



**TÉCNICAS DE LA TOPOGRAFÍA PARA EL ESTUDIO DEL RELIEVE EN LA IDENTIFICACIÓN
DE ZONAS VULNERABLES A REMOCIÓN EN MASA: CASO DE ESTUDIO DE LA SUBCUENCA
DEL RÍO TONA, SANTANDER.**

Modalidad: monografía

JONATHAN MIGUEL PADILLA REYES
CC: 1.098.728.943

UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER
Facultad de Ciencias Naturales e Ingenierías
Ingeniería en Topografía
Bucaramanga: 04-12-2023



Técnicas de la topografía para el estudio del relieve en la identificación de zonas vulnerables a remoción
en masa: caso de estudio de la subcuenca del río Tona, Santander.
Monografía

JONATHAN MIGUEL PADILLA REYES
C.C: 1.098.728.943

**Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniero en Topografía**

DIRECTOR
CLARA INÉS TORRES VÁSQUEZ

Grupo de investigación – GRIMAT

UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER
Facultad de Ciencias Naturales e Ingenierías
Ingeniería en Topografía
Bucaramanga: 04-12- 2023

Nota de Aceptación

Aprobado en cumplimiento de los requisitos exigidos por
Las Unidades Tecnológicas de Santander para optar al título

Ingeniero Topógrafo

Según acta #35 del Comité de Proyectos de Grado

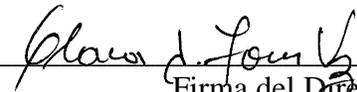
Del 29-11-2023

Docente evaluador: M.Sc Carlos Esteban Mora Chaves

Docente directora: M.Sc Clara Inés Torres Vásquez



Firma del Evaluador



Firma del Director

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a las Unidades Tecnológicas de Santander por el acompañamiento académico que tuvo a lo largo de los años, para culminar con éxito mi carrera.

A mi directora de proyecto Geóloga Clara Inés Torres Vásquez, por sus aportes y valiosos consejos y principalmente por la confianza en la ejecución de este proyecto.

A mis amigos y compañeros Juan Sebastián Roa Pinto, Diego armando Díaz Peña por ser parte de inspiración y motivación para seguir superándome académicamente.

A mis hermanos Jorge M Padilla Reyes y Jessyka M Padilla Reyes, por el apoyo incondicional que me muestran en el paso a paso de mis días.

A mi Padre por su compañía y disciplina para sacar adelante una Familia.

TABLA DE CONTENIDO

<u>RESUMEN EJECUTIVO</u>	9
<u>INTRODUCCIÓN</u>	10
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	11
1.1. Descripción del problema	11
1.2. Justificación.....	12
<u>2. OBJETIVOS</u>	13
2.1. Objetivo General:	13
2.2. Objetivos específicos.....	13
<u>3. MARCO REFERENCIAL</u>	14
3.1. Fenómenos de remoción en masa	14
3.1.1. Causas o factores detonantes	14
3.1.2. Evaluación de factores internos en la gestión del riesgo	15
3.1.3. Servicios ecosistémicos para combatir la erosión	19
<u>4. DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO</u>	20
<u>5. RESULTADOS</u>	21
5.1. Metodologías para el análisis de vulnerabilidad y evaluación de riesgo ante amenazas de remoción en masa.....	21
5.1.1. Sistemas de lógica difusa- SLD.....	23
5.1.2. Sistemas de información geográfica- SIG	24
5.2. Metodologías para los análisis multitemporales de cambios de uso del suelo y cobertura vegetal	28
5.2.1. Selección y clasificación de imágenes satelitales.....	31
5.3. Aplicación de las metodologías de remoción en masa subcuenca del río Tona	32
5.3.1. Área de estudio	33
5.3.2. Análisis de vulnerabilidad ante deslizamientos.....	34
5.3.3. Cambios en el uso del suelo y coberturas del páramo de Santurbán	35

CONCLUSIONES 42

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 44

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Factores de riesgo asociados a amenaza y vulnerabilidad.....	17
Figura 2. Metodología empleada comúnmente para análisis multitemporal	30
Figura 3. Etapas de la metodología para selección y clasificación de imágenes satelitales en análisis multitemporales	32
Figura 4. Izquierda: cuencas del departamento de Santander con el río Suratá en azul (CDMB). Derecha: cuencas del río Lebrija, río Suratá y de Oro.....	33
Figura 5. Proporción de coberturas del suelo en el páramo Santurbán	37
Figura 6. Dinámica territorial de la zona urbanizada en el municipio de Tona	38
Figura 7. Zona de derrumbes y asentamientos humanos en azul año	39
Figura 8. Parcelaciones ubicadas en el municipio de Tona año 2017.....	39
Figura 9. Metodología para análisis multitemporal del suelo en el páramo de Santurbán usada por HOYOS y PÉREZ	40
Figura 10. Zona sur del páramo Santurbán en el primer semestre del año 2019	41

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Resultados de búsqueda de información mediante palabra clave.....	21
Tabla 2. Modelo de evaluación usado en el estudio de amenaza y riesgo de la ciudad de Bogotá D.C.....	22
Tabla 3. Tipos de vulnerabilidad ante amenazas de inundación, remoción en masa y flujos torrenciales usando SIG.....	26
Tabla 4. Proporción de coberturas del suelo en la subcuenca del río Tona	37

RESUMEN EJECUTIVO

Los componentes que interfieren en el grado de vulnerabilidad y riesgo específico ante amenazas de remoción en masa son abordados en esta monografía. La selección, procesamiento y clasificación de imágenes satelitales se relacionan para poder complementar con la información estructural del suelo y demás variables. Los criterios de búsqueda usados fueron por palabras claves sobre los cambios de uso del suelo y cobertura vegetal, remoción en masa y análisis multitemporal. Aunque a través de imágenes satelitales no se puede apreciar el efecto en el suelo por la minería subterránea, los estudios en la subcuenca del río Tona evidencian un aumento de las superficies para uso agropecuario, agrícola y asentamientos humanos principalmente en el corregimiento Berlín y vereda Ucatá. Sin embargo, las fuentes hídricas no se han visto afectadas por bajos niveles debido a las precipitaciones intensas presentes en esta zona de alta montaña. Las zonas que presentan alto riesgo son El Tembladal usado para pastoreo intensivo, La Terraza aledaña al municipio de Tona con altas pendientes, vertiente suroriental de suelos residuales con pendientes moderadas a altas y algunas zonas dispersas con alta erosión por impacto antrópico en la vía a Pirgua y al Gramal.

