



Diagnóstico de la degradación del suelo y diseño de estrategia comunitaria asistido por tecnología geoespacial en Sotaquirá, Boyacá.

Laura Camila Castillo Alarcon

Nicole García Ramos

Universidad Ean

Facultad de ingeniería

Programa de Ingeniería Ambiental

Bogotá D. C, Colombia

02/06/2026

Diagnóstico de la degradación del suelo y diseño de estrategia comunitaria asistido por tecnología geoespacial en Sotaquirá, Boyacá.

Laura Camila Castillo Alarcón

Nicole García Ramos

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:

Ingeniería Ambiental.

Director (a):

Diana Paola Figueroa Hernandez

Universidad Ean

Facultad de ingeniería

Programa de ingeniería

Bogotá D. C., Colombia

02/06/2026

Nota de aceptación:

Firma del jurado

Firma del jurado

Firma del director del trabajo de grado

Ciudad, día/mes/año

Resumen

La presente investigación aborda la degradación del suelo en el municipio de Sotaquirá, Boyacá, un problema ambiental crítico que deriva de las condiciones geomórficas vulnerables de la región, pero principalmente de las actividades antropogénicas como la agricultura y la ganadería que se realizan en este territorio. Estas actividades han generado problemas ambientales tales como la compactación, la pérdida de materia orgánica y la alteración del drenaje natural en el suelo, principalmente suelos de textura media o fina, localizados en territorio con características de altiplanicie y montaña con ecosistemas frágiles y un clima principalmente frío.

El estudio se desarrolla bajo un enfoque cuantitativo e investigativo más no experimental y de alcance correlacional, mediante el uso de herramientas de teledetección, Sistemas de Información Geográfica (SIG), análisis del índice NDVI e información territorial procesada en la plataforma QGIS. Además, instrumentos de recolección de información como cartillas fueron validados mediante una visita de campo al municipio, donde se aplicaron encuestas a la comunidad y se recolectaron muestras de suelo en zonas con uso agrícola o ganadero y en áreas con cobertura vegetal. Esta información permitió contrastar las condiciones del suelo en diferentes tipos de uso y fortalecer el diagnóstico territorial.

Como resultado, se generó un visor geográfico interactivo que integra información espacial, mapas de degradación, coberturas del suelo y zonas prioritarias para la gestión ambiental del territorio. De manera complementaria, se elaboró una cartilla comunitaria orientada a explicar protocolos de monitoreo participativo, como realizar un diagnóstico preliminar y medidas de recuperación del suelo. De esta forma los productos fortalecen la apropiación social del conocimiento y apoyan la toma de decisiones locales frente al manejo sostenible del suelo en Sotaquirá.

Palabras clave:

Visor geográfico; Monitoreo comunitario; Degradación del suelo; actividades antropogénicas; SIG; NDVI; Manejo sostenible; Restauración.

Abstract

This study examines soil degradation in the municipality of Sotaquirá, Boyacá, a critical environmental problem stemming from the region's vulnerable geomorphological conditions, but primarily from anthropogenic activities such as agriculture and livestock farming carried out in this area. These activities have caused environmental problems such as soil compaction, loss of organic matter, and disruption of natural drainage, primarily in medium- or fine-textured soils located in highland and mountainous areas with fragile ecosystems and a predominantly cold climate.

The study employs a quantitative, research-based, non-experimental approach with a correlational scope, utilizing remote sensing tools, Geographic Information Systems (GIS), NDVI index analysis, and spatial data processed in the QGIS platform. In addition, data collection tools such as questionnaires were validated through a field visit to the municipality, where surveys were administered to the community and soil samples were collected in areas used for agriculture or livestock and in areas with vegetation cover. This information allowed for a comparison of soil conditions across different land-use types and strengthened the territorial assessment.

As a result, an interactive geovisualization tool was developed that integrates spatial data, degradation maps, land cover information, and priority areas for environmental land management. In addition, a community guide was created to explain participatory monitoring protocols, including how to conduct a preliminary assessment and implement soil restoration measures. In this way, these products strengthen social ownership of knowledge and support local decision-making regarding sustainable soil management in Sotaquirá.

Keywords: Geographic viewer; Community-based supervision; Soil degradation; Anthropogenic activities; GIS; NDVI; Sustainable management; Restoration.

Introducción

La degradación del suelo es una de las problemáticas ambientales más críticas a nivel mundial, debido a las alteraciones en las cualidades físicas, químicas, biológicas y ecológicas, lo que reduce la productividad, provoca la pérdida de nutrientes, y afecta la capacidad de soporte de los ecosistemas; de acuerdo con la Organización de la Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) “la degradación del suelo se define como un cambio en la salud del suelo resultando en la disminución de la capacidad ecosistémica para producir bienes o prestar servicios para sus beneficios”, esta problemática incide directamente en la seguridad alimentaria, la regulación hídrica y la estabilidad ecosistémica terrestre.

Desde finales del siglo XIX, diversos eventos asociados a la erosión y pérdida de suelos impulsaron el desarrollo de investigaciones orientadas a comprender sus causas y efectos. Un hito clave para este tema fue el estudio GLASOD, donde Oldeman et al. (1991) mapeó la degradación mundial, desde la postguerra, además informó que 1.200 millones de hectáreas se habían degradado gravemente. Este y otros estudios promovidos por organizaciones como la FAO o el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), establecieron una base conceptual y metodología, para evaluar de forma integral este fenómeno. En las últimas décadas, el avance de herramientas tecnológicas, permitieron un análisis más preciso de esta problemática. Los sistemas de información Geográfica (SIG), junto con modelos matemáticos como la Ecuación Universal Revisada de Pérdida de Suelo (RUSLE) y el modelo Mediterranean Desertification and Land Use MEDALU; estas herramientas junto con enfoque más recientes basados en la teledetección multitemporal, índices de vegetación como el NDVI y plataformas de monitoreo satelital de alta resolución, como lo son por ejemplo Sentinel y Landsat, han facilitado la identificación de áreas críticas y el seguimiento de cambios en la cobertura vegetal y el uso del suelo. Asimismo, estudios recientes destacan la importancia de la integración de estos enfoques con la participación comunitaria y el conocimiento local para fortalecer la gestión sostenible del

territorio; en este contexto el municipio de Sotaquirá está ubicado en la provincia Central de Boyacá, con una extensión de 288.65 km², y constituye un ecosistema estratégico debido a diversos recursos naturales y a su importancia ambiental. El territorio alberga bosques naturales y una amplia red de recursos hídricos, entre los que se encuentran ríos, quebradas, lagunas, así como cuencas, subcuencas y microcuencas que cumplen funciones esenciales en la regulación hídrica y el mantenimiento de los ecosistemas.

No obstante, Sotaquirá presenta condiciones que lo hacen altamente vulnerable a la degradación de suelo, posee una vocación agrícola y ganadera, esto junto a las características geomorfológicas asociadas a pendientes pronunciadas, y la pérdida de calidad del suelo, hacen a esta área vulnerable a procesos de erosión, dicha situación refleja una problemática común para el resto del departamento de Boyacá. Por esta razón, en el presente estudio se escogió el municipio de Sotaquirá como área de investigación, del mismo modo se inscribe en el campo de la gestión ambiental territorial, con énfasis en el análisis geoespacial aplicado a la conservación del suelo y en la sociología rural orientada a la participación comunitaria.

El problema central radica en la ausencia de un diagnóstico integral que combine variables físicas, químicas y biológicas del suelo con patrones espaciales derivados de imágenes satelitales, así como en la limitada apropiación comunitaria de herramientas tecnológicas para la gestión sostenible del territorio; en este contexto, el objetivo es evaluar la degradación de suelo, mediante un análisis sociológico y geoespacial, con el fin de diseñar una propuesta que se base en el uso de sistemas de información geográfica y monitoreo del territorio, orientado a la gestión sostenible.

A partir del anterior, se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿Qué relación existe entre los valores del índice NDVI y los niveles de degradación física, química y biológica del suelo en el municipio de Sotaquirá, y cómo puede esta información integrarse en un prototipo geoespacial de monitoreo territorial con apoyo comunitario?

En coherencia con esta pregunta, se plantea una hipótesis de trabajo: existe una correlación significativa entre la cobertura vegetal estimada mediante el NDVI y el grado de degradación del suelo en sus dimensiones física, química y biológica en el municipio de Sotaquirá. En síntesis, la integración de tecnologías geoespaciales con procesos de participación comunitaria permite identificar con mayor presión las áreas críticas y fortalecer la gestión sostenible del territorio, de esta manera, la investigación busca no solo generar un diagnóstico de la degradación del suelo, sino que a su vez también aportar una herramienta práctica para fortalecer la gestión ambiental local y promover la sostenibilidad del territorio de Sotaquirá.

Objetivo General

Diseñar un prototipo geoespacial para evaluar la degradación del suelo en el municipio de Sotaquirá, mediante la integración de Sistemas de Información Geoespacial, análisis de imágenes satélites e instrumentos de monitoreo comunitario participativo, que permitan dar solución a la degradación del suelo y ayudar a la toma de decisiones y planificación del territorio.

Objetivos específicos

- Caracterizar las condiciones físicas, químicas y biológicas del suelo mediante herramientas geoespaciales para identificar zonas con degradación y pérdida de cobertura vegetal.
- Mediante herramientas SIG, índice del NDVI e imágenes satelitales, diseñar e implementar un prototipo geoespacial de monitoreo territorial que integre mapas temáticos, análisis de degradación del suelo, imágenes satelitales y un visor geográfico interactivo para la visualización y análisis del territorio.
- Diseño de una estrategia de monitoreo comunitario mediante una cartilla que incluya protocolos de recolección de datos, uso de herramientas y mecanismo de participación local, orientado a la toma de decisiones y gestión del suelo.

Marco teórico

El estudio de la degradación de suelos en territorios altoandinos como Sotaquirá se ha vuelto relevante, ya que requieren de herramientas que integren fundamentos edafológicos, enfoques de restauración ecológica, instrumentos de análisis geoespacial y modelos de gobernanza ambiental participativa, no puede entenderse el suelo únicamente como un soporte físico para la producción y extracción de recursos agropecuarios, sino como un conjunto de complejos sistemas que sostienen la biodiversidad, ayudan a regular sistemas hídricos, minimizan el cambio climático y brindan diferentes servicios ecosistémicos.

El municipio se ubica en el departamento de Boyacá, en la Región Andina, al noroccidente de Tunja. En base con el esquema de ordenamiento territorial (EOT), el municipio cuenta con una altitud de 2.930 metros, pendientes superiores al 60 % y el mismo presenta una gran variedad de áreas de importancia ambiental asociadas a páramos, zonas de recarga hídrica, nacederos, quebradas y ríos. Estas condiciones revelan la importancia ecológica del territorio y la necesidad de orientar el uso del suelo bajo criterios de conservación y planificación ambiental. (Alcaldía Municipal de Sotaquirá, s. f.; IGAC, s. f.). Para el estudio del suelo en el municipio de Sotaquirá, es importante comprender que este constituye un sistema natural dinámico en el que interactúan componentes físicos, químicos y biológicos. Estas interacciones permiten el desarrollo de funciones ecosistémicas esenciales, como la producción de biomasa, la regulación hídrica, almacenamiento de carbono y aún más importante soporte para la biodiversidad tal como señala Nunes et al. (2020); desde la teoría de formación del suelo propuesta por Hans Jenny, los factores como el clima, los organismos, el tipo de relieve, el material parental y el tiempo interactúan para determinar las características edáficas del suelo. En zonas altoandinas como Sotaquirá, estas dinámicas adquieren mayor complejidad debido a las condiciones ambientales específicas, como las bajas temperaturas, la alta humedad, la presencia de suelos jóvenes y diversas pendientes pronunciadas.

