en 2025. Los mapas de cambio de cobertura generados en el entorno SIG revelan que esta deforestación se asocia espacialmente con la expansión de áreas de pastos y vegetación herbácea.

Se observó una notable reducción en los suelos desnudos (de 10.66% a 0.77%), lo que indica que estos espacios se transformaron en otras coberturas. Este hallazgo, analizado espacialmente, sugiere procesos de reforestación natural o inducida, así como la conversión de estas áreas a usos agrícolas o ganaderos. Por otra parte, la vegetación herbácea y arbustiva mostró un incremento del 3.84% al 16.54%, evidenciando una transición en el uso del suelo, probablemente relacionada con la regeneración de áreas previamente deforestadas.

El análisis de superposición espacial entre los mapas de deforestación y la información catastral multipropósito permitió identificar un patrón clave: los predios con tenencia formal conservan una mayor proporción de cobertura boscosa (60%) en comparación con las áreas de tenencia informal (50.49%). Este hallazgo, obtenido mediante el análisis de atributos en la base de datos geoespacial, sugiere que la formalización de la propiedad puede ser un factor determinante en la conservación forestal.

Finalmente, el análisis geoespacial evidenció una acelerada expansión de los pastos en áreas de tenencia informal (8.64% a 45.21%), mientras que en predios formales el aumento fue más moderado (7% a 30%). Esto demuestra una clara correlación espacial entre la informalidad en la tenencia de la tierra y la presión sobre el bosque, validando la hipótesis de que la ausencia de seguridad jurídica del suelo acelera la conversión a usos agropecuarios extensivos.

9. Recomendaciones

- Implementar programas de formalización predial, dirigidos de manera prioritaria a las áreas de tenencia informal donde se identificó la mayor pérdida de cobertura boscosa (ver Figura X). La formalización se propone como una estrategia clave para incentivar la conservación, dado que los resultados demuestran una mayor preservación de bosques en predios con tenencia formal.

- Desarrollar políticas de uso sostenible del suelo que promuevan la reconversión productiva de pastos a sistemas silvopastoriles o agroforestales. Estas políticas deben focalizarse, de manera precisa, en las áreas con tenencia informal, donde el análisis SIG evidenció la mayor expansión de pastos en el periodo 2013-2025.

- Fortalecer los sistemas de monitoreo y control de la deforestación mediante el uso de imágenes satelitales de alta resolución (como Sentinel 2) y análisis SIG. Esto permitirá identificar de manera temprana los focos de cambio en la cobertura vegetal para una intervención oportuna por parte de las autoridades ambientales locales y nacionales.

- Implementar programas de restauración ecológica en las áreas degradadas, priorizando las zonas de suelos desnudos donde el estudio identificó una tendencia a la recuperación natural. Esta intervención podría acelerar la regeneración de los ecosistemas y reconectar corredores biológicos clave.

- Desarrollar programas de educación ambiental y extensión rural que utilicen los datos y mapas de este estudio para sensibilizar a los propietarios y poseedores sobre la relación directa entre la formalidad de la tierra y la conservación del bosque.