PALABRAS CLAVE: deslizamientos, geomorfología, remoción en masa, cambios en cobertura vegetal

INTRODUCCIÓN

Los procesos dinámicos en el suelo de la zona andina de Colombia se caracterizan por cambios cada vez más frecuentes en el uso del suelo alrededor de las cuencas hidrográficas. Esta dinámica se aprecia también en zonas de alta montaña donde existe diversidad de ecosistemas y donde el uso del territorio por el hombre ha llevado a cambios en la cobertura según el Instituto de la Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). En los últimos años la pérdida de cobertura boscosa y la explotación del recurso hídrico ha generado amenazas a la estabilidad del suelo, por tanto, los análisis multitemporales se han hecho primordiales para conocer las variaciones de la orografía en regiones como la zona andina. Sin embargo, la evaluación de amenazas por la remoción en masa conlleva a análisis para determinar los factores que influyen en la ocurrencia de este fenómeno, por lo que se hace necesario recopilar gran cantidad de información y la aplicación de varias técnicas analíticas que deben ser actualizadas constantemente (GONZÁLEZ *et al.*, 1999).

En este sentido, la recopilación de estudios sobre las diferentes técnicas y rutas para determinar fenómenos amenazantes por remoción en masa es de suma importancia y se debe tratar teniendo en cuenta además las actividades dentro de las sociedades de acuerdo con los riesgos presentados en torno a fenómenos climáticos asociados con la dinámica terrestre y las economías emergentes a nivel local.

Es así como la topografía y geología aplicada se presenta en esta monografía sobre los fenómenos de remoción en masa tratados inicialmente para exponer las técnicas más usadas para el análisis de la orografía en la zona andina y luego se explora específicamente para la zona del páramo de Santurbán y la subcuenca del río Tona, siendo esta una región que se destaca a nivel económico y ambiental en el departamento de Santander.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción del problema

El estudio de la cobertura vegetal y la afectación en las fuentes hídricas-subcuencas demanda herramientas de procesamiento de imágenes para monitorear los procesos que generan cambios en los usos del suelo. Sea por procesos asociados al ciclo estacional como eventos naturales o por efectos antrópicos, los impactos a largo plazo producidos por cambios en la cobertura vegetal son denominados análisis multitemporal y se realizan con el fin de relacionar los múltiples elementos que dieron origen a estos fenómenos de remoción en masa detectados por procesamiento y comparación de imágenes del relieve a nivel digital llamados teledetección espacial (georreferenciación, ortorectificación, etc) (FONSECA, 2001).

La zona de la subcuenca del río Tona en Santander es muy vulnerable a derrumbes naturales por las altas precipitaciones características del ecosistema paramuno/subparamuno y también por los sistemas productivos de minería y ganadería que han venido en aumento en los últimos años. De modo que los estudios sobre el impacto ambiental de la cobertura vegetal en este territorio deben ser recopilados e interpretados de modo sistemático para agrupar los elementos aislados y así correlacionar los datos de la literatura. Con el complemento de la información sobre variaciones en la cobertura vegetal se espera poder definir y predecir los riesgos potenciales a nivel ambiental, como son las zonas inundables y vulnerables a derrumbes/deslizamientos en bloque.

Es así como la pregunta de investigación que soporta esta problemática es: ¿Cuáles son las principales técnicas y herramientas usadas para correlacionar el comportamiento dinámico de la cobertura vegetal y el uso del suelo con los riesgos potenciales de remoción en masa teniendo en cuenta los estudios de teledetección espacial y sistemas de información geográfica para la subcuenca del río Tona, en Santander?

1.2. Justificación

Los análisis multitemporales por teledetección espacial ayudan a definir medidas preventivas y correctivas al determinar las causas de los procesos que afectan los suelos. A partir de mapas multitemporales y de modelos de elevación digital de un terreno específico se logra delimitar y correlacionar parámetros geomorfológicos por medio de variables características de la cobertura vegetal y subcuencas. Para la subcuenca del río Tona es importante conocer la afectación del suelo con los años debido a las actividades mineras y agropecuarias cercanas a las zonas de páramo protegidas según la legislación nacional de Colombia. Son varios los modelos propuestos de zonificación para analizar y predecir la remoción en masa de acuerdo con la distribución espacial por Sistemas de Información Geográfica (SIG).

El conocimiento de los principales patrones del relieve en esta distribución espacio-temporal y su interpretación permiten conocer las zonas con mayor vulnerabilidad a los procesos de remoción en masa en el área de la subcuenca río Tona (Flórez *et al.*, 2017). Esto se verá reflejado en el fortalecimiento del conocimiento para la recuperación de fuentes hídricas, así como la aplicación de medidas de control de zonas protegidas susceptibles al cambio climático en respuesta a los riesgos potenciales que se han observado en la revisión bibliográfica.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General:

Identificar las técnicas de la topografía empleadas en el análisis orográfico para la búsqueda de zonas de remoción en masa en la subcuenca río Tona, Santander

2.2. Objetivos específicos

- Generar una base de datos correspondiente a información sobre técnicas efectivas y sus características para analizar la orografía de una zona de cobertura vegetal de alta montaña
- Interpretar las variables utilizadas en el análisis del relieve para la definición de zonas potenciales de remoción en masa en el caso de estudio de la subcuenca del río Tona en Santander.
- Proponer las técnicas adecuadas para el análisis del relieve con el fin de identificar zonas potenciales de remoción en masa en la subcuenca del río Tona.

3. MARCO REFERENCIAL

En la presente monografía se exponen inicialmente los factores relacionados con la remoción en masa de acuerdo con los diversos tipos de suelos, climas y la topografía en general. A continuación, el estudio se centrará en las principales técnicas y herramientas aplicadas tras realizar una revisión bibliográfica de estudios publicados en la zona andina colombiana sobre análisis de cambios de uso y cobertura del suelo. Finalmente se tratará el estudio de caso sobre el páramo de Santurbán y las subcuencas del río Tona a nivel de orografía y análisis de vulnerabilidad ante amenazas asociadas a la remoción en masa.

3.1. Fenómenos de remoción en masa

Los fenómenos de remoción en masa o deslizamientos se caracterizan por ser movimiento de suelo que ocurren en taludes o laderas, los cuales son causados por procesos de erosión tales como reptación, flujos de tierra y avalanchas. En este sentido, el estudio de los fenómenos de remoción en masa involucran fuerzas de fricción entre gases y fluidos en movimiento que llevan a la erosión, por lo que los fenómenos atmosféricos que generan lluvias y vientos son considerados como amenazas en estos casos (SUÁREZ, 2001).

3.1.1. Causas o factores detonantes

Los fenómenos naturales que comúnmente desencadenan erosión son de origen geológico, siendo ellos principalmente los sismos y las erupciones volcánicas, y además de origen meteorológico como son las inundaciones, sequías agresiva y deshielo (ARÉVALO y PARIAS, 2013).

En cuanto a erosión de suelos por causas naturales una importante variable a considerar son las inundaciones, ya que es una de las causas de erosión más conocidas en

zonas de alto relieve como la región andina. En este caso se presenta un flujo superficial llamado escorrentía que conlleva al desprendimiento de suelo que se suma a las corrientes talud abajo. El fenómeno se denomina erosión en masa por acción del agua y consta de tres etapas, que son desprendimiento, transporte y depósito de una gran cantidad de masa. Además, existen dos tipos de erosión en masa por lluvia que son:

Flujos. Movimientos de partículas o elementos pequeños dentro de una masa en movimiento, los cuales pueden ser rápidos, lentos como reptación, secos o húmedos dependiendo de la naturaleza de la escorrentía y sus elementos (roca, residuos o tierra).