Estas condiciones suelen favorecer la acumulación de materia orgánica; sin embargo, también incrementa la susceptibilidad del suelo frente a procesos de degradación, especialmente cuando se evidencian alteraciones en la cobertura vegetal o en los usos del suelo, según relata Shakesby, (2011). Esto implica que la estabilidad del sistema edáfico depende en gran medida, del equilibrio entre los factores formadores del suelo y las actividades antropogénicas, dicho esto, la degradación del suelo da como resultado la pérdida de servicios ecosistémicos, entendidos como los beneficios vitales y gratuitos que la naturaleza proporciona de manera directa o indirecta.

Semarnat, (s. f.) explica que, entre estos servicios se incluyen la producción de alimentos, la regulación del ciclo hídrico, el almacenamiento de carbono, la mitigación del cambio climático, el soporte de la biodiversidad, el ciclo de nutrientes y el soporte de infraestructuras; la pérdida de estos servicios no solo afecta el equilibrio ecológico, sino también al bienestar humano y la sostenibilidad del territorio. En relación con los ecosistemas altoandinos, Sotaquirá cuenta con una ubicación estratégica dentro de un contexto ecológico caracterizado por bosque montanos, agroecosistemas y, de manera destacada, dos complejos de páramo de alta relevancia ambiental, estos ecosistemas no solo tienen importancia local, sino que también hacen parte del corredor biológico andino, cumpliendo funciones clave como lo es la regulación hídrica y el abastecimiento de cuencas que benefician al municipio y a regiones aledañas (IGAC, 2017; MinAmbiente, 2020; Corpoboyacá, s. f.; Gobernación de Boyacá, 2023).

Entre estos ecosistemas, sobresalen el páramo de Guantiva – La Rusia por su amplio territorio y alta biodiversidad, ya que alberga diversidad de especies y una vegetación características de alta montaña, como los clásicos frailejones; el complejo Iguaque–Merchán resalta por su elevada capacidad de retención de agua debido a la presencia de suelos orgánicos y turberias, además de cumplir funciones importantes en la captura de carbono y la conservación de la biodiversidad altoandina (Corpoboyacá, s. f.; IGAC, 2004; MinAmbiente, 2020).

En el ámbito socioeconómico, la estructura económica de Sotaquirá se basa principalmente en actividades agropecuarias de pequeña y mediana escala, cuya agricultura se orienta hacia cultivos transitorios como la papa, el maíz y algunas hortalizas, mientras que la ganadería se concentra en la producción bovina, asociada a derivados lácteos como el queso paipa. Estas actividades, junto con la minería, constituyen los principales usos del suelo y son esenciales para la seguridad alimentaria y economía local, sin embargo, cuando se realizan de manera desmedida y sin criterios de sostenibilidad, pueden generar impactos acumulativos sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo.

Dichas actividades se configuran como las principales causas de degradación del suelo en el municipio, de acuerdo con la FAO (2015), la degradación del suelo se define como la disminución de su capacidad para cumplir funciones productivas y ecológicas debido a procesos físicos, químicos o biológicos; este fenómeno va más allá de la erosión, ya que implica la afectación integral de las propiedades y funciones del suelo. No obstante, puede comprenderse desde una perspectiva territorial, en la que el problema ocurre como resultado de la interacción entre factores biofísicos y dinámicas socioeconómicas. La problemática no es exclusiva de sotaquirá, a nivel global, organismos internacionales han advertido que la degradación y desertificación afectan a más de 3.000 millones de personas, y que hasta el 40 % de las tierras del mundo presentan algún grado de degradación, poniendo en evidencia la magnitud del problema, según la ONU,(2024). En esta misma línea, Lal (2015) destaca que la degradación del suelo no solo implica una pérdida de productividad, sino también alteraciones en ciclos biogeoquímicos, afectando la capacidad del suelo para actuar como sumidero de carbono.

La intensificación agrícola, la expansión de la frontera agropecuaria y las prácticas inadecuadas de manejo del suelo han sido identificadas como causas principales del deterioro ambiental (Rodriguez et al., 2023). Esto refuerza la idea de que la degradación no se produce

únicamente por causas naturales, sino también como resultado de modelos de uso del suelo que no consideran sus funciones ecológicas, características físicas ni capacidad de carga. Por ende, el problema debe abordarse desde un enfoque integral que considere las variables ecológicas, productivas y sociales.

Por esto mismo, la identificación y aplicación de herramientas que permitan analizar y mitigar la degradación del suelo resulta fundamental. La cobertura vegetal es uno de los factores más importantes a la hora de hablar de conservación del suelo, ya que actúa como una barrera natural frente a los procesos erosivos y contribuye a la estabilidad estructural y ecológica del sistema. Su pérdida implica una mayor exposición del suelo a agentes externos volviéndolo más susceptible a la degradación. (Minambiente, 2020).

Bajo esta perspectiva, el uso de indicadores biofísicos cobra relevancia, ya que permiten evaluar el estado, la calidad y el grado de intervención antropogénica sobre los componentes naturales de un ecosistema, como agua, suelo, aire y biodiversidad (Isaias, 2008). Estos indicadores facilitan la comprensión de dinámicas ambientales complejas a partir de variables medibles y comparables en el tiempo y espacio.

Dentro de estos indicadores, el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) se ha consolidado como una herramienta clave para el análisis de la vegetación mediante técnicas de teledetección. El índice se basa en la relación entre la reflectancia de la superficie terrestre en las bandas del rojo y del infrarrojo cercano del espectro electromagnético. En términos generales, valores de NDVI indican mayor densidad y actividad fotosintética de la vegetación, mientras que valores bajos pueden indicar vegetación escasa, suelos desnudos o áreas ambientalmente intervenidas (Pettorelli, et al. 2005). Su utilidad radica en su capacidad de representar patrones

espaciales de cobertura vegetal, lo que permite inferir condiciones del suelo y detectar zonas potencialmente degradadas.

De manera complementaria al NDVI, el modelo RUSLE según la FAO (s.f.), permite estimar la pérdida de cobertura anual de suelo asociada a procesos de erosión hídrica. La ecuación integra factores relacionados con la erosión por lluvia, la erodabilidad del suelo, la longitud, las pendientes del terreno, la cobertura vegetal y las prácticas de conservación. El modelo RUSLE se expresa mediante la siguiente fórmula:

$$A = R \times K \times LS \times C \times P$$

Donde:

- A: Pérdida anual de suelo (toneladas/hectárea/año).
- R: Factor de erosividad de la lluvia.
- K: Factor de erodabilidad del suelo.
- LS: Factor de longitud y pendiente del terreno.
- C: Factor de cobertura y manejo.
- P: Factor de prácticas de apoyo o conservación.

En términos generales, las zonas con mayor cobertura vegetal suelen presentar mayor estabilidad del suelo y menores valores de pérdida potencial por erosión. Por el contrario, áreas con baja cobertura vegetal, suelos desnudos o usos inadecuados del suelo tienden a mayores niveles de susceptibilidad a procesos erosivos. Por esto, la relación entre el NDVI y el modelo RUSLE resulta útil para estudiar y analizar la degradación del suelo, ya que permite vincular el riesgo potencial de pérdida de suelo y la condición de la cobertura vegetal.

Otra herramienta vital para este tipo de análisis son los Sistemas de Información Geográfica (SIG), los cuales han transformado significativamente la manera en que se estudia los procesos ambientales al permitir la integración de datos espaciales y temporales. Estas herramientas facilitan procesos complejos como mapeo geográfico, análisis de tierra, planificación para las sociedades humanas, modelación y visualización de variables territoriales. De esta forma, contribuyen a la identificación de áreas críticas y al diseño de estrategias de planificación y gestión sostenible del territorio (AAAS, s. f.).

En el marco de esta investigación, el uso de herramientas SIG constituye la base técnica para el desarrollo de un visor geográfico, ya que permite organizar y representar espacialmente las capas relacionadas con la degradación o el estado general del suelo. A través del visor geográfico, la información obtenida mediante imágenes satelitales, NDVI, análisis de erosión, datos de campo y observaciones comunitarias pueden visualizarse de forma integrada, facilitando la interpretación de datos como zonas críticas o en riesgo y al análisis de la degradación del suelo.

En la actualidad se encuentran diversos tipos de tecnologías geoespaciales que pueden aplicarse al monitoreo ambiental y al análisis de la degradación del suelo:

Tabla 1

Tipos de tecnologías aplicadas al monitoreo y al visor geográfico

Tipo	Función	Ejemplo
Teledetección	Permite obtener imágenes y datos de la superficie terrestre mediante sensores	Uso de imágenes Sentinel-2 para identificar

	ubicados en plataformas satelitales o aéreas. Es útil para analizar cambios en la cobertura vegetal y ayuda a calcular índices como el NDVI.	zonas con baja cobertura vegetal o posible degradación del suelo.
Sistemas de información geográfica (SIG)	Son un conjunto de herramientas software para mapear y analizar datos georreferenciados asignados a una ubicación específica en la superficie terrestre. Ayuda con patrones geográficos como acceso deficiente al agua, zonas de degradación, etc.	Construcción del visor geográfico con capas de NDVI, pendientes, uso del suelo, puntos de muestreo o zonas críticas de degradación.
Sistema de posicionamiento global (GPS)	Permite obtener coordenadas precisas de puntos ubicados en campo. Es útil para registrar zonas de muestreo, fotografías y observaciones	Georreferenciación de puntos donde se observa degradación, pérdida de cobertura vegetal o cambios en el municipio.

	comunitarias.	
Tecnologías de cartografía en internet	Son programas con una interfaz más sencilla para los usuarios, cuenta con un amplio acceso a tecnologías para el público menos experimentado.	Google Earth nos brinda una forma más sencilla de visualizar y compartir datos geoespaciales.

Nota. Elaboración propia con base en AAAS (S.F.), USGS (2026), Francisco (2015) y UAV Latam (2022), adaptada al monitoreo de la degradación del suelo y al desarrollo del visor geográfico del proyecto.

Investigaciones recientes han demostrado la efectividad de integrar herramientas como el NDVI, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y validación en campo para el análisis de la degradación del suelo e identificación de zonas críticas. Workie y Teku (2025), en su estudio apoyan el uso de estas herramientas con el fin de desarrollar un enfoque integrado que permite no solo localizar áreas críticas sino, también reconocer posibles causas y proponer prácticas de manejo sostenible del territorio.

Cada herramienta de la investigación desempeñó un papel importante. En el caso del NDVI permite analizar el estado de la cobertura vegetal, mientras que los SIG facilitan la integración, procesamiento y representación espacial de variables ambientales, lo que permite desarrollar las capas de un visor geográfico e identificar patrones territoriales asociados a la degradación del suelo. De forma complementaria, la validación en campo contribuye a corroborar, ajustar y contrastar los resultados obtenidos mediante el análisis geoespacial aumentando la fiabilidad del diagnóstico

Aunque las herramientas iniciales suelen ser muy útiles para el análisis territorial, estas pueden verse limitadas, especialmente en contextos rurales donde la resolución de la información espacial, la disponibilidad de datos actualizados y la ausencia de verificación en campo pueden afectar la precisión de los resultados. Por eso, es importante complementar el análisis técnico con metodologías prácticas y monitoreos comunitarios que permitan incorporar el conocimiento local. Según el Fondo de Acción (2024), en los procesos de monitoreo comunitario las comunidades pueden participar activamente en la observación, registro y análisis de datos información ambiental y de biodiversidad, además no deben contar necesariamente con capacitación profesional especializada, estos cuentan con diferentes conocimientos. Su experiencia, conocimiento del territorio, roles sociales e intereses permiten fortalecer las acciones de gestión ambiental a partir de la información recolectada en el proceso (Fondo Acción, 2024).