Referencias

- American Psychological Association [APA]. (2020). *Publication Manual of the American Psychological Association* (7^a ed.). American Psychological Association.
- American Psychological Association [APA]. (2020). *Publication Manual of the American Psychological Association* (7^a ed.). American Psychological Association.
- Arango, J. L. (2000). Enfermedades respiratorias del recién nacido. En J. A. Correa, J. F. Gómez, & R. Posada (Eds.), *Fundamentos de pediatría: generalidades y neonatología* (pp. 463–467). Fondo Editorial CIB.
- Arango, J. L. (2000). Enfermedades respiratorias del recién nacido. En J. A. Correa, J. F. Gómez, & R. Posada (Eds.), *Fundamentos de pediatría: generalidades y neonatología* (pp. 463–467). Fondo Editorial CIB.
- Autoridad Nacional de Licencias Ambientales [ANLA]. (s. f.). Sistema de información geográfica. https://www.anla.gov.co/01_anla/entidad/subdirecciones-y-oficinas/instrumentos-permisos-y-tramites-ambientales/sistema-de-informacion-geografica
- Baker, D. W., Gazmararian, J. A., Williams, M. V, Scott, T., Parker, R. M., Green, D., Ren, J., & Peel, J. (2002). Functional Health Literacy and the Risk of Hospital Admission Among Medicare Managed Care Enrollees. *American Journal of Public Health*, 92(8), 1278–1283. <https://doi.org/c7fvj5>
- Baker, D. W., Gazmararian, J. A., Williams, M. V, Scott, T., Parker, R. M., Green, D., Ren, J., & Peel, J. (2002). Functional Health Literacy and the Risk of Hospital Admission Among Medicare Managed Care Enrollees. *American Journal of Public Health*, 92(8), 1278–1283. <https://doi.org/c7fvj5>
- Banco Interamericano de Desarrollo. (2017). *El capital natural en Colombia: Estado actual y valoración económica*. <https://publications.iadb.org/es>
- Banco Interamericano de Desarrollo. (2017). Estrategias de aprovechamiento del modelo económico ambiental integrado (IEEM) para la política pública en el marco del posconflicto colombiano.
- BBC News Mundo. (2020, 18 de febrero). *Destrucción del Amazonas: las principales amenazas para la mayor selva tropical del mundo en los 9 países que la comparten*. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-america-latina-51377234>
- Bermúdez, J., & Garolera, J. (2007). Una aproximación al catastro en Colombia. Universidad Distrital.
- Biblioteca Universidad de San Buenaventura [@BiblioUSB]. (2016, mayo 3). *Consulta Biblioteca Digital USB Colombia* <http://bibliotecadigital.usb.edu.co/> acceso a más de 2.600

documentos en texto completo. #Biblioteca #USBMed [tweet]. Twitter.
<http://bit.ly/2MmUp88>

Biblioteca Universidad de San Buenaventura [@BiblioUSB]. (2016, mayo 3). *Consulta Biblioteca Digital USB Colombia* <http://bibliotecadigital.usb.edu.co/> acceso a más de 2.600 documentos en texto completo. #Biblioteca #USBMed [tweet]. Twitter.
<http://bit.ly/2MmUp88>

Bonilla-Valencia, A., Herrera, A., & Meneses, J. (2021). Análisis de la deforestación en Colombia mediante el uso de imágenes satelitales y SIG. *Revista Colombiana de Geografía*, *30*(1), 45–63. <https://doi.org/10.15446/rcg.v30n1.91321>

Bonilla-Valencia, L., Correa Ayram, C., & Sánchez, A. (2021). *Monitoreo multitemporal de cambios en cobertura vegetal usando SIG y teledetección*. *Revista Colombiana de Geografía*, 30(2), 65–89.

Botero, M. (2020). *Deforestación en la Amazonía colombiana: análisis desde el Parque Nacional Serranía de la Macarena*. Fundación para la Conservación Tropical.

Botero, R. (2020). Disminuye la velocidad de la deforestación, pero se agota la reserva forestal de la Amazonia. *Revista Colombia Amazónica*, 12, 62–63. https://sinchi.org.co/files/publicaciones/revista/pdf/12/3%20Disminuye%20la%20velocidad%20de%20la%20deforestaci%C3%B3n_ColAmaz12.pdf

Camargo, M., Sánchez, L., & Rodríguez, C. (2019). Aplicación de técnicas SIG para el análisis multitemporal del cambio en la cobertura vegetal en zonas de montaña de Colombia. *Revista Geografía UN*, *28*(2), 55-70. <https://doi.org/10.15446/geo.v28n2.77464>

Castiblanco, C., Etter, A., & Ramirez, A. (2017). Impacts of War and Changes in Protected Areas on Deforestation: Patterns, Drivers, and Policy Implications. *Global Environmental Change*, 47, 117-125. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.09.010>

Castiblanco, C., Etter, A., & Ramirez, A. (2017). Impacts of War and Changes in Protected Areas on Deforestation: Patterns, Drivers, and Policy Implications. *Global Environmental Change*, 47, 117-125. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.09.010>

Catastro Bogotá. (2024). ¿Qué beneficios tiene el Catastro? <https://www.catastrobogota.gov.co/pregunta/que-beneficios-tiene-el-catastro>

Chacón, H. (2014). Reducción de áreas con cobertura vegetal natural en las laderas orientales del volcán Pichincha, ubicado en el cantón Quito, como efecto de la presión antrópica durante el periodo 1987–2010 [Tesis de grado]. Quito.