Avalanchas. Se presenta una mezcla de materiales inherentes al suelo y residuos de orca que fluyen a alta velocidad. Flujos de materiales de diferente origen se combinan para destruir o arrastrar todo a su paso abarcando una gran área de drenaje. El origen suele ser lluvias intensas, sismos fuertes que perturban cuerpos de agua o deshielos rápidos (SUÁREZ, 2001).

Otra variable para considerar en zonas de alto relieve son los deslizamientos, es decir, el movimiento de suelos producidos en altas pendientes. El nivel de intensidad de esta amenaza depende de la velocidad alcanzada de acuerdo con la masa en movimiento y su naturaleza de disgregación. De este modo la masa inestable será más amenazante en lugares deforestados, en asentamientos humanos o intervenidos por el hombre como las zonas mineras donde hay mayor disgregación o erosión de suelos. Algunas causas naturales también se deben considerar como los derrumbes por aluviones, corrientes de lodo y residuos volcánicos (AREVALO y PARIS, 2013).

3.1.2. Evaluación de factores internos en la gestión del riesgo

Las propiedades fisicoquímicas de los materiales que constituyen las laderas o taludes, así como sus características morfológicas tienen influencia en los análisis de riesgo de remoción en masa, siendo también considerados los factores de origen meteorológico. De modo que globalmente se deben considerar muchos factores para evaluar la amenaza de la remoción en masa, esto de acuerdo con la inestabilidad de los terrenos, su comportamiento

hidrogeológico, clasificación de componentes estructurales por grado de alteración y meteorización, flujos de tierra, entre otros (PINTO, 2016).

Los factores internos hacen parte de la geología de la zona, como son los rasgos tectónicos (lineamientos de fallas y pliegues), red de drenaje, control litológico, control estructural, denudaciones producto de los agentes destructores del relieve y formas de acumulación representativas de los depósitos cuaternarios, entre otros aspectos físicos cualitativos. Además, los factores geomórficos que son cuantitativos, por tanto se debe levantar un mapa de pendientes con intervalos definidos según el promedio de las laderas que conforman el terreno de estudio.

Luego de analizar los diferentes factores de riesgo, se realiza una zonificación de acuerdo con las áreas de actividad humana con el fin de determinar las zonas de acuerdo a la clasificación como amenaza, riesgo y vulnerabilidad.

Se exponen a continuación los conceptos de riesgo:

Amenaza. Estado asociado a una probabilidad de que ocurra un fenómeno natural en un determinado tiempo en una zona específica. Según la intensidad del fenómeno se puede llegar a clasificar como desastre natural al tener poblaciones involucradas en la ruta del daño

Riesgo. Representa daños y pérdidas probables tras la ocurrencia de un fenómeno natural, siendo expresada como el producto de la amenaza y vulnerabilidad, así como denominado riesgo específico. La población es el elemento de riesgo más importante, seguido de las construcciones, comercio, servicios públicos, ecosistemas, etc.

El riesgo puede ser cuantitativo como es el número de personas afectadas, también puede ser cualitativo como los daños en edificaciones, el cese de actividades económicas, entre otros (PINTO, 2016).

El riesgo de desastre se representa en la Figura 1 como una medida donde coinciden las condiciones de amenaza y vulnerabilidad como factores de riesgo inminente. Es así que como entender las interacciones entre los factores de riesgo es de suma importancia para definir las

situaciones de riesgo específicas y mitigar las afectaciones a la comunidad (VERA y ALBARRACIN, 2017)

Vulnerabilidad. Representa el grado de pérdida en que quedaron los elementos en riesgo según su cantidad luego del fenómeno natural de determinada magnitud. Se clasifica con el número 0 si no hubo daño y con el número 1 si hubo pérdida.

Se analizan también las dinámicas poblacionales, como desplazamientos, pobreza en aumento, pérdida de ecosistemas, los cuales aumentan el factor de riesgo. De modo que la vulnerabilidad depende de tres componentes principales a analizar, que son:

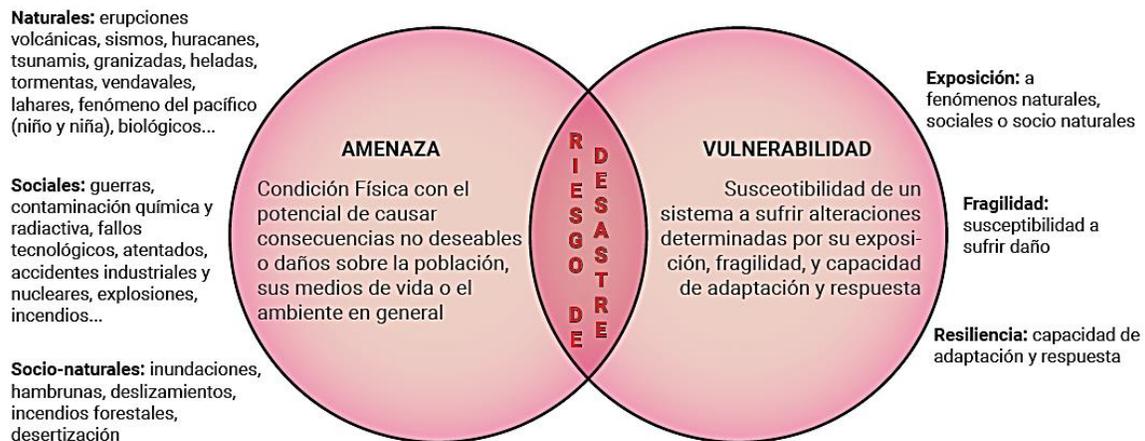


Figura 1

Factores de riesgo asociados a amenaza y vulnerabilidad (tomado de VERA y ALBARRACIN, 2017).

a. *Exposición a amenazas naturales, sicionaturales o antrópicas.* La zona de incidencia potencial de las amenazas se evalúa de acuerdo con el nivel de exposición territorial.

b. *Sensibilidad de los elementos expuestos.* Los elementos en riesgo se asocian con una susceptibilidad inherente de acuerdo con la intensidad de la amenaza y su fragilidad que puede ser física, socioeconómica si afecta un sistema de producción o ambiental si afecta un ecosistema.

c. *Capacidad de adaptación o recuperación.* La extensión de la amenaza luego del desastre va a depender de la capacidad de respuesta de la comunidad u organismos encargados de atender emergencias. Esto se relaciona directamente con las políticas vigentes ante desastres, así como las gestiones de prevención como el ordenamiento territorial de municipios, manejo cuencas hidrográficas y poblaciones en riesgo, niveles de preparación, diseño de la gestión del riesgo, transferencia de recursos, donaciones, ayuda internacional, entre otros (VERA y ALBARRACIN, 2017).