En este sentido, la comunidad deja de ser un actor pasivo de su propio territorio y se convierte en un actor activo en la gestión del territorio, fortaleciendo procesos de gobernanza y promoviendo la apropiación social del conocimiento. Dentro de este enfoque, el desarrollo de cartillas comunitarias cumplen una función pedagógica, ya que permiten traducir la información técnica sobre la degradación del suelo, pérdida de cobertura vegetal, prácticas de recuperación y monitoreo participativo en un lenguaje más sencillo y comprensible para la población local. De esta manera, las cartillas apoyan la sensibilización ambiental, facilitan la participación comunitaria y promueven acciones orientadas al manejo sostenible del suelo.

A partir de lo expuesto, la degradación del suelo en Sotaquirá se entiende como un fenómeno complejo, resultado de las interacciones entre factores biofísicos de la región y actividades antropogénicas. Si bien el uso de herramientas y modelos anteriormente mencionados permiten avances significativos en la identificación y análisis de zonas degradadas, estos mismos presentan limitaciones cuando no incorporan información contextual del territorio. Por ello, este proyecto propone un enfoque integral que combina el análisis geoespacial, la validación de campo, el

monitoreo comunitario, un geovisor y cartillas pedagógicas, con el fin de identificar zonas de degradación, fortalecer la toma de decisiones y promover la gestión sostenible del suelo en el municipio de Sotaquirá.

Políticas y modelos:

1. Modelo de cambio de cobertura vegetal del suelo en paisajes agrícolas:

Investigación sobre el lago Tota (Boyacá) y cómo el cambio de cobertura vegetal y uso del suelo afecta el funcionamiento de los ecosistema y los procesos ecológicos incidiendo en cambios como el ciclo de carbono, climatología local y regional, balance hídrico, pérdida de biodiversidad la prestación de bienes y servicios ecosistémicos, así como la estructura del suelo. La investigación se realizó mediante el uso de mapas multitemporales, análisis y modelos de cambios de suelo con el fin de cuantificar, entender el cambio y los patrones especiales para así poder dar ordenamiento y gestión del territorio. (Wanumen, 2020)

2. Política para la gestión sostenible del suelo:

Colombia cuenta con una política de gestión sostenible del suelo que establece un marco institucional estratégico orientado a garantizar la conservación, restauración y uso sostenible del suelo como un recurso fundamental para el desarrollo ambiental, social y económico del país. De igual manera se cuenta con una serie de decretos que lo garantizan, tales como

- Decreto Ley 2811 de 1974 (código nacional de recursos naturales renovables y de protección al medio ambiente) en el que se señala que el uso del suelo debe realizarse teniendo en cuenta sus condiciones y factores constitutivos. Además,

determinar su uso potencial y clasificación según sus factores físicos, ecológicos y socioeconómicos de cada región.

- Decreto 1076 de 2015 que establece las obligaciones de los dueños de predios para la protección del medio ambiente y suelo:
 - Usar el suelo de acuerdo con sus condiciones y factores constituidos para que se mantenga su integridad física y capacidad productora. Debe tener en cuenta las recomendaciones del ICA, IGAC y ministerio de ambiente.
 - Proteger los suelos mediante técnicas adecuadas de cultivos y manejo de suelos, que eviten la salinización, compactación, erosión, contaminación o revenimiento, y en general la pérdida o degradación del suelo.
 - Mantener la cobertura vegetal de los terrenos dedicados a la ganadería, para lo cual se evita la formación de caminos de ganado o terracetas que se producen por sobrepastoreo u otras prácticas que favorezcan aspectos negativos tales como la erosión.

El marco institucional y de actores de la política para la gestión sostenible del suelo constituye una herramienta que permite y posibilita la creación de espacios para el diálogo, creación de leyes y el desarrollo de acciones coordinadas y colectivas, dirigidas a la gestión responsable del suelo. Sin embargo, también existen diferentes escalas de intervención: local, regional, internacional y nacional (Minambiente, 2016).

Antecedentes:

1. El presente proyecto surge a partir de una articulación académica e institucional con la ONGD AWAQ, organización que en su página apoya y crea procesos relacionados con el reconocimiento de la biodiversidad, la degradación del suelo y la gestión ambiental en el

municipio de Sotaquirá, Boyacá. A través de la mediación del docente Arnold Ferney Torres Ome, docente de la universidad EAN , se identificó la importancia de desarrollar e implementar herramientas que permitan diagnosticar el estado del suelo y fortalecer la participación comunitaria en la toma de decisiones sobre el territorio. (AWAQ, s.f.).

Bajo este contexto, se une la Estación Biológica ANDES constituyéndose como un actor clave para el proyecto. debido a su trabajo en investigación y conservación de la biodiversidad altoandina en sotaquirá. Según la información institucional disponible, la estación promueve el desarrollo sostenible, la conservación de la biodiversidad y el trabajo con la comunidad local; Adicionalmente la estación se encuentra ubicada en la vereda Catoba, sector Llano grande, en Sotaquirá Boyacá. Por último, la estación cuenta con una alianza estratégica de trabajo con AWAQ, la Alcaldía de Sotaquirá y la fundación CataRuben (Estación Biológica ANDES, s.f.).

2. El sistema nacional de áreas protegidas cuenta con su propio informe del municipio de Sotaquirá en este se nos presentan las áreas de importancia. Se consultó cartografía en el esquema de ordenamiento territorial del municipio, herramientas para tomar coordenadas y visitar diversas zonas del lugar.

Se aclara que la unidad de bosque es muy importante pese a la constante intervención de los pobladores en el afán de expandir fronteras agrícolas. Estas áreas sirven para alimentar la fauna, la conservación de suelos de ladera, protección de cuencas hidrográficas, mantenimiento de la belleza paisajista.

A partir de esto se recomienda un plan de manejo para evitar la perturbación por acción humana y actividades agropecuarias en bosques y mayor atención a ecosistemas de páramo (SIMAP, 2019).

Estado del arte (Metodología PRISMA)

La presente revisión sistemática se desarrolló conforme a la Metodología PRISMA, para la cual se consultó la base de datos Web of Science y Scopus, y plataformas editoriales como SpringerLink para la recuperación de textos completos, y literatura complementaria.

<https://www.webofscience.com/wos/woscc/summary/f104dc36-385e-4394-8262-1e4072865fed-01a12f85cb/relevance/1>

Se incluyeron sólo artículos, los cuales fueron publicados entre el 2022 y 2026, además se consideraron publicaciones en inglés y español.

La ecuación de búsqueda utilizada fue:

("soil degradation" OR "soil erosion" OR "land degradation") AND ("GIS" OR "geospatial analysis") AND ("territorial management" OR "land management" OR "land use planning") AND ("agriculture" OR "intensive agriculture" OR "agricultural expansion")

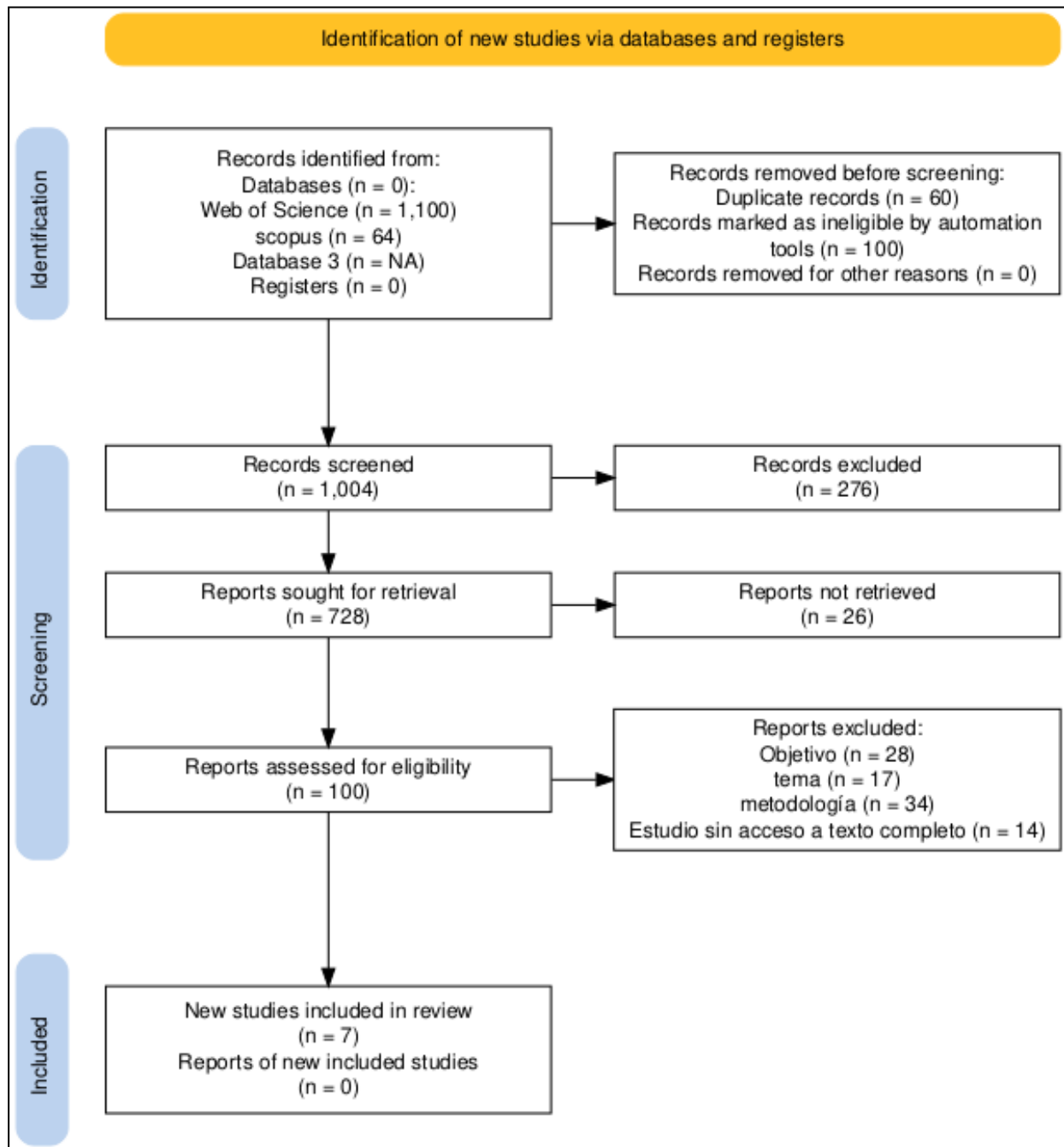


Diagrama PRISMA

Tabla 2

Comparación de estudios seleccionados

Autor(es) / Año	Título del estudio	Objetivo principal	Metodología empleada	Variables analizadas	Principales hallazgos	Limitaciones reportadas	Relación con el proyecto actual
Rodríguez Sousa et al., (2023)	Impacts of agricultural intensification on soil erosion and sustainability of olive groves in Alentejo (Portugal). (Rodríguez Sousa et al., 2023).	Evaluar cómo las prácticas de manejo en olivares (convencional, integrado y orgánico) con densidad afectan la pérdida de suelo y sostenibilidad a largo plazo.	Monitoreo empírico: Uso de trampas de sedimentos para cuantificar la pérdida de suelo durante un año. Simulación: Uso del software STELLA para proyectar el impacto de	Propiedades del suelo incluyen densidad aparente, profundidad, peso, textura y materia orgánica. Factores de erosión son erosividad de lluvia, erodabilidad, pendiente, cobertura vegetal y conservación	La sobreestimación de las tasas de erosión teórica (USLE) se compara con resultados empíricos. La cobertura vegetal es clave para reducir la pérdida de suelo. El manejo orgánico y	El monitoreo de campo se llevó a cabo en un año seco, resultando en menor pérdida de suelo y con trampas que filtran entre 10% y 30% de partículas finas. Se deben considerar limitaciones	El estudio muestra que herramientas tecnológicas como el modelo USLE ayudan a validar datos de campo para diagnosticar la degradación del suelo. También sugiere priorizar el