Comisión Económica para América Latina y El Caribe (s.f.). *Participación ciudadana en la gestión pública*. <https://tinyurl.com/mr3suf2j>

- Comisión Económica para América Latina y El Caribe (s.f.). *Participación ciudadana en la gestión pública*. <https://tinyurl.com/mr3suf2j>
- Congreso de Colombia. (1997). Ley 388 de 1997: Ley de desarrollo territorial. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=339>
- Congreso de Colombia. (2011). Ley 1450 de 2011: Por la cual se expide el Plan Nacional de Desarrollo, 2010–2014. Diario Oficial No. 48.102. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=43274>
- CONPES. (2020). Política Nacional para el control de la deforestación y la gestión sostenible de los bosques. Consejo Nacional de Política Económica y Social, Departamento Nacional de Planeación.
- CONPES. (2020). *Política para la gestión integral de la biodiversidad y sus servicios ecosistémicos*. Departamento Nacional de Planeación. <https://colaboracion.dnp.gov.co>
- Constitución Política de Colombia. (1991). Artículo 79. <https://www.constitucioncolombia.com/titulo-2/capitulo-3/79>
- Constitución Política de Colombia. (1991). Artículo 80. <https://www.constitucioncolombia.com/titulo-2/capitulo-3/80>
- Correa Ayram, C. A., Etter, A., & Salazar, J. (2020). Identificación de áreas prioritarias para la restauración ecológica en paisajes transformados. *Ecología Aplicada*, *19*(1), 9–22. <https://doi.org/10.21704/rea.v19n1-2020.1663>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística – DANE. (2023). División político-administrativa de Colombia – DIVIPOLA. Recuperado de <https://www.dane.gov.co>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística – DANE. (2023). División político-administrativa de Colombia – DIVIPOLA. Recuperado de <https://www.dane.gov.co>
- Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2020). Política para la implementación del catastro multipropósito en Colombia. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Politica%20Catastro>
- El Espectador. (2012). Tutelas por un acetaminofén: tratamientos, medicamentos y cirugías, las mayores causas de reclamo. El 67,81% de los casos correspondían a servicios incluidos en el plan de beneficios. En *El Espectador*. <https://tinyurl.com/3bvbx6nt>
- El Espectador. (2012). Tutelas por un acetaminofén: tratamientos, medicamentos y cirugías, las mayores causas de reclamo. El 67,81% de los casos correspondían a servicios incluidos en el plan de beneficios. En *El Espectador*. <https://tinyurl.com/3bvbx6nt>
- FAO & PNUMA. (2020). El estado de los bosques del mundo 2020. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