En Colombia la organización responsable ante las gestiones del riesgo por fenómenos naturales es la Defensa Civil, la cual fue creada luego de la erupción del Nevado del Ruiz en el año 1985 donde se destruyó el municipio de Armero. Además, a partir de este desastre natural de gran magnitud se dio la iniciativa de crear el Sistema Nacional para la Protección y Atención de Desastres (PINTO, 2016).

2.1.1. Servicios de imágenes satelitales en análisis de cambios de uso y cobertura del suelo

Unas de las herramientas más utilizadas para observar cambios de uso del suelo y coberturas son los análisis multitemporales basados en imágenes satelitales LANDAST, siendo estas imágenes multispectrales obtenidas a partir de mosaicos fotográficos adquiridos al mismo tiempo en diferentes intervalos de longitudes de onda (ROMERO, 2021). Específicamente, consiste en la selección de imágenes, procesamiento, interpretación y análisis de las coberturas vegetales en períodos de tiempo determinados a través del sistema de clasificación Corine Land Cover (CLC). La información es así registrada y tratada durante varios años con el fin de determinar las variaciones superficiales como indicadores de fenómenos naturales o por acción del hombre (dinámicas terrestres). También conocida como detección remota o teledetección, comprende la obtención de información de un objeto, área o fenómeno por medio de procesamiento de imágenes y análisis de datos sin llegar a haber

estado en contacto directo con el objeto, área o fenómeno en estudio (ESPILCO y ARANA, 2020).

3.1.3. Servicios ecosistémicos para combatir la erosión

Los fenómenos de remoción en masa por erosión pueden ser controlados al ser procesos de regulación que ocurren principalmente en zonas de alto relieve. La probabilidad de ocurrencia en estos casos se puede reducir o mitigar sus efectos con zonas con alta vegetación como un sistema de regulación (ecosistémico o amortiguación natural). La presencia de vegetación propicia una mejor filtración de las aguas lluvia, de modo que para prevenir la remoción en masa se aconseja mantener coberturas vegetales densas y robustas en los sitios de mayor amenaza, creando así mayor estratificación y protección del suelo. Es bien sabido que los sitios deforestados presentan alta erosión y esta inestabilidad del terreno se debe controlar con prontitud principalmente en pendientes superiores al 15%; para ello se debe incluir una gestión del riesgo adecuada en los planes de ordenamiento territorial y de gestión pública (MONROY y SANDOVAL, 2018).

4. DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO

La monografía aquí presentada consta de una revisión de literatura tipo compilación, la cual constó de búsqueda, selección, clasificación y síntesis de información sobre la literatura relacionada con las técnicas y herramientas para llevar a cabo el proceso metodológico de análisis multitemporal de cambios de uso de suelo y cobertura vegetal. Inicialmente se realizó una búsqueda general sobre fenómenos de remoción en masa y cambios de uso de suelo como revisión de partida, para luego revisar a profundidad las técnicas y herramientas más empleadas por los estudios reciente en la zona andina sobre análisis de cambios de suelo. Por último, se enfocó el tema específico sobre el páramo de Santurbán y la cuenca río Tona con el fin de aplicar los conceptos de remoción en masa en este caso de la región santandereana de páramo. El trabajo se desarrolló en cinco fases principales, que fueron:

Fase 1: definición del tema y búsqueda de las preguntas de investigación

Fase 2: inicio de la búsqueda de información sobre remoción en masa y la propuesta de investigación monográfica sobre la cuenca río Tona (filtro de datos por remoción en masa, análisis multitemporal, cambios de uso del suelo y delimitación del páramo en Santander);;

Fase 3: selección y exclusión de los estudios para el diseño del trabajo en *google* académico y en repositorios institucionales nacionales sobre el tema;

Fase 4: organización y síntesis de la información de acuerdo con remoción en masa, técnicas y herramientas para cambios en el uso del suelo y los casos específicos en el páramo de Santurbán;

Fase 5: redacción del trabajo y entrega para evaluación (revisión por la orientadora);

Fase 6: comunicación de los resultados como sustentación y correcciones para la entrega del producto escrito final (revisión final).

5. RESULTADOS

Las consultas realizadas sobre los tres temas de interés dieron inicialmente como resultado la clasificación de la Tabla 1. Como buscadores en español fueron usados Google académico, librería electrónica Scielo y el sistema de información científica Redalyc.

Tabla 1

Resultados de búsqueda de información mediante palabra clave

Palabra clave	Números de artículos	%
Remoción en masa	12	54,6
Cambios de uso del suelo y cobertura vegetal	5	22,7
Análisis multitemporal en Colombia	5	22,7
Total revisados	22	100

Luego de la selección y clasificación de los estudios más relevantes para la monografía, se presentan a continuación las técnicas y herramientas que han sido abordadas en estas publicaciones, siendo ellas en su gran mayoría de Colombia (solamente tres internacionales de Venezuela y México).

5.1. Metodologías para el análisis de vulnerabilidad y evaluación de riesgo ante amenazas de remoción en masa

La zonificación de la susceptibilidad a procesos de remoción en masa se clasifica como Muy baja, Baja, Media, Alta y Muy alta. Es evaluada por medio del análisis de los impactos físicos y variables socioeconómicas, entre otras variables que favorecen o mitigan la amenaza de remoción en masa en una zona determinada que consta de elementos expuestos (población, viviendas, ecosistemas, entre otros). Uno de los primeros estudios de amenaza y riesgo de remoción en masa se realizó recopilando información de estudios geotécnicos gubernamentales y de consultoría privadas, así como información cartográfica en planchas topográficas, geológicas, geomorfológicas, hidrológicas, de usos de suelo, infraestructura de

servicios públicos y de procesos denudacionales con escalas entre 1:5.000 a 1:50.000 de Bogotá D.C.

Las variables estudiadas se muestran en la Tabla 2, mientras que las técnicas utilizadas fueron un modelo semicuantitativo de evaluación de estabilidad (SES) para áreas urbanas y metodología de taludes naturales (MTN). La evaluación de amenazas y vulnerabilidad mediante SES se basó así en los 8 parámetros que fueron analizados y mostrados en la Tabla 2 para zonificar las laderas según variabilidad de la estabilidad. Finalmente se realizó un mapa de amenaza con bases topológicas usando cinco categorías (amenaza muy baja, baja, media, alta y muy alta). Los parámetros fueron M-material, R-relieve, D- densidad de drenaje, V- cobertura vegetal, E- erosión, S- sismo, C- clima y Acción antrópica (GONZÁLEZ *et al.*, 1999).

Tabla 2

Modelo de evaluación usado en el estudio de amenaza y riesgo de la ciudad de Bogotá D.C.