		(Rodríguez Sousa et al., 2023.	la erosión en la vida útil de los cultivos a cierta cantidad de años. (Rodríguez Sousa et al., 2023.	n. Manejo agrícola abarca densidad de árboles y técnicas como riego, herbicidas, arado y corte de hierba. (Rodríguez Sousa et al., 2023.	biodinámico asegura sostenibilida d. La densidad de árboles es secundaria; la sostenibilida d de la finca depende del manejo del suelo. (Rodríguez Sousa et al., 2023.	del modelo USLE. (Rodríguez Sousa et al., 2023.	mantenimien to de la cobertura herbácea en Sotaquirá. (Rodríguez Sousa et al., 2023.
Workie, M. D., & Teku, D. (2025)	Assessing soil erosion hotspots and land degradation extent in Beshilo Watershed,	El estudio busca mapear y cuantificar la erosión del suelo en la cuenca de Beshilo, identificar	La investigación combina análisis geoespacial y encuestas de campo para evaluar	Se evaluaron parámetros del modelo RUSLE: erosividad de la lluvia, erodabilidad del suelo,	Los resultados muestran tasas de erosión alarmantes con una pérdida	El estudio revela limitaciones en la investigación de la salud del suelo	El artículo expone que la integración de tecnologías geoespaciales, como la

	Northeastern Ethiopia: integrating geospatial and field survey techniques, for sustainable land management (Workie, M. D., & Teku, D. 2025).	factores de degradación y ofrecer recomendaciones para manejo sostenible. (Workie, M. D., & Teku, D. 2025).	la degradación. Utiliza el modelo RUSLE, análisis LULC con imágenes Landsat y mapeo NDVI, validado con un inventario de campo sobre cárcavas y deslizamientos. (Workie, M. D., & Teku, D. 2025).	longitud y pendiente del terreno, manejo de cobertura y prácticas de conservación. También se analizaron indicadores de salud del suelo como materia orgánica, textura, estructura, permeabilidad, vigor de la vegetación y dinámicas de uso del suelo.	promedio de 68,3 t/ha/año, afectando el 38,3% de la cuenca con riesgo severo. El 73,4% del área es agrícola y solo el 7% tiene bosques. (Workie, M. D., & Teku, D. 2025).	debido a la extensión de la cuenca, dependencia de datos inexactos, y la falta de información sobre productividad agrícola y factores socioeconómicos. (Workie, M. D., & Teku, D. 2025).	Ecuación RUSLE y el índice NDVI, junto con la validación en el campo, es efectiva para detectar áreas de degradación en el municipio de Sotaquirá. (Workie, M. D., & Teku, D. 2025).
--	--	---	--	---	---	--	--

				(Workie, M. D., & Teku, D. 2025).			
Heyder, S. M., Beza, S. A., & Demissie, S. T. (2023)	Optimizatio n of land management measures for soil erosion risk using GIS in agricultural landscape of western Hararghe highlands, Ethiopia. (Heyder, S. M., Beza, S. A., & Demissie, S. T. 2023).	La investigación tiene dos objetivos Estimar la tasa media anual de pérdida de suelo y priorizar las áreas con mayor riesgo de erosión en la microcuenca de Midhagdu. (Heyder, S. M., Beza, S.	El estudio utilizó la Ecuación RUSLE junto con Sistemas de Información Geográfica y sensores remotos. Se crearon mapas de cinco factores de pérdida de suelo, usando datos de satélites y validando con	Las variables fundamental es evaluadas fueron los cinco parámetros del modelo RUSLE: erosividad de la lluvia, erodabilidad del suelo, longitud y pendiente de la ladera, factor de cobertura y manejo, y factor de	La pérdida media anual de suelo es de 44.24 t ha ⁻¹ yr ⁻¹ , totalizando 240,250 toneladas en la microcuenca . El 49% del área excede los límites tolerables, siendo la pendiente el principal factor, seguido de la	Una de las limitaciones clave fue la falta de datos locales sobre energía cinética e intensidad de la precipitación , lo que llevó a usar métodos indirectos. También se menciona la inestabilidad de los modelos	Este artículo válida el uso de tecnologías geoespaciales para diagnosticar la degradación del suelo. Presenta una metodología para diseñar estrategias que optimicen la gestión del suelo, considerand o el contexto

		A., & Demissie, S. T. 2023).	observacion es de campo y entrevistas. (Heyder, S. M., Beza, S. A., & Demissie, S. T. 2023).	prácticas de apoyo o conservación. (Heyder, S. M., Beza, S. A., & Demissie, S. T. 2023).	erodabilidad y la falta de conservación. (Heyder, S. M., Beza, S. A., & Demissie, S. T. 2023).	USLE/RUSLE en otras condiciones. (Heyder, S. M., Beza, S. A., & Demissie, S. T. 2023).	local y la aceptación comunitaria. (Heyder, S. M., Beza, S. A., & Demissie, S. T. 2023).
Ewunetu, A., & Kerbsh, A. (2025)	Analysing land degradation using GIS in the upper tekeze basin	Analizar el estado y los patrones de la degradación de la tierra en la cuenca alta del Tekeze utilizando un enfoque integrado de Sistemas de Información Geográfica y Evaluación	Marco innovador que combina AHP, MCA y RUSLE en un entorno SIG. Se usaron datos de SoilGrids, DEM, registros de lluvia CHIRPS, y Landsat 8,	El estudio evaluó tres dimensiones de la degradación: física, biológica y química. Se utilizaron indicadores como erosión, materia orgánica y pH del	Los resultados muestran que el 95% de la cuenca corre un riesgo de degradación entre moderado y alto, con la degradación física como el principal problema.	Los autores mencionan que el estudio tiene limitaciones, como no considerar la erosión por cárcavas y riberas. Sugerían incluir mediciones químicas específicas	El artículo muestra cómo la tecnología geoespacial integra factores físicos, químicos y biológicos en un índice de degradación, aplicable en Sotaquirá,

		Multicriterio. Estimar la pérdida anual de suelo, mapear la distribución de indicadores y generar un índice de degradación. (Ewunetu, A., & Kerbsh, A. 2025).	convalidación por agricultores locales. (Ewunetu, A., & Kerbsh, A. 2025).	suelo. Las variables se estandarizaron y ponderaron para valorar su importancia. (Ewunetu, A., & Kerbsh, A. 2025).	Se estima una pérdida promedio de suelo de 27.5 t ha ⁻¹ yr ⁻¹ . (Ewunetu, A., & Kerbsh, A. 2025).	en futuras investigaciones para entender mejor los impulsores antropogénicos y climáticos. (Ewunetu, A., & Kerbsh, A. 2025).	Boyacá. También explica el uso de AHP y MCA para facilitar decisiones basadas en datos. (Ewunetu, A., & Kerbsh, A. 2025).
--	--	---	---	--	---	--	---

Nota. Elaboración propia con base en Rodríguez Sousa et al. (2023), Workie, M. D. y Teku, D. (2025), Heyder, S. M., Beza, S. A. y Demissie, S. T. (2023), y Ewunetu, A. y Kerbsh, A. (2025).

Metodología

La investigación se desarrolla bajo el enfoque cuantitativo, el cual de acuerdo con Calixto J. et al (2023), esta metodología, se utiliza “en procesos que por naturaleza son susceptibles de medición o cuantificación y además representan valores numéricos en los que se generan resultados de frecuencia, evaluación y parámetros”. En este caso, se analiza la correlación entre cobertura vegetal estimada mediante el índice de Vegetación de diferencia Normativa (NDVI), y el grado de degradación física, química, y biológica del suelo en el municipio de Sotaquirá.

La metodología se estructura en 6 fases técnicas, que permitirán integrar herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), análisis de imágenes satelitales, trabajo de campo y monitoreo participativo. Como resultado, se desarrollará un prototipo geoespacial de monitoreo territorial, entendido como un visor geográfico interactivo que integra mapas temáticos, información satelital, resultados de laboratorio y datos comunitarios para apoyar la identificación de zonas críticas de degradación del suelo y la toma de decisiones ambientales.

Fase 1. Revisión bibliográfica y conceptual

Se realizará la revisión de literatura científica relacionada con la degradación del suelo y el uso de herramientas tecnológicas geoespaciales. Esta revisión permitirá establecer e identificar antecedentes relevantes y definir indicadores asociados a procesos de degradación de suelo, así como su relación con la cobertura vegetal.

Fase 2. Recolección de información geoespacial.

Se recopilaron imágenes satelitales (Google Earth Engine, QGIS o ArcGIS) y datos geoespaciales del territorio, con el fin de crear una base del área de estudio, estas fuentes de información permitirán evaluar el estado, en el que se encuentra el mismo.

En esta fase se construyen las bases geográficas del proyecto necesarias para el cálculo del índice NDVI, la determinación de área de análisis y la generación de cartografía temática.

Fase 3. Procesamiento y análisis de datos.

La información será procesada mediante herramientas de sistemas de información geográfica (SIG), con el propósito de generar mapas de cobertura vegetal (NDVI) y degradación del suelo en Sotaquirá. Este análisis permitirá identificar patrones espaciales relacionados con las actividades antropogénicas.

En esta fase se desarrollará el prototipo geoespacial del monitoreo territorial, el cual consiste en un visor geográfico interactivo, compuesto por:

- Mapas Temáticos de NDVI y degradación del suelo.

- Capaz que haga referencia de cobertura y uso de suelo.
- Consulta espacial de áreas críticas.

Ese prototipo. Será elaborado mediante la herramienta QGIS, y plataformas de visualización geográfica web, las cuales permitirán la consulta y análisis espacial de la información generada durante la investigación.

Fase 4. Reconocimiento y monitoreo del territorial

Se realizará trabajo de campo mediante muestreo puntos georeferenciados distribuidos en el municipio de Sotaquirá, definidos mediante un muestreo estratificado, según coberturas de uso de suelo.

En cada punto se establecerá una parcela de tamaño [20 cm x 20 cm], donde se podrá evaluar indicadores de degradación del suelo. Durante el trabajo de campo en cada punto de muestreo se realizará la recolección de muestras del suelo, las cuales serán enviadas al laboratorio donde se realizará el análisis de las propiedades físicas, químicas y biológicas, tales como:

- PH
- materia orgánica
- textura
- capacidad de intercambio catiónico
- humedad
- actividad biológica.

Con el objetivo de integrar a la población local, se plantea un monitoreo comunitario, que permita recolectar datos sobre el estado del suelo, de esta forma, aportarán información sobre los cambios en la cobertura vegetal y prácticas productivas en el territorio.