- FAO & PNUMA. (2020). *El estado de los bosques del mundo 2020: Los bosques, la biodiversidad y las personas*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/e35f4f7b-fa71-4f75-8dd4-e22de81ba1fa/content>
- Fundación del Español Urgente [Fundéu]. (2012). *Fundéu BBVA: cómo diferenciar «si no» y «sino»*. <https://tinyurl.com/57smv775>
- Fundación del Español Urgente [Fundéu]. (2012). *Fundéu BBVA: cómo diferenciar «si no» y «sino»*. <https://tinyurl.com/57smv775>
- Gis&Beers. (2017, marzo 26). *Combinaciones RGB de imágenes satélite Landsat y Sentinel*. <http://www.gisandbeers.com/combinacion-de-imagenes-satelite-landsat-sentinel-rgb/>
- González Bastidas, E., & Martínez, N. (2020). Análisis multitemporal del cambio de cobertura vegetal y su efecto en los caudales del río Guagui [Tesis de grado]. Repositorio Universidad Católica de Colombia.
- González Pérez, Y., Rosell León, Y., Piedra Salomón, Y., Leal Labrada, O., & Marín Milanés, F. (2006). Los valores del profesional de la información ante el reto de la introducción de las nuevas tecnologías de la información y la comunicación. *ACIMED*, 14(5). <https://tinyurl.com/bdfx8skj>
- González Pérez, Y., Rosell León, Y., Piedra Salomón, Y., Leal Labrada, O., & Marín Milanés, F. (2006). Los valores del profesional de la información ante el reto de la introducción de las nuevas tecnologías de la información y la comunicación. *ACIMED*, 14(5). <https://tinyurl.com/bdfx8skj>
- González, J. L. (2017). *Determinación de las coberturas Bosque/No Bosque con imágenes ópticas y radar en una zona de Australia* [Tesis de pregrado, Universidad de Manizales]. RIDUM. https://ridum.umanizales.edu.co/xmlui/bitstream/handle/20.500.12746/3097/Documento_Principal.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Hernández-Ramos, J., García-Cuevas, X., Pérez-Miranda, R., González-Hernández, A., & Martínez-Ángel, L. (2020). Inventario y mapeo de variables forestales mediante sensores remotos en el estado de Quintana Roo, México. *Madera y Bosques*, *26*(1). <https://myb.ojs.inecol.mx/index.php/myb/article/view/e2611884/2059>
- Hooper, T. (2010). *El Discurso del Rey [The King's Speech]*. UK Film Council; See Saw Films; Bedlam Productions.
- Hooper, T. (2010). *El Discurso del Rey [The King's Speech]*. UK Film Council; See Saw Films; Bedlam Productions.
- IA Artificial Net. (2020). *Random Forest (Bosque Aleatorio): combinando árboles*. <https://www.iartificial.net/random-forest-bosque-aleatorio/>

- IDEAM & UPME. (2022). *Cobertura vegetal y usos del suelo en Colombia: Integración de datos catastrales y geoespaciales para la toma de decisiones*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales & Unidad de Planeación Minero Energética.
- IDEAM & UPME. (2022). Monitoreo de coberturas y evaluación del potencial energético de la biomasa en Colombia. <https://www.ideam.gov.co>
- IDEAM. (2010). Leyenda nacional de coberturas de la tierra. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IDEAM. (2010). Metodología para el monitoreo de la cobertura vegetal mediante sensores remotos. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IDEAM. (2012). *Catálogo de patrones de coberturas de la tierra Colombia* (Vol. 10, Núm. 20, pp. 3527110–3527160). Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). <http://www.ideam.gov.co>
- IDEAM. (2018). Monitoreo de la deforestación en Colombia – 2017. <https://www.ideam.gov.co/documents>
- IDEAM. (2024). *Informe anual de deforestación en Colombia 2023*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. <https://www.ideam.gov.co>
- IDEAM. (2024). Sistema de Monitoreo de las Coberturas de la Tierra - SIMCOT. <https://www.ideam.gov.co>
- IGAC. (2011). *Resolución 070 de 2011 - Por la cual se reglamenta técnicamente la formación catastral, la actualización de la formación catastral y la conservación catastral*.
- IGAC. (2024). Actualización Catastral. https://igac.gov.co/sites/default/files/202306/actualizacion_catastral.pdf
- Institute of Electrical and Electronics Engineers [IEEE]. (2006). *IEEE Std P802.15.4/D6: Approved Draft Revision for IEEE Standard for Information Technology-Telecommunications and information exchange between systems-Local and metropolitan area networks-Specific requirements-Part 15.4b: Wireless Medium Access Control*. IEEE.
- Institute of Electrical and Electronics Engineers [IEEE]. (2006). *IEEE Std P802.15.4/D6: Approved Draft Revision for IEEE Standard for Information Technology-Telecommunications and information exchange between systems-Local and metropolitan area networks-Specific requirements-Part 15.4b: Wireless Medium Access Control*. IEEE.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) & Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). *Leyenda nacional de coberturas de la*

tierra: Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia, escala 1:100.000 (p. 6).

Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC. (2018). Geografía física y económica de los departamentos de Colombia: Guaviare. Bogotá D.C., Colombia.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC. (2018). Geografía física y económica de los departamentos de Colombia: Guaviare. Bogotá D.C., Colombia.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC]. (2015). Cobertura vegetal y mucha materia orgánica: claves para que suelos no se afecten. <https://igac.gov.co/es/noticias/cobertura-vegetal-ymucha-materiaorganica-claves-para-que-suelos-no-se-afecten>

International Business Machine [IBM]. (2020). SPSS (Versión 27.0) [software]. IBM.

International Business Machine [IBM]. (2020). SPSS (Versión 27.0) [software]. IBM.

McFeeters, S. K. (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. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>

Peralta, H. A. (2018). Análisis multitemporal de la cobertura vegetal, zonas de erosión y dirección del cauce, en la cuenca del río Bravo Sur. Sogamoso, Boyacá.

Pettorelli, N., Graham, N. A. J., Seddon, N., de Cunha Bustamante, M. M., Lowton, M. J., Sutherland, W. J., Koldewey, H. J., Prentice, H. C., & Barlow, J. (2021). Time to integrate global climate change and biodiversity science-policy agendas. *Journal of Applied Ecology*, *58*(11), 2384–2393. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13985>

Rioja, G. (2008). *¿Judicialización de la salud? el caso de las personas sordas* [conferencia]. XIII Congreso de la Caja de Abogados de la Provincia de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina.

Rioja, G. (2008). *¿Judicialización de la salud? el caso de las personas sordas* [conferencia]. XIII Congreso de la Caja de Abogados de la Provincia de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina.

Ruiz Rojas, G. A. (2014). *Hacia la comprensión de la retórica como contenido formativo para la configuración de un sujeto deliberativo* [tesis de maestría, Universidad de San Buenaventura Medellín]. Biblioteca Digital Universidad de San Buenaventura Colombia.

Ruiz Rojas, G. A. (2014). *Hacia la comprensión de la retórica como contenido formativo para la configuración de un sujeto deliberativo* [tesis de maestría, Universidad de San Buenaventura Medellín]. Biblioteca Digital Universidad de San Buenaventura Colombia.

SI-GEO Sistema de Información Geográfico del Sector Educativo. (2018). Ministerio de Educación Nacional. <http://www.mineducacion.gov.co/1621/article-190610.html>

- Turner, A. J., Jacob, D. J., Wecht, K. J., Maasackers, J. D., Lundgren, E. W., Andrews, A. E., & Biraud, S. C. (2015). Estimating global and North American methane emissions with high spatial resolution using GOSAT satellite data. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *15*, 7049–7069. <https://doi.org/10.5194/acp-15-7049-2015>
- Universidad de Murcia. (2024). Temario del curso de SIG. <https://www.um.es/geograf/sigmur/sigpdf/temario.pdf>
- Universidad Nacional de Colombia. (2018). Causas de degradación forestal en Colombia: una primera aproximación.
- WWF Colombia. (2024, febrero 12). Los devastadores impactos de la deforestación en Colombia. <https://www.wwf.org.co/?386550/deforestacion-colombia-causas-consecuencias#:~:text=Entre%20las%20principales%20causas%20se,ambiente%20y%20las%20comunidades%20locales>.
- Xian, G., Shi, H., Dewitz, J., & Wu, Z. (2018). Analysis of different sensor performances in impervious surface mapping. En *2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)* (pp. 8189–8192). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2018.8518013>
- Yumin, T., Bingxin, B., & Mohammad, M. S. (2016). Time series remote sensing based dynamic monitoring of land use and land cover change. En *2016 4th International Workshop on Earth Observation and Remote Sensing Applications (EORSA)* (pp. 202–206). IEEE. <https://doi.org/10.1109/EORSA.2016.7552797>
- Zhang, Y. (2019). Additions to the genus *Savoryella* (Savoryellaceae). *Phytotaxa*, *408*(3), 195–207. https://www.researchgate.net/profile/Shengnan-Zhang-17/publication/334138527_Zhang_et_al_2019_Additions_to_the_genus_Savoryella_Savoryellaceae/links/63315d4e6063772afd92bcc1/Zhang-et-al-2019-Additions-to-the-genus-Savoryella-Savoryellaceae.pdf