Evaluación de factores internos		Evaluación de agentes detonantes	
Origen	Variables	Origen	Variables
Geológico	Unidades litológicas y estructurales (fallas y pliegues)	Hidrológico y climatológico	área de cuencas, longitudes, pendientes de cauces e isoyetas medias anuales.
Geomorfológico	Estructuras, denudaciones, depósitos cuaternarios y mapa de pendientes.	Sísmico	Aceleraciones superficiales del terreno
Cobertura y uso del suelo	Factor antrópico y parámetro de cobertura vegetal	Erosión natural	Grado y tipo de erosión (surcos, cárcavas, zanjones, socavación o tierras malas).
Geotecnia de materiales	Información secundaria, subsuelo, tipo de materiales y propiedades con morfología de taludes	Antrópicos	Deforestación, construcción de rellenos, excavación por explotación y descarga de efluentes.

Fuente: elaboración propia

Otro mapa de amenaza relativa por fenómenos de remoción en masa mediante la MTN para luego contrastarlo con el SES y realizar un mapa de amenaza final. Esta

metodología desarrollada en Colombia sirve para evaluar estabilidad, parámetros de densidad y de resistencia de masa a partir de valores de altura y longitud en metros en segmentos de laderas homogéneas. Mediante el cálculo de un factor H de Shuk denominado Envoltura Actual que relaciona el perfil promedio de la superficie de la masa térrea se correlacionan factores de seguridad y probabilidades de falla. Con estos datos y los datos de lluvia y sismos críticos se llega a deducir la probabilidad de falla total para corto, mediano y largo plazo (GONZALEZ *et al.*, 1999).

Sin embargo, este estudio es antiguo y no tiene en cuenta el uso del suelo o la cobertura vegetal para calcular el factor H, por lo que estudios recientes han propuesto otros valores como el factor C para erosión potencial sin tener en cuenta el valor de la cobertura vegetal, factor K para erosionabilidad (resistencia del suelo a desintegrarse por el agua) y el factor P para prácticas de conservación por regulación ecosistémica. El factor K se calcula luego de un estudio granulométrico del suelo en cuanto a porcentaje de arcilla, arena, limo y materia orgánica, así como estructura y permeabilidad (MONROY y SANDOVAL, 2018).

Además, es de resaltar que los componentes del suelo influyen a su vez en la filtración del agua lluvia, de modo que cada tipo de suelo presenta variación de profundidad de suelo a saturar hasta alcanzar un límite líquido denominado falla y no solo depende de valores de pluviometría. Fenómenos como la evaporación, transpiración y adsorción de agua por las raíces de las plantas también influyen en la saturación de un terreno con cobertura vegetal (Quintana *et al.*, 2022).

5.1.1. Sistemas de lógica difusa- SLD

Otra herramienta disponible es el sistema de lógica difusa usado para evaluar la susceptibilidad a fenómenos de remoción en masa. Esta herramienta analítica se usa para explorar sistemas dinámicos mediante modelos matemáticos e información subjetiva. La información subjetiva en este caso se basa en la lingüística por medio de reglas extraídas de datos numéricos que luego se validan cuantitativamente, lo cual se conoce como método heurístico. Estos métodos combinan así información cualitativa y cuantitativa de litología

como tipos de rocas y su espesor estratigráfico (meteorización), además de pendientes topográficas y datos geomorfológicos, de geología estructural, hidrogeología y geotecnia (comportamiento geomecánico de una masa rocosa). Luego estas variables de entrada serán analizadas por un especialista en modelamiento matemático. Es así como se trata de una herramienta multidisciplinar donde se necesitan conocimientos matemáticos además de geología y topografía (GONZÁLEZ *et al.*, 1999).

Este sistema de lógica difusa aplicado a la determinación de susceptibilidad de un terreno a remoción en masa presenta una gestión integral del riesgo, donde se combinan los conocimientos geológicos y geotécnicos con modelos matemáticos para predecir posibles zonas de derrumbes. Sumado a esto se debe realizar una evaluación de riesgos para saber la probabilidad de ocurrencia de sismos, lluvias intensas, entre otros eventos naturales. Sin embargo, esta herramienta logra definir las zonas más propicias para construir carreteras o edificaciones sin presentar amenazas como deslizamientos y flujos de lodo internos (PORTILLA, 2001; MUÑIZ *et al.*, 2012).

5.1.2. Sistemas de información geográfica- SIG

Otra herramienta utilizada para zonificación de la susceptibilidad a los procesos de remoción en masa ha sido el sistema de información geográfica (SIG). El SIG se emplea para ingresar, almacenar, recuperar, gestionar, analizar y obtener datos geoespaciales en línea, el cual es un sistema de computación que permite manejar, procesar, analizar, modelar y visualizar captura de datos geoespaciales (CARTAYA *et al.*, 2006).

La combinación de variables para análisis de vulnerabilidad por remoción en masa generalmente incluye datos de geología de superficie, geomorfología (unidades R, cuaternario Q, depósitos de laderas, depósitos fluvio-glacial, suelo residual, terciario T, transición KT, cretáceo K, entre otros), pendiente media del terreno y conflictos de uso para zonas muy productivas (alto, medio, bajo o sin conflicto). En el caso de un estudio hecho sobre el municipio de Silvania (Cundinamarca, Colombia) se incluyeron las siguientes

variables: resistencia de las rocas presentes en la zona, textura, densidad de fracturamiento y caracterización de zonas críticas. A su vez la vulnerabilidad se dividió en vulnerabilidad física, económica, ambiental y social (PINTO, 2016).

Otro estudio más avanzado se realizó mediante un análisis de distribución espacial aplicando estadística multivariada junto con el SIG. El estudio se realizó en la microcuenca de la quebrada Curucutí (Venezuela) y usó solamente datos espaciales para crear un mapa de amenazas usando análisis en MapInfo 5.5 con el módulo Vertical Mapper 3.3 especial para altimetría (hipsometría/mapa de pendiente). Además, se empleó ArcShell 3.2 para ajuste de capas temáticas y ArcView 9.0 para cruzamiento de estas capas. En resumen, el SIG es de gran ayuda para zonificar la remoción en masa tipo deslizamientos mediante zonificación cualitativa de amenazas, siendo además más detallados al complementar con un análisis multivariado y/o modelos determinísticos que incluyan factores de seguridad (CARTAYA *et al.*, 2006).

Una vez más se evidencia la necesidad de complementar los conocimientos geológicos con especialistas en análisis estadístico para zonificar integralmente un terreno amenazado por remoción en masa.

Un último estudio trató el análisis y espacialización de la vulnerabilidad ante amenazas de inundación, remoción en masa y flujos torrenciales usando SIG en la cuenca del río Combeima (Tolima, Colombia). La espacialización de la vulnerabilidad se analizó de acuerdo con los componentes, variables y criterios de evaluación que se midieron según la localización. Entre estos componentes se presentan en la Tabla 3.