Fase 5. Análisis de correlación entre cobertura vegetal y degradación del suelo

Con la información obtenida en las fases anteriores, se realizará el análisis estadístico para evaluar la relación entre los valores de Índice NDVI y el grado de degradación física, química, y biológica del suelo.

Fase 6. Interpretación de resultados

Finalmente, se interpretarán los resultados con el propósito de identificar áreas críticas de degradación y evaluar la utilidad del prototipo geoespacial como herramienta de apoyo para la gestión ambiental del municipio de Sotaquirá.

Enfoque y alcance de la investigación

Este estudio se desarrolla bajo un diseño no experimental, este es aquel que se lleva a cabo sin manipular intencionalmente variables, es un tipo de investigación que no modifica intencionalmente las variables independientes. El trabajo consiste en observar los fenómenos tal como ocurren en su entorno natural. (Hernández et al., s. f.). Este se realiza entre la cobertura vegetal estimada mediante el Índice de Vegetación de diferencia Normalizada (NDVI), y el grado de degradación física, química, y biológica del suelo, en el municipio de sotaquirá, utilizando imágenes satelitales, herramientas SIG e indicadores edáficos obtenidos en laboratorio y trabajo de campo.

En cuanto al alcance, la investigación presenta un alcance correlacional, el cual tiene como finalidad evaluar el nivel de asociación y/o conexión entre dos variables o categorías utilizando una perspectiva cuantitativa, (Arias Gonzáles et al., 2020). En este contexto, el estudio busca determinar si existe relación significativa entre factores como la cobertura vegetal con los procesos de degradación del suelo identificados en el territorio. Esto a través de análisis estadísticos y del uso de herramientas geoespaciales, con el fin de identificar patrones espaciales y posibles asociaciones entre las variables analizadas, para comprender mejor la dinámica territorial y a la identificación de áreas con mayor susceptibilidad a proceso de degradación.

Instrumentos

1. Uso de base de datos abiertas que contenga información de mapas tales como Colombia en mapas, IDEAM u otro tipo de plataformas. Las cuales proporcionarán información sobre el uso de las coberturas y variables ambientales. Asimismo, se emplearán imágenes satelitales provenientes de herramientas como Google Earth Engine, Landsat o Sentinel-2, estas permiten el cálculo del índice NDVI, y el análisis multitemporal de la cobertura vegetal.

Las imágenes seleccionadas corresponderán a los periodos con baja nubosidad y serán analizadas en intervalos temporales definidos para comparar cambios en la cobertura vegetal y su relación con los procesos de desgracia del suelo.

2. Herramientas tales como ArcGIS y QGIS para la realización de mapas propios.

Estas herramientas permitirán:

- generación de mapas como el NDVI y degradación de suelo
- análisis espaciales
- superposición de capas
- modelamiento de la distribución de la graduación del suelo en relación con la cobertura vegetal.

3. Uso de GPS y coordenadas de análisis de datos. Se utilizarán dispositivos GPS para localizar los puntos de muestreo en el campo. Estos dispositivos permitirán registrar coordenadas geográficas, específicas que serán integradas posteriormente al análisis SIG.

Los puntos serán seleccionados mediante un muestreo especificado según cobertura del suelo pendiente y el uso agrícola o ganadero.

Se establecerán entre. 3 a 4 puntos georeferenciados distribuidos en diferentes zonas, Con el propósito de garantizar la representatividad territorial y validar la información espacial del prototipo geoespacial.

4. Cámaras para realizar registro fotográfico.

- Se utilizarán cámaras digitales o dispositivos móviles para registro fotográfico de las condiciones del suelo:
- cobertura vegetal
- condiciones del suelo
- proceso de erosión
- prácticas productivas
- monitoreo comunitario.
- Así como el registro fotográfico de la toma de muestras.

5. Protocolo de muestreo edáfico.

El muestreo de suelo se realizó mediante un protocolo en el cual se recolectó una muestra en diferentes puntos georeferenciados.

Se delimitará una parcela de 20 cm x 20 cm, a una profundidad de 40 cm, se tomará una muestra homogénea de 500 g, esta muestra será almacenada en bolsas herméticas etiquetadas y es transportada al laboratorio bajo condiciones controladas, posteriormente se realizará el análisis de las propiedades físicas y químicas de la muestra.

Los análisis incluirán variables físicas químicas y biológicas tales como.

- PH
- materia orgánica
- textura
- humedad
- capacidad de intercambio catiónico

6. Microsoft Excel u otros programas de análisis de datos como IBM SPSS Statistics.

Estas herramientas permitirán

- la organización de bases de datos
- realizar análisis descriptivos

- la aplicación de pruebas estadísticas de correlación (Pearson o Spearman)
- determinar niveles de de significancia estadística ($p < 0,05$).

Técnicas para el análisis de la información

El análisis geoespacial se realizará mediante el uso de Sistemas de Información (SIG), que permitirá procesar imágenes satelitales, generar mapas de cobertura vegetal y erosión de suelo, para evaluar la distribución espacial de los procesos de degradación de suelo en sotaquirá.

Después, se calculará el Índice de Vegetación de Diferencia Normativa (NDVI) con el propósito de poder estimar el estado de la cobertura vegetal en el área de estudio, identificando las variaciones en la vegetación y su relación con las actividades antropogénicas presentes en el municipio. Asimismo, se aplicarán técnicas de análisis estadístico correlacional para evaluar la correlación del índice de Vegetación de diferencia Normativa (NDVI) y el grado de degradación física, química, y biológica del suelo en el municipio de Sotaquirá.

Para este proceso de datos se utilizaran herramientas computacionales como Microsoft Excel u otros programas de análisis de datos como IBM SPSS Statistics, y el análisis espacial se realizará mediante plataformas como QGIS o ArCGIS.

El Índice NDVI se calculará a partir de imágenes satelitales de Sentinel-2 o Landsat 8, utilizando la siguiente fórmula.

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \text{ Lo que genera valores escalados entre -1.0 y +1.0}$$

Donde:

NIR corresponde a la banda del infrarrojo cercano

RED corresponde a la banda del rojo

Los valores obtenidos oscilarán entre 1 y más 1, permitiendo clasificar la cobertura vetal de la siguiente manera:

- Valores negativos (-1.0 a 0): Indican ausencia de vegetación, como nubes, agua o nieve.

- Valores cercanos a 0: Corresponden a suelos desnudos, rocas, arena o áreas urbanas.
- Valores bajos (0.1 a 0.3): Representan vegetación escasa, como pastizales y arbustos.
- Valores altos (0.6 a 0.9): Señalan vegetación densa y saludable, como bosques tropicales o cultivos en su etapa máxima de crecimiento.

Con el fin de evaluar la relación entre la cobertura vegetal y el grado de degradación del suelo se aplicarán técnicas de análisis estadístico correlacional. Inicialmente se realizará un análisis descriptivo de los datos mediante medidas de tendencia central y dispersión, posteriormente se evaluará la normalidad de las variables utilizando pruebas estadísticas como Shapiro-Wilk.. Dependiendo del comportamiento de los datos se aplicarán:

- Coeficiente de correlación de Pearson para variables con distribución normal.
- Coeficiente de Spiderman para variables no paramétricas.

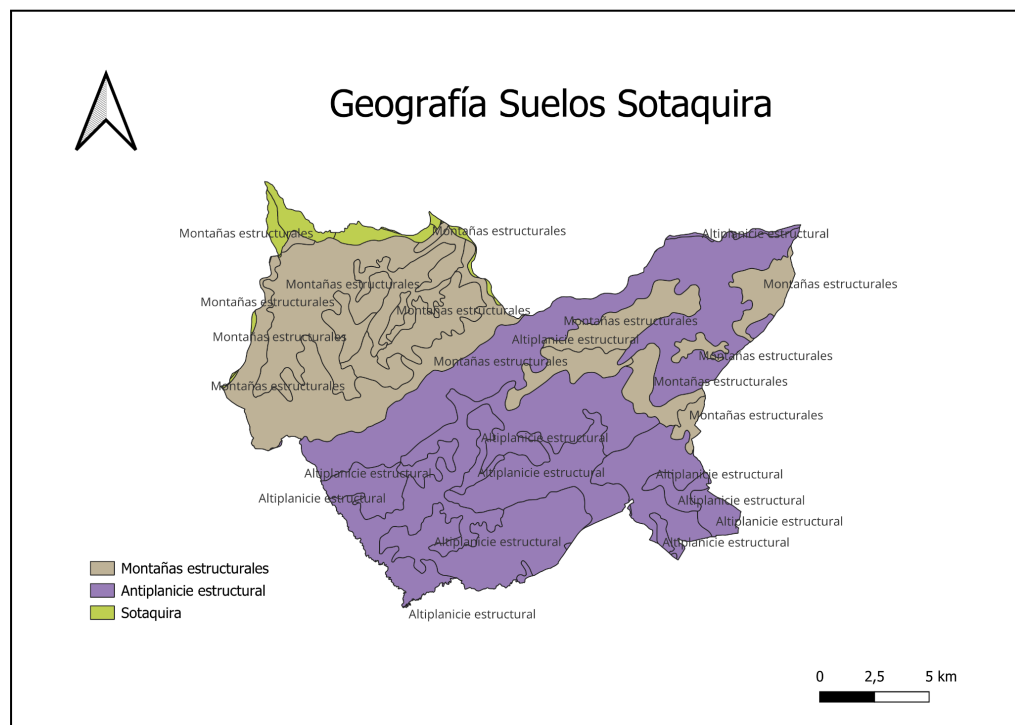
Resultados

El análisis territorial permitió relacionar las zonas de degradación de sotaquirá con la interacción entre las condiciones geomorfológicas, el uso actual del suelo, la cobertura vegetal y las actividades productivas predominantes. El municipio presenta una configuración territorial propia de zonas altoandinas, con presencia de altiplanicie estructural, montañas estructurales, áreas agropecuarias y ecosistemas estratégicos como páramos y bosques altoandinos. Estas condiciones aumentan la susceptibilidad del suelo frente a procesos erosivos, la probabilidad de pérdida de cobertura vegetal, pérdida de fertilidad y ayuda a procesos de compactación.

En primer lugar, se realizó la identificación general del territorio a partir de bases de datos abiertas como las del IDEAM o el IGAC. El mapa de la geografía del suelo permitió identificar dos unidades principales: Altiplanicie estructural y montañas estructurales, las cuales presentan

comportamientos distintos frente a la degradación. La altiplanicie estructural muestra una combinación de formas residuales antiguas y procesos de modelado activos, además, las interacciones entre la litología, el clima frío y el relieve abrupto condiciona el desarrollo de suelos volviendolos delgados, con drenaje variable y limitada capacidad productiva natural, aunque con potencial para actividades de conservación y restauración ecosistémica (Igac, 2004). Por otro lado, las montañas estructurales presentan pendientes más pronunciadas y mayor susceptibilidad a procesos erosivos.

Figura 1. Geografía suelos de Sotaquirá.