A su vez las variables y criterios de evaluación de cada vulnerabilidad estudiada se resumen a continuación (VERA y ALBARRACIN, 2017):

-Vulnerabilidad por exposición de ecosistemas. Esta zona se clasifica como bosque natural, parque natural, humedal, páramo o reserva natural. La medición de vulnerabilidad es alta

para más de 20% del total de los elementos expuestos en zonas de nivel de amenaza alta, media para más del 30% y baja para más del 60%.

Tabla 3

Tipos de vulnerabilidad ante amenazas de inundación, remoción en masa y flujos torrenciales usando SIG (adaptado de VERA y ALBARRACÍN, 2017).

Tipo de vulnerabilidad	Función
Global	<i>Promedio de 3 componentes:</i> Vulnerabilidad por exposición, fragilidad y capacidad de adaptación y respuesta.
Vulnerabilidad por exposición	<i>Promedio de 4 componentes:</i> Ecosistemas, Infraestructura, sistemas de producción y población.
Vulnerabilidad por fragilidad	<i>Promedio de 7 componentes:</i> Fragilidad física, socioeconómica, ambiental, institucional, conflictos por uso del suelo, grado de deforestación e impacto estimado del cambio climático.
Vulnerabilidad por la capacidad de adaptación y respuesta	<i>Promedio de 3 componentes:</i> Vulnerabilidad determinada por ahorro y capacidad de endeudamiento, por percepción del riesgo y por la gobernanza (capacidad de gestión territorial):

-Vulnerabilidad por exposición de infraestructura. Esta zona se clasificó como vías de comunicación incluyendo puentes, líneas vitales (acueducto electrificadora, alcantarillado, combustible) o demás servicios públicos (hospitales, escuelas, ancianatos, mataderos, etc). La medición de vulnerabilidad es alta para menos del 20% del total de elementos expuestos de nivel de amenaza alta, media para más del 30% y baja para más del 60%.

-Vulnerabilidad por exposición de población. Esta zona es clasificada como viviendas. La medición de vulnerabilidad es alta para menos del 20% del total de elementos expuestos de nivel de amenaza alta, media para más del 30% y baja para más del 60%.

-Vulnerabilidad por exposición de sistemas de producción. Esta zona es clasificada como cultivos, agropecuaria, plantaciones, áreas industriales, mineras, comercio o recreacional. La

medición de vulnerabilidad es alta para menos del 20% del total de elementos expuestos de nivel de amenaza alta, media para más del 30% y baja para más del 60%.

-Vulnerabilidad por fragilidad física. Esta zona es clasificada como viviendas o infraestructura productiva social y de servicios. La medición de vulnerabilidad es alta si no cumple dos de los criterios de riesgo (sismo resistencia, materiales de construcción, tipo de estructura y estado de mantenimiento), media si cumple 2 criterios y baja si cumple más de 3 criterios de construcción.

-Vulnerabilidad por fragilidad socioeconómica. Esta zona es clasificada según las condiciones de vida social (puntaje promedio del SISBEN en Colombia o servicio social de salud: vulnerabilidad alta a menos de 50 puntos, media entre 50 a 75 puntos o baja para más de 75 puntos).

-Vulnerabilidad por fragilidad ambiental. Esta zona es clasificada como conflictos por uso del suelo (vulnerabilidad alta para más de 40%, media entre 20,1-40% y baja para menos de 20%), nivel de deforestación (vulnerabilidad alta para menos de 20%, media entre 20,1-50% y baja para más de 50%) o impacto en el suelo por cambio climático (alta, media o baja).

-Vulnerabilidad por fragilidad institucional. Esta zona es clasificada según el índice de transparencia de las entidades públicas (medición de vulnerabilidad alta para menos de 60 puntos, media entre 60-80 puntos o baja para más de 80 puntos).

-Vulnerabilidad por capacidad de adaptación y capacidad de respuesta. Esta zona es clasificada según medición de viabilidad financiera del ente territorial aplicando la Ley 617 de 2000 /art. 79, además del índice de desempeño fiscal de los departamentos y municipios medición de vulnerabilidad alta para menos de 60 puntos, media entre 60-75 puntos o baja para más de 75 puntos). Además, la percepción del riesgo se midió según la percepción de la comunidad y de la institucionalidad, siendo vulnerabilidad alta cuando no se tuvo en cuenta la gestión del riesgo, media si se tuvo en cuenta sin priorización y alta cuando fue priorizada.

-Vulnerabilidad por capacidad de gobernanza y gestión territorial. La evaluación de este componente se realizó según el estado de los siguientes instrumentos:

- a. Plan de Ordenamiento Territorial (POT)
- b. Plan de Ordenamiento y manejo Ambiental de Cuencas Hidrográficas (POMCA)
- c. Plan de Gestión Ambiental Regional (PGAR)
- d. Política Pública
- e. Plan de desarrollo
- f. Estudios de riesgo

El proceso de evaluación constó de la clasificación como estado bajo, medio o alto de 5 criterios asignados como:

Estado aplicado, desactualizado y aplicado, desactualizado y no aplicado, actualizado y no aplicado y finalmente actualizado y aplicado (VERA y ALBARRACÍN, 2017).

Estos indicadores de riesgo, variables y criterios de evaluación son fáciles de calcular mediante la recolección de información en entidades públicas, de modo que se puede reproducir para cualquier cuenca hidrográfica de Colombia como el río Tona en Santander.

5.2. Metodologías para los análisis multitemporales de cambios de uso del suelo y cobertura vegetal

El análisis multitemporal es usado para observar cambios en la cobertura vegetal debido a acciones generadas principalmente por el hombre. Actualmente es ampliamente utilizada para monitorear el proceso dinámico del suelo pues permite evidenciar los cambios en las cuencas hidrográficas y zonas aledañas a quebradas y ríos, ya que de estos lugares depende la subsistencia del hombre. Es así como se puede evidenciar la pérdida de cobertura boscosa y del recurso hídrico debido a asentamientos humanos o sobreexplotación. Mediante este análisis también se puede evidenciar el impacto ambiental sobre especies nativas en zonas protegidas como páramos en un período de tiempo que suele ser de 10 a 20 años (FONSECA, 2001).

La metodología se basa en datos cualitativos y cuantitativos, donde por medio de los cualitativos se analiza y compara el cambio de uso del suelo y la cobertura de forma descriptiva, mientras con los datos cuantitativos se evalúa la cobertura a través de imágenes satelitales previamente seleccionadas, procesadas y clasificadas digitalmente. Además, las imágenes finales suelen compararse y recopilarse en el inventario de la cubierta biofísica (cobertura) de la superficie de la tierra según metodología CORINE (*Coordination of Information on the Environment*) Land Cover. Esta metodología sirve para interpretación visual de imágenes satélite asistida por computador que conforman la base de datos geográficos mundial (CASTELLANOS, 2010).