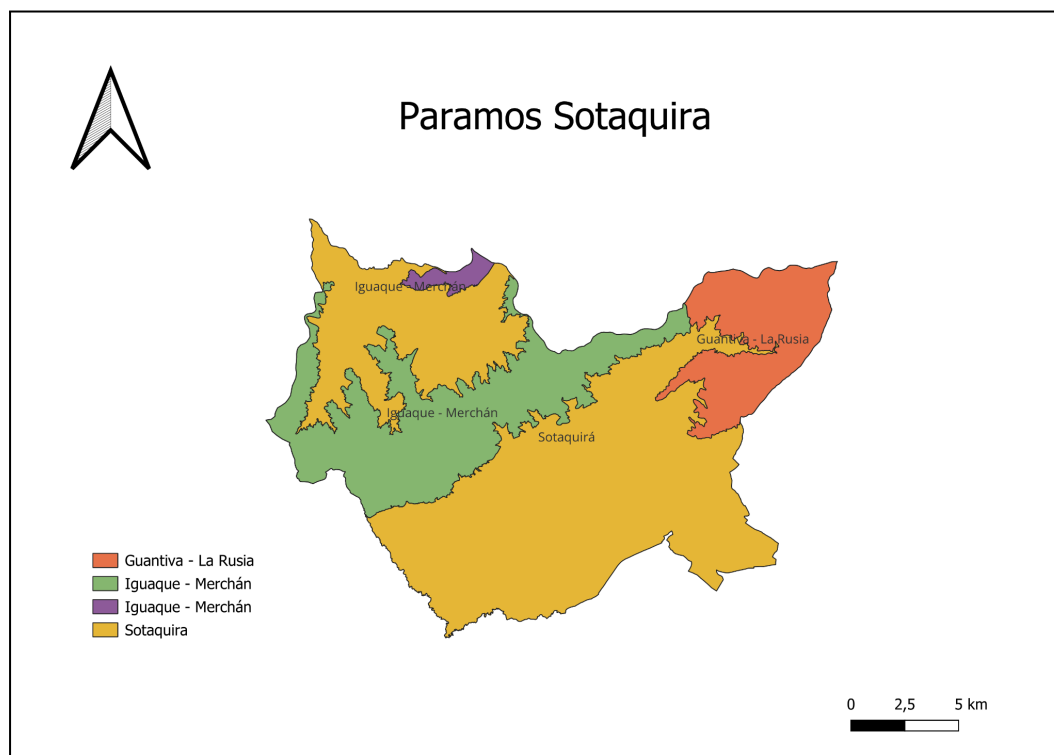


Nota. Elaboración propia de Nicol García, Arnol Torres y Andrés Rodríguez (2026) con base en cartografía de suelos y procesamiento en QGIS.

Entonces a partir de la Figura 1, se observa que las zonas montañosas requieren de una mayor observación y cuidado en términos de conservación, debido a que presenta pendientes más fuertes, suelos superficiales y mayor exposición a procesos de escorrentía. Por el contrario la altiplanicie estructural tiene una mayor posibilidad de uso productivo. Este análisis permite evidenciar que la degradación no se distribuye de manera uniforme sino que también depende de las condiciones físicas del territorio.

De manera complementaria, se analizó la presencia de ecosistemas estratégicos en el municipio. Se realizó un mapa que permitió reconocer la relación entre sotaquirá y los complejos de páramos de Guantiva–La Rusia e Iguaque–Merchán, los cuales cumplen funciones importantes en la regulación hídrica, la conservación de la biodiversidad y la estabilidad ecológica del territorio. La erosión de estos ecosistemas puede afectar a la producción agropecuaria e impactar áreas sensibles, generando un desequilibrio ecológico y poniendo en riesgo a la población.

Figura 2. Páramos de Sotaquirá.

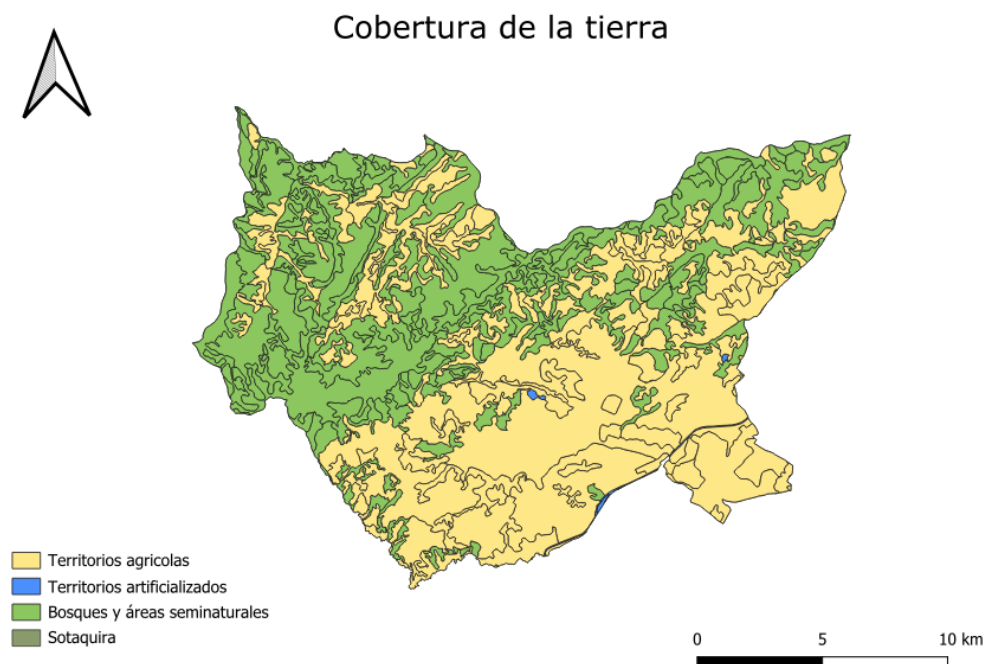


Nota. Elaboración propia de Nicol García, Arnol Torres y Andrés Rodríguez (2026) con base en información ambiental y procesamiento cartográfico en QGIS.

Al comparar la Figura 1 y Figura 2 muestra que una parte de estos páramos se encuentran vinculados a ecosistemas de alta montaña por lo que es importante orientar el uso de suelos hacia prácticas que prevengan o mitiguen el daño a estas zonas. En estas zonas, la pérdida de cobertura vegetal puede alterar actividades agropecuarias y puede generar efectos sobre la regulación hídrica, la biodiversidad y la estabilidad del suelo.

Para tener una panorama completo también se realizó el análisis de cobertura vegetal de la tierra, con el fin de diferenciar áreas intervenidas y áreas con mayor presencia de cobertura vegetal. De esta forma se orientó el trabajo de campo, ya que permitió seleccionar zonas con uso agrícola o ganadero y compararlas con zonas que conservan cobertura vegetal.

Figura 3. Mapa de cobertura de la tierra de Sotaquirá



Nota. Elaboración propia con base en información de coberturas y procesamiento en QGIS.

Gracias a la Figura 3, se pueden identificar las áreas agrícolas y ganaderas y ver su relación directa con los sectores de mayor intervención del suelo. Estas zonas fueron consideradas relevantes para la toma de muestra, debido a que las zonas de territorios agrícola representan espacios donde las prácticas productivas pueden influir en la compactación, pérdida de materia orgánica, disminución de cobertura vegetal y alteración de las propiedades físicas y químicas del suelo, a diferencia de, las zonas con bosques y áreas seminaturales se tomaron como referencia para comparar condiciones con mayor cobertura vegetal.

Con base en la información cartográfica procesada, se elaboró el mapa de degradación del suelo. Este permitió clasificar en seis tipos principales de afectación: toxicidad edáfica, erosión severa, erosión moderada, riesgo edáfico, erosión climática y baja fertilidad. Esta clasificación permite reconocer que la degradación en Sotaquirá no responde a un único proceso, sino a

diferentes formas de deterioro asociadas al relieve, la fertilidad, el clima, la cobertura vegetal y el uso del suelo.

Figura 4. Mapa de degradación del suelo en Sotaquirá



Nota. Elaboración propia de Nicol García, Arnol Torres y Andrés Rodríguez (2026) con base en información cartográfica de suelos, variables ambientales y procesamiento en QGIS.

Se evidencia que las afectaciones más relevantes corresponden a procesos de erosión y pérdida de fertilidad. La erosión severa se asocia a zonas de pendientes fuertes, suelos superficiales y pérdida de cobertura vegetal protectora. La erosión moderada se presenta en áreas donde aún existe capacidad productiva, pero con evidente inicio de deterioro del horizonte superficial. Por su parte, la baja fertilidad se relaciona con suelos ácidos, superficiales, con baja materia orgánica o limitaciones para el desarrollo de cultivos sin prácticas adecuadas de manejo.

Para complementar la lectura de los mapas se realizó una tabla que permite jerarquizar los tipos de degradación de acuerdo con su impacto sobre el territorio, además de su respectiva causa.

Tabla 3.

<i>Tipo Erosión</i>	<i>Causa</i>	<i>Nivel</i>
---------------------	--------------	--------------

Toxicidad edáfica	Presencia de sustancias tóxicas en el suelo que impiden el crecimiento vegetal, afectan la salud humana y alteran la microbiota en zonas rurales, tales como Sotaquirá. Aunque la agricultura es predominantemente tradicional y de bajo insumo, debido a que el uso de insumos químicos está en aumento y carece del manejo técnico necesario, especialmente en cultivos de papa y hortalizas se podría generar acumulación localizada de residuos tóxicos, especialmente en zonas con drenaje deficiente o suelos arcillosos.	Bajo
Severa	Se da debido a la tala masiva e indiscriminada de bosques naturales y secundarios con el fin de ampliar la frontera agrícola, en pendientes que superan 25%, este se da en zonas donde el uso potencial es forestal o de recuperación. Adicionalmente se realizan prácticas agrícolas sin un enfoque de conservación de suelos, también, labranza en pendientes, quemas en páramos y laderas con el fin de estimular pastizales.	Alto

Moderada	Agricultura y pastoreo en laderas (12–25%) sin terrazas ni cobertura vegetal permanente.	Medio
Riesgo edáfico	Riesgo por suelos con pendientes >50%, zonas de recarga hídrica y rondas de quebradas, donde la expansión urbana o actividades productivas pueden generar contaminación, erosión del suelo o saturación.	Medio
Climática	Se refiere al efecto agravante del clima, como las lluvias intensas sobre suelos ya degradados por actividades humanas.	Medio
Baja fertilidad	Suelos de baja materia orgánica, ácidos, superficiales, y presencia de agotamiento por cultivos repetitivos sin rotación ni enmiendas.	Alto

Nota . Elaboración propia Tipos de degradación resumen causa y nivel de afectación

Análisis de laboratorio

Con el propósito de evaluar algunas propiedades químicas asociadas al estado de degradación del suelo se realizó la toma de muestras recolectadas del suelo de Sotaquirá. Se analizaron cuatro muestras Diferentes de cobertura y uso del suelo, las muestras corresponden a:

- Muestra 1 con cobertura vegetal.
- Muestra 2 con cobertura vegetal.

- Muestra 1. con suelo asociado al pastoreo de cabras.
- Muestra 2 con suelo de uso agrícola.

A cada muestra se le realizaron análisis de pH y conductividad eléctrica con el fin de identificar variaciones relacionadas con las actividades antrópicas y el estado de conservación del suelo.

Tabla 4.

Resultados de pH y conductividad eléctrica

Muestra	Cobertura o uso del suelo	pH	Conductividad
Muestra 1	con cobertura vegetal.	6,16	15,18
Muestra 2	con cobertura vegetal.	4,67	3,59
Muestra 1	con suelo asociado al pastoreo de cabras.	4,92	2,77
Muestra 2	con suelo de uso agrícola	4,91	7,06

Nota: tabla de elaboración propia

Análisis de resultados

Los resultados obtenidos en el laboratorio evidencian diferencias importantes en las propiedades químicas del suelo, según el tipo de cobertura vegetal y uso del territorio. En la muestra 1 corresponde a un suelo con cobertura vegetal, presentó un valor de ph más alto 6,66 cercano a la neutralidad, además de la mayor conductividad eléctrica, 15,18. Estos resultados sugieren que tienen mejores condiciones de fertilidad y mayor disponibilidad de nutrientes en comparación con las demás muestras. La presencia de vegetación contribuye a la acumulación de materia orgánica, protección frente a la erosión y conservación de la humedad del suelo.

Por otra parte, la muestra 2 de cobertura de tal y la muestra 1, asociada al suelo de pastoreo y la muestra 2 de suelo de uso agrícola, Presentan valores de ph ácidos entre 4,67 Y 4,92, lo cual indica procesos de acidificación del suelo, posiblemente asociados a las actividades agropecuarias, pérdida de cobertura vegetal y alteración de las propiedades naturales del terreno. Este comportamiento puede afectar la disponibilidad de nutrientes y limita el desarrollo adecuado de la vegetación.

En cuanto a la conductividad eléctrica, las muestras 2 con cobertura beta y la 1 pastoreo registraron los valores más bajos 3,59 y 2,77 respectivamente, lo cual podría indicar menor presencia de sales y nutrientes disponibles en el suelo. La muestra asociada al pastoreo de cabras presentó una baja conductividad, posiblemente relacionada con Compactación del suelo y pérdida de cobertura vegetal derivadas al sobrepastoreo. La muestra dos, que corresponde al suelo con cultivo agrícola, presentó una conductividad intermedia 7,06, lo que podría estar relacionado con prácticas agrícolas, uso de fertilizante o modificaciones en las condiciones químicas del suelo.

En términos generales, los resultados muestran que los suelos con mayor cobertura vegetal presentan mejores condiciones químicas en comparación con aquellos sometidos a actividades agropecuarias intensivas o pérdida de vegetación. Esto evidencia la relación entre la cobertura vegetal convencional del suelo y proceso de degradación identificados en el municipio.

Los resultados del laboratorio permiten complementar y validar la información obtenida mediante el análisis espacial y el índice de NDVI, las zonas con mayor cobertura vegetal presentan mejores condiciones químicas del suelo, mientras que las áreas asociadas a actividades agropecuarias mostraron una mayor acidez y posibles señales de degradación. Esto respaldan la utilidad del NDVI y las herramientas SIG para identificar áreas críticas y apoyar procesos de monitoreo en el territorio del municipio de Sotaquirá.

Propuesta de solución a la problemática

1. situación actual

La degradación del suelo constituye una de las principales problemáticas ambientales presentadas en el municipio de Sotaquirá, debido a la presión ejercida por actividades agropecuarias, pérdida de cobertura vegetal y manejo inadecuado del territorio. Las características geomorfológicas del municipio, especialmente las pendientes pronunciadas y la presencia de área de uso agrícola ganadero, incrementan la susceptibilidad a procesos de erosión y deterioro de las propiedades físicas químicas y biológicas del suelo.

A partir del análisis espacial realizado mediante la herramienta SIG e imágenes satelitales se identificaron variaciones en las cobertura vegetal asociadas a zonas con posibles procesos degradación, el cálculo del índice de vegetación diferencial normalizada de NDVI permitió reconocer áreas con baja densidad vegetal relacionadas principalmente con la actividad. Agrícolas intensivas y zonas de pastoreo. De esta manera, complementado con los análisis de laboratorio realizados a las cuatro muestras de suelo se evidenciaron diferencias significativas en variables químicas como el PH y la conductividad eléctrica, según el tipo de cobertura y el uso del suelo. Los resultados mostraron que los suelos con cobertura de tal presentan mejores condiciones químicas, con valores de ph cercanos a la neutralidad y mayor conductividad eléctrica, lo que indica que una mayor disponibilidad de los nutrientes y mejores condiciones de conservación.

Por el contrario, las muestras asociadas a las actividades agropecuarias y pérdidas de vegetación presentan valores de ph más ácido y menores niveles de conductividad, lo que puede relacionarse con procesos de degradación y disminución de la calidad del suelo. Estos resultados permitieron establecer una relación entre la cobertura vegetal identifica el ndb y el Estado químico del suelo en diferentes sectores del municipio.

2. oportunidades

A partir de los resultados obtenidos se identificaron diferentes oportunidades para fortalecer la gestión ambiental del territorio del municipio de Sotaquirá.

Primero el uso de herramientas espaciales demostró ser una alternativa eficiente para analizar y visualizar los procesos de grasa del suelo. La integración de imágenes satelitales, índices de vegetación y sistemas de información geográfica, permitió generar mapas temáticos y reconocer áreas prioritarias para el monitoreo e interacción ambiental.

En segundo lugar, los análisis de laboratorio evidenciaron la importancia de conservar la cobertura vital como elemento fundamental para mantener las propiedades químicas y biológicas del suelo. Esto representa una oportunidad para promover las prácticas de manejo sostenible orientadas a la restauración de áreas de gradas, y la disminución de impactos asociados a las actividades agropecuarias intensivas.

Finalmente, la importancia de herramientas tecnológicas accesibles como los visor geográficos interactivos y materias pedagógicas comunitarias como la cartilla facilitan la apropiación social del conocimiento y mejora los procesos de toma de decisiones ambientales tanto a nivel institucional como comunitario.

3. propuesta de solución al problema planteado.

Como respuesta a la problemática identificada, se propone el diseño e implementación de una estrategia de monitoreo territorial participativo de la Comunidad, apoyado en herramientas geoespaciales, orientado a la identificación, seguimiento y gestión de procesos de degradación del suelo en el municipio de Sotaquirá

Esta propuesta se basa en el desarrollo de un prototipo geoespacial compuesto por un visor geográfico (**Anexo A**) interactivo y una cartilla comunitaria de monitoreo ambiental (**Anexo B**). El visor geográfico integrará mapas temáticos como NDVI, zonas críticas de degradación, puntos de muestreo resultados de análisis edáficos Permitiendo visualizar espacialmente el estado del suelo y facilitar la toma de decisiones territoriales.

Por otra parte, la cartilla. Tendrá un enfoque pedagógico y estará dirigida a la comunidad rural asociadas a campesinos e instituciones educativas del municipio.

Discusión

La presente investigación tuvo como propósito evaluarla relación entre la cobertura vegetal y los procesos de degradación del suelo mediante el uso integrado de herramientas geoespaciales y el monitoreo comunitario participativo, complementado con el análisis de laboratorio. Los resultados obtenidos permitieron identificar patrones territoriales asociados a la degradación del suelo y evidenciaron la utilidad de tecnología SIG y del índice NDVI como herramientas de apoyo para la gestión ambiental territorial.

A partir del análisis de imágenes geoespaciales y herramientas de SIG, se encontró que las zonas con menos cobertura vegetal son más propensas a sufrir daños en el suelo. Esto se debe a que la falta de vegetación permite que el suelo se erosione más fácilmente. Estos resultados coinciden con estudios anteriores realizados por Workie y Teku, Heyder y otros, y Ewunetu y Kerbsh, quienes demostraron que la pérdida de vegetación es un factor clave en la degradación del suelo en zonas agrícolas y ganaderas.

En Sotaquirá, los resultados muestran que la vegetación es crucial para proteger el suelo de la erosión y la pérdida de nutrientes. Las áreas con más vegetación están mejor conservadas, mientras que las zonas con actividades agrícolas y ganaderas intensivas muestran signos de deterioro. Esto indica que el uso inadecuado del territorio y la presión humana son factores importantes en la degradación del suelo en el municipio. La cobertura vegetal es fundamental para mantener la salud del suelo y prevenir su degradación.

Desde el punto de vista de la metodología, los resultados muestran que las herramientas geoespaciales son una buena herramienta para analizar problemas ambientales en un territorio. El uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG), imágenes de satélites como Landsat y Sentinel-2, junto con el análisis de índices de vegetación, permitió crear mapas temáticos. Estos mapas ayudan a ver dónde se está degradando el suelo en diferentes partes del municipio. lo que

demuestra que las tecnologías geoespaciales pueden ser muy útiles para mejorar la vigilancia, planificación y gestión del medio ambiente a nivel local.

Así mismo, los hallazgos obtenidos permiten establecer una base inicial para el desarrollo de estrategias locales de conservación y restauración ambiental, así como para la implementación de sistemas de monitoreo participativo apoyados en tecnologías geoespaciales.

De igual manera, el proyecto contribuye a demostrar que las herramientas SIG y los índices de vegetación no solo tienen utilidad académica, sino también un importante potencial práctico para apoyar procesos de planificación territorial y fortalecer la toma de decisiones ambientales en contextos rurales. En consecuencia, se considera que el visor geográfico interactivo y la estrategia comunitaria desarrollados durante la investigación representan una oportunidad para continuar fortaleciendo procesos de sostenibilidad y conservación del suelo en el municipio de Sotaquirá y en otros territorios con problemáticas ambientales similares.

Plan de divulgación

El presente proyecto de investigación tiene como propósito no sólo generar conocimiento académico sobre los procesos de degradación del suelo en ecosistemas altoandinos, como Sotaquirá, sino también fortalecer la gestión sostenible del territorio mediante herramientas geoespaciales y participación comunitaria. En este sentido, el plan de divulgación se orienta a garantizar que los resultados obtenidos trasciendan el ámbito universitario y puedan ser apropiados por actores académicos institucionales y comunitarios vinculados a la gestión ambiental del y del territorio.

Como producto principal de divulgación científica se proyecta la publicación del artículo científico enfocado en el análisis de la relación entre la cobertura vegetal estimada mediante el Índice de Vegetación de Diferencias Normalizada (NDVI) y los procesos de degradación física, química y biológica del suelo en el municipio de Sotaquirá.

El artículo buscará ser publicado en revistas académicas relacionadas con la sostenibilidad ambiental, la geografía aplicada, gestión territorial o conservación de recursos naturales, entre las posibles líneas editoriales se priorizará publicaciones enfocadas en el estudio ambiental latinoamericano y tecnología aeroespaciales aplicadas al territorio. El manuscrito incluirá los principales resultados del proyecto, tales como mapas temáticos, degradación, análisis estadístico de correlación entre NDVI, indicadores edáficos.

De manera complementaria, el proyecto contempla una estrategia de apropiación social del conocimiento dirigido a comunidades rurales, asociaciones campesinas y entidades territoriales del municipio de Sotaquirá. Esto se debe a que la investigación incorpora un componente participativo orientado al monitoreo comunitario y al fortalecimiento de las capacidades locales para el reconocimiento de las problemáticas ambientales asociadas a la degradación del suelo. Por esta razón, los resultados no están dirigidos únicamente a escenarios académicos, sino que también a espacios sociales e institucionales donde la información pueda convertirse en una herramienta útil para la toma de decisiones y la planificación territorial.

Como parte de la estrategia se desarrollarán dos prototipos principales, una cartilla comunitaria y un visor geográfico interactivo. La cartilla comunitaria tendrá un enfoque pedagógico y contendrá información significativa sobre el monitoreo comunitario del territorio, mediante un manual de toma de muestras del suelo y la opción del análisis de estas por parte de la comunidad. Por otra parte, el visor geográfico interactivo constituirá la parte geoespacial del proyecto, este visor integrará mapas temáticos como el NDVI, junto a diferentes capas como lo son los diferentes tipos de erosión, la baja fertilidad, los páramos, los bosque y las áreas naturales, las fuentes hidrográficas y las afectaciones, entre otras capaz.