La metodología que comúnmente se usa se encuentra en la Figura 2, donde se elige un software especial para mejoramiento de imágenes que permite combinar las bandas preliminares para mejorar la interpretación visual. Luego de este control de calidad de la información visual se clasifican y seleccionan las imágenes de satélite que permitan delimitar detalladamente áreas y coberturas de interés para poder interpretarlas adecuadamente. Este proceso se conoce como manipulación numérica de imágenes, ya que se interpretan y clasifican por números digitales relacionados con cada píxel y se pasan a un lenguaje de manipulación y realces hasta conseguir un mapeo real.

Entre los métodos de clasificación está el supervisado y el no supervisado, con la diferencia que el supervisado trata agrupamientos espectrales (*clusters*) según una clase temática en común a cada grupo de imágenes clasificadas (FONSECA, 2010). La clasificación supervisada parte de conocimientos previos de la zona para aplicar el algoritmo adecuado y el no supervisado realiza un pequeño muestreo por cobertura a partir de píxeles en los *clusters*. La selección de áreas representativas es clave en esta etapa para no malinterpretar las regiones del muestreo (HURTADO *et al.*, 2020).

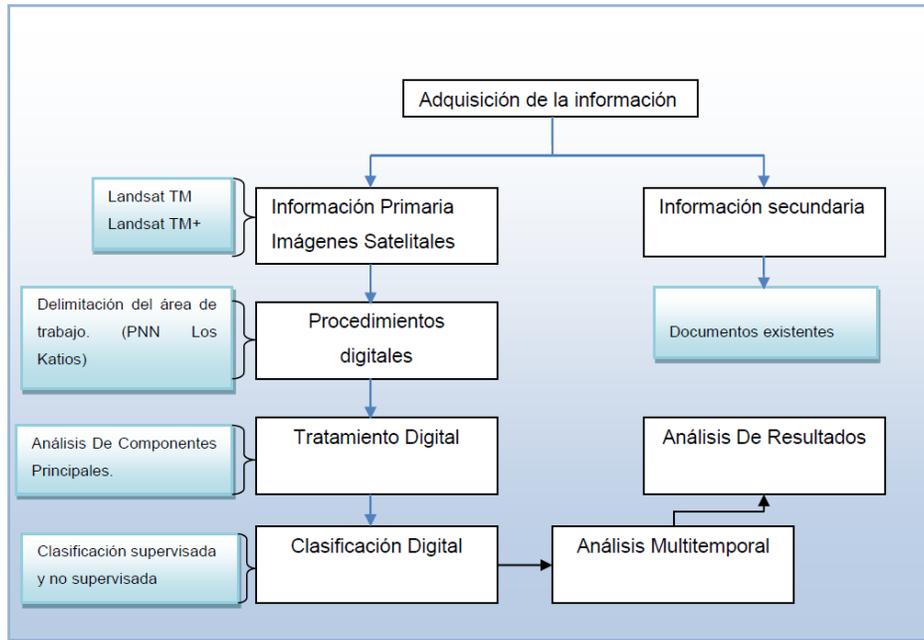


Figura 2

Metodología empleada comúnmente para análisis multitemporal (FONSECA, 2010)

Los algoritmos más utilizados en la clasificación supervisada de imágenes satelitales son:

- a. *Algoritmo de mínima distancia:* criterio sencillo para asignar un píxel a una categoría, consiste en incluirlo en la categoría más cercana (distancia espectral).
- b. *Algoritmo de paralelepípedo:* consiste en fijar un área de dominio a cada categoría según sus valores de centralidad y dispersión. Un píxel es asignado a dicha clase si está dentro del área de dominio y se delinea así unos polígonos multidimensionales.
- c. *Algoritmo de máxima verosimilitud estadística:* mediante un ajuste de distribución normal usa una función probabilidad mediante un vector de medias y matriz varianza-covarianza.

5.2.1. Selección y clasificación de imágenes satelitales

La selección de imágenes satelitales usadas para estudios de cambios de uso del suelo y cobertura vegetal deben seguir una ruta de información básica adecuada para su uso conveniente (muestreo de imágenes). La resolución espacial se reduce de 60 a 120 metros para LANDSAT 5 y 7, aunque una segunda versión brinda 15 metros. A continuación, se muestra una ruta sugerida por HURTADO *et al.*, (2020) con representación gráfica en la Figura 3:

Etapas 1. Inicialmente se verifican las unidades de reflectancia (calibración radiométrica), el sistema de referencia y que no presente desplazamientos debido al relieve, en caso contrario se debe hacer una calibración geométrica (ajustes por puntos control). En tiempo seco con cielo despejado se prefieren las imágenes, debe incluir la fecha en que fue tomada la imagen, número identificador (ID), *path/row* (2 números que indican la ubicación), sensor usado, sistema de referencia (datum, proyección), formato de almacenamiento y las 6 bandas del espectro electromagnético (azul, rojo, verde, dos de infrarrojo cercano y una banda del medio). Además, debe haber una disponibilidad de los metadatos de cada imagen.

Etapas 2. Se incluyen algunos índices de vegetación, suelos, urbanos (NDVI, SAVI, SARVI, URBAN INDEX), transformación Tasseled Cap y componentes principales para la clasificación. En este muestreo hay 2 aspectos importantes que son: uso de muestras que no sean muy grandes para bajar la desviación estándar (los píxeles seleccionados no deben ser muy altos) y distribución de muestras según la cobertura en distintos puntos de la imagen sin sectorizar solamente una zona.

Luego de estas 2 etapas de muestreo se obtienen las clases de cobertura, por ejemplo, bosque secundario, cuerpos de agua, cultivos transitorios, invernaderos, bosques de plantación, infraestructura vial, pastos manejados, pastos arbolados, zona urbana, entre otros. Específicamente hay que detallar la variación en la altura, ya que pastos es más bajo que arbustos y a su vez arbustos es más bajo que bosques de plantación (HURTADO *et al.*, 2020).

En esta etapa la selección del algoritmo de clasificación adecuado es muy importante.

Etapa 3. Se comparan los mapas temáticos obtenidos píxel a píxel de la cobertura existente de un año a otro y se parametriza si hubo un cambio o si no hubo cambio. La proporción del cambio se debe identificar al cuantificar las hectáreas del cambio en un tiempo determinado. Las imágenes clasificadas son así vectorizadas/parametrizadas para lograr polígonos en formato shp si se trabaja con ArcView (HURTADO *et al.*, 2020).