La divulgación de los productos obtenidos se realizará mediante diferentes escenarios y estrategias de socialización, en el ámbito académico se contempla la participación en encuentros

universitarios y eventos relacionados con la sostenibilidad ambiental y gestión del territorio. Asimismo, la publicación del artículo en revistas especializadas.

En el ámbito comunitario e institucional se realizarán talleres participativos, reuniones con la comunidad como asociaciones campesinas y espacios de socialización con actores sociales locales vinculados a la gestión ambiental del municipio. Estas actividades permitirán presentar los mapas generados, explicar el funcionamiento del visor geográfico y promover el uso de la cartilla comunitaria como herramienta de educación ambiental y monitoreo participativo.

En cuanto a recursos y acompañamiento institucional, se requiere el apoyo de la Universidad EAN, especialmente desde el programa de Ingeniería ambiental y los espacios de investigación académica, también será necesario contar con acceso a software SIG como QGIS o ArcGIS, plataformas de procesamiento geoespacial, equipos de cómputo y herramientas de diseño gráfico para la elaboración de los materiales pedagógicos y visuales.

Entre los posibles aliados externos se identifican entidades ambientales y actores territoriales como Corpoboyacá, la alcaldía municipal de Sotaquirá, instituciones educativas rurales y organizaciones comunitarias interesadas en procesos de conservación y restauración del suelo. La participación de estos actores permitirá fortalecer la apropiación Social del conocimiento y facilitar la implementación de futuras estrategias de monitoreo participativo en el territorio.

Finalmente se espera que este plan de divulgación contribuya a generar mayor visibilidad académica sobre las problemáticas de degradación del suelo, fortalecer procesos de gestión sostenible del territorio y promover la transferencia de conocimiento mediante herramientas geoespaciales y participación comunitaria. Asimismo, se busca que los productos desarrollados especialmente el visor geográfico y la cartilla comunitaria puedan servir como base para futuras investigaciones. Proyectos ambientales y estrategias locales de planificación territorial orientadas a

la conservación de los recursos naturales y la sostenibilidad ambiental en el municipio de Sotaquirá.

Conclusiones

La presente investigación permitió analizar la relación entre la cobertura vegetal y los procesos de degradación del suelo en el municipio de Sotaquirá mediante la implementación de las herramientas geoespaciales SIG y el monitoreo por parte de la comunidad. Los resultados demostraron que las áreas con menor cobertura vegetal presentan una mayor vulnerabilidad frente a los procesos de degradación físicos, químicos y biológicos del suelo, especialmente en zonas relacionadas con actividades agropecuarias y pérdida de vegetación.

En relación con el primer objetivo específico, se determinó que las propiedades químicas del suelo variarán según el uso que se le está dando al suelo y al tipo de cobertura que presenta. Las muestras tomadas en áreas con cobertura vegetal presentaron mejores condiciones de conservación reflejadas en los valores de PH que están más cercanos a la neutralidad y una mayor conductividad eléctrica, en contraste, los suelos utilizados a actividades agrícolas y ganaderas presentar un valor mayor de PH siendo más ácidos y tienen menores niveles de conductividad, evidenciando alteraciones relacionadas con procesos de degradación del territorio.

Respecto al segundo objetivo específico, se concluyó que las herramientas SIG y el índice NDVI, fueron efectivos para identificar las zonas críticas de degradación y para identificar los patrones espaciales relacionados con la pérdida de cobertura vegetal y presión antropogénica. Los resultados permitieron comprobar la hipótesis planteada, demostrando la relación entre los valores de NDVI y las condiciones de degradación del suelo. Asimismo, se desarrolló un prototipo geoespacial compuesto por un visor geográfico interactivo con mapas temáticos que integran información ambiental y territorial del municipio.

En cuanto al tercer objetivo específico, se llegó a la conclusión de que la participación comunitaria representa un factor importante para fortalecer la gestión sostenible del territorio. La

elaboración de la cartilla comunitaria y la propuesta de un monitoreo participativo con la comunidad. permitieron generar herramientas accesibles para facilitar la apropiación social del conocimiento.

En términos generales, la investigación permitió responder a la problemática planteada inicialmente demostrando que la combinación de herramientas geoespaciales SIG y participación comunitaria, constituyen una estrategia viable para diagnosticar y gestionar los procesos de degradación del suelo del municipio de Sotaquirá.

Finalmente se concluye que el visor geográfico interactivo y la estrategia comunitaria desarrollada durante la investigación representan herramientas con potencial para apoyar procesos de monitoreo, planificación y gestión ambiental de territorio. Asimismo, el proyecto puede servir como base para futuras investigaciones y estrategias de conservación del suelo en los municipios que enfrentan problemáticas ambientales similares.

Referencias bibliográficas

Alcaldía Municipal de Sotaquirá. (s. f.). *Esquema de Ordenamiento Territorial Sotaquirá, Boyacá.*

https://sotaquiraboyaca.micolombiadigital.gov.co/sites/sotaquiraboyaca/content/files/000432/21558_esquema-de-ordenamiento-territorial-acuerdo-no014-de-17-de-septiembre-de-2004.PDF

American association for the advance of science (AAAS). (s/f). What are geospatial technologies?https://www-aaas-org.translate.goog/programs/scientific-responsibility-human-rights-law/overview-geospatial-project?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=wa

Arias Gonzáles, J. L., Covinos Gallardo, M. R., & Cáceres Chávez, M. (2020). Formulación de los objetivos específicos desde el alcance correlacional en trabajos de investigación. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, (2), 237–247.
https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v4i2.73

Cámara de comercio Duitama. (2016). Análisis de los indicadores generales del municipio.
<https://ccduitama.org.co/wp-content/uploads/2025/12/Caracterizacion-Municipal-Sotaquirá.pdf>

Cely Calixto, N. J., Palacios Alvarado, W., & Caicedo Rolón, Á. J. (2023). *Conceptos y enfoques investigación investigación METODOLOGÍA METODOLOGÍA de de de la de la.*

Ewunetu, A., & Kerbsh, A. (2025). Analysing Land Degradation Using GIS in the Upper Tekeze Basin. *Scientific African*, e02912.

Estación Biológica ANDES. (s. f.). *Estación Biológica Andes: Investigación y conservación ambiental*. Recuperado el 25 de mayo de 2026, de <https://estacionbiologicaandes.org/>

Francisco Vasquez. (2015). Sensores y actuadores

<https://openaccess.uoc.edu/server/api/core/bitstreams/e977c93a-9bc4-4c61-984a-9a2e624b4cf4e/content#:~:text=Los%20sensores%20y%20actuadores%20son%20las%20interfaces,e n%20acciones%20o%20variaciones%20de%20magnitudes%20fisicas>

Fondo acción ambiente y niñez. (2024). Monitoreo comunitario participativo en fondo acción.

<https://fondoaccion.org/wp-content/uploads/2023/05/Monitoreo-Comunitario-Participativo-en-Fondo-Accion.pdf>

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (s.f.). *Land Resources Planning Toolbox*. FAO.

<https://www.fao.org/land-water/land/land-governance/land-resources-planning-toolbox/category/details/en/c/1236444/>

Hans Jenny. (1941). FACTORS OF SOIL FORMATION A System of Quantitative Pedology

<https://www.soilandhealth.org/wp-content/uploads/01aglibrary/010159.Jenny.pdf>

Heyder, S. M., Beza, S. A., & Demissie, S. T. (2023). Optimization of land management measures for soil erosion risk using GIS in agricultural landscape of western Hararghe highlands, Ethiopia. *Scientific African*, 21, e01853.

Instituto nacional de estadística y geografía (INEGI). (2024). Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI). <https://www.inegi.org.mx/programas/ndvi/>

Isaías Tobasura Acuña. (2008). *HUELLA ECOLÓGICA Y BIOCAPACIDAD: INDICADORES*

BIOFÍSICOS PARA LA GESTIÓN AMBIENTAL. El caso de Manizales, Colombia. 3–18.

Igac, I. G. A. C.-. (2004). *Colombia en Mapas*.
<https://www.colombiaenmapas.gov.co/?u=0&t=43&servicio=387#>

Igac, I. G. A. C.-. (2004). *Colombia en Mapas*.
<https://www.colombiaenmapas.gov.co/?e=-87.3432432910149,-5.908129081496569,-61.15183704102185,15.805715091909976,4686&b=igac&u=0&t=43&servicio=387>

Mapcarta.com. (s/f). Sotaquirá. Mapcarta.com. <https://mapcarta.com/es/19681272>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (s/f). Generalidades de los ecosistemas
estratégicos

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2016). Política para la gestión sostenible del
suelo.

https://www.andi.com.co/Uploads/Política_para_la_gestión_sostenible_del_suelo_FINAL.pdf

<https://www.minambiente.gov.co/direccion-de-bosques-biodiversidad-y-servicios-ecosistemicos/generalidades-de-los-ecosistemas-estrategicos/#:~:text=Los%20ecosistemas%20estratégicos%20garantizan%20la%20oferta%20de,y%20suelos%3B%20la%20conservación%20de%20la%20biodiversidad>

Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. (2022). Recuperacion de cobertura vegetal en áreas
disturbadas

<https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/03/Guia-Metodologica-PT-Cobertura-Vegetal.pdf>

Nunes, F. C., de Jesus Alves, L., de Carvalho, C. C. N., Gross, E., de Marchi Soares, T., & Prasad, M. N. V. (2020). Soil as a complex ecological system for meeting food and nutritional

security. In *Climate Change and Soil Interactions* (pp. 229–269). Elsevier.

<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818032-7.00009-6>

Portal de Suelos de la FAO. (s/f). Degradación del Suelo,

<https://www.fao.org/soils-portal/soil-degradation-restoration/es/>

Rangel - Ch., J. O. (2015). La biodiversidad de Colombia: significado y distribución regional.

Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 39(51),

176. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.136>

Rodríguez Sousa, A. A., Muñoz-Rojas, J., Brígido, C., & Prats, S. A. (2023). Impacts of

agricultural intensification on soil erosion and sustainability of olive groves in Alentejo

(Portugal). *Landscape Ecology*, 38(12), 3479-3498.

Semarnat. (s/f). los servicios ambientales del suelo,

https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/tema/recuadros/recuadro3_2.html

Sistema municipal de áreas protegidas. (2019). DIAGNÓSTICO DE LAS ÁREAS PARA

CONFORMACIÓN DE UN SISTEMA MUNICIPAL DE ÁREAS PROTEGIDAS

(SIMAP) EN EL MUNICIPIO DE SOTAQUIRA.

<https://www.corpoboyaca.gov.co/sirap/wp-content/uploads/2019/08/informe-simap-sotaquir.pdf>

UAVLATAM. (2022). ¿Qué son y para qué sirven los

drones?<https://uavlatam.com/que-son-los-drones-para-que-sirven/>

- Wanumen-Mesa, A. M., López Camacho, R., & Rodríguez-Eraso, N. (2020). ¿Son los paisajes agrícolas dinámicos o estables? Estudio de caso en el lago de Tota (Boyacá, Colombia). *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 29(1), 207–223.
<https://doi.org/10.15446/rcdg.v29n1.70014>
- Workie, M. D., & Teku, D. (2025). Assessing soil erosion hotspots and land degradation extent in Beshilo Watershed, Northeastern Ethiopia: integrating geospatial and field survey techniques, for sustainable land management. *Frontiers in Environmental Science*, 13, 1548881.