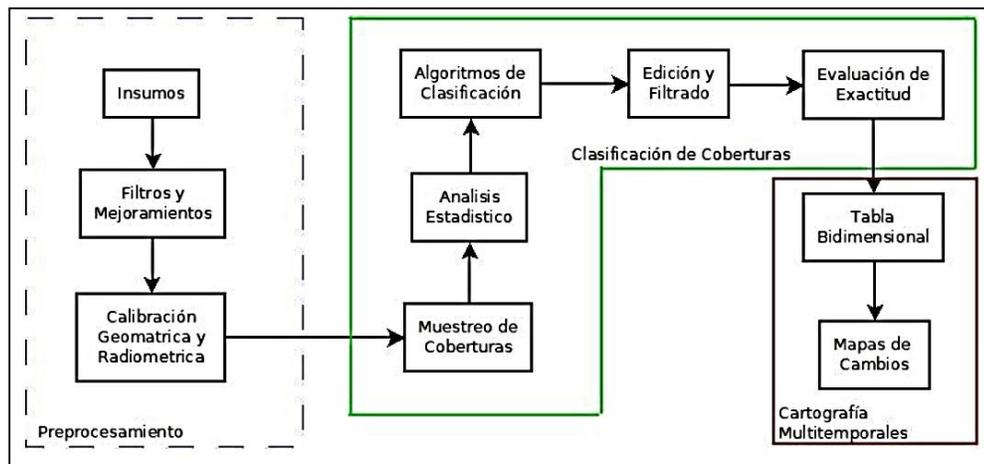


Figura 3

*Etapas de la metodología para selección y clasificación de imágenes satelitales en análisis multitemporales (tomado de HURTADO *et al.*, 2020).*

5.3. Aplicación de las metodologías de remoción en masa en el estudio de caso: subcuenca del río Tona

El estudio de caso aborda un área de interés para el departamento de Santander que es la subcuenca del río Tona, la cual se encuentra ligada al páramo de Santurbán por lo que se presentarán algunos estudios encontrados en la literatura sobre cambios en el uso del suelo en cercanías al páramo. Además, algunos estudios han tratado las variaciones en el caudal del río Tona y el efecto que ha tenido el cambio de uso en áreas circundantes a esta subcuenca.

5.3.1. Área de estudio

Inicialmente se requiere delimitar la zona de estudio y levantar los datos cualitativos para identificar alteraciones en el relieve, la tectónica, litología y clima como parte de las características físicas principales de la zona. El río Tona nace en el páramo de Santurbán (departamento de Santander en la cordillera oriental de Colombia) y posee una extensión de 193.5 Km² con una desembocadura en el río Suratá (Figura 4). Su topografía es de alto relieve con fuertes pendientes y flujos de alto caudal. La ubicación del centro de la subcuenca corresponde a latitud 7°11'8.28" Norte y longitud 72°58'47.68" Oeste. La variación climática es amplia y abarca piso térmico extremadamente frío, muy frío, frío y templado.

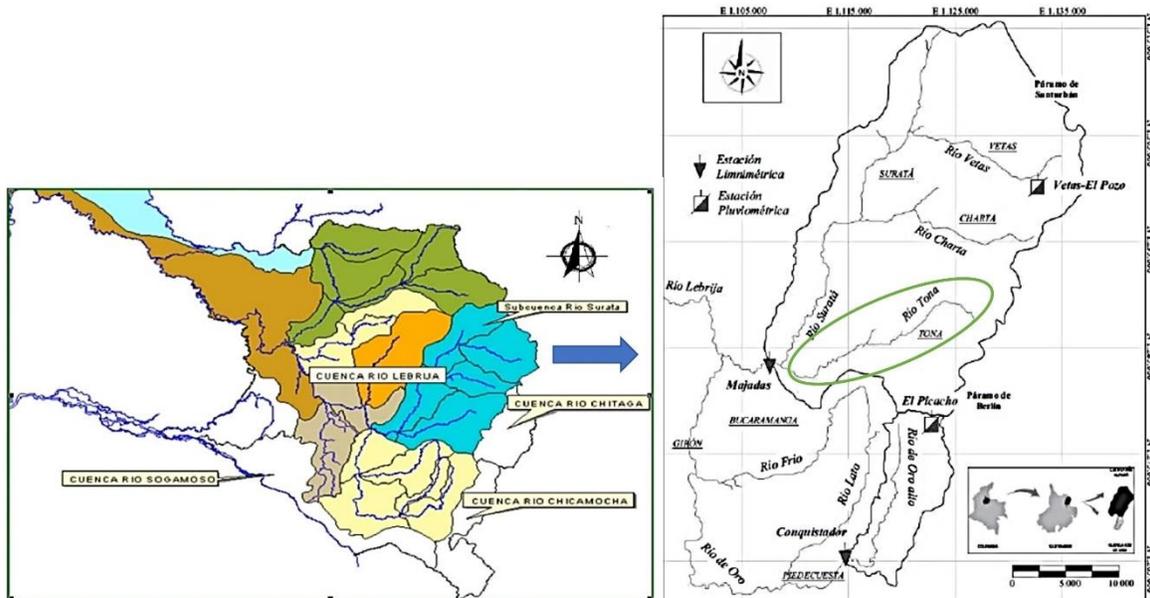


Figura 4

Izquierda: cuencas del departamento de Santander con el río Suratá en azul (CDMB). Derecha: cuencas del río Lebrija, río Suratá y de Oro (GÓMEZ y GÓMEZ, 2016).

La subcuenca del río Tona se encuentra formada por bloques tectónicos con rocas sedimentarias plegadas y macizos ígneos, lo que involucra una estructura de deformación de las rocas que favorece la disección distintiva de bloques levantados y plegados. Además, geformas como mesetas, crestas estructurales, cuchillas con pendientes similares y patrones

de drenaje con sistemas de diaclasas y fallas geológicas. Este conjunto geomórfico está relacionado con una amenaza alta de remoción en masa para ciertos tipos de suelo erosivos. De hecho, el ambiente denudacional predominante se relaciona con la disección de paisajes por procesos exógenos hídricos y/o gravitatorios. Principalmente en condiciones húmedas se favorecen los deslizamientos, flujos de suelo y escombros como consecuencia de la meteorización y movimientos gravitatorios. Aquí es de resaltar que la geología de la zona involucra la falla de Bucaramanga al oriente y la falla de Servita y Chitagá al occidente, además de fuertes corrientes de agua y transporte de sedimentos principalmente en las geoformas Los Abanicos de piedemonte, Las Vegas aluviales de divagación, Los Albardones (dique fluvial), llanuras aluviales de inundación, terrazas aluviales, conos torrenciales y ciénagas fluviales (IDEAM, 2013; CACERES *et al.*, 2022).

5.3.2. Análisis de vulnerabilidad ante deslizamientos

Luego de agrupar los datos que conforman la caracterización de los procesos involucrados en la remoción en masa, como son geografía, geología, edafología, geomorfología, litología, hidrología y meteorología, se realiza una predicción para evaluar la vulnerabilidad y riesgos ante remoción en masa. En este sentido se revisó el plan de desarrollo municipal de Tona que presenta la parte social y política para reducir la vulnerabilidad de la zona frente a desastres naturales.

Entre las áreas amenazadas se encuentran muchas asociadas a deslizamientos, con los criterios de evaluación dados a continuación:

-Clasificación con amenaza baja: áreas caracterizadas por tener rocas metamórficas y pendiente moderada a alta que además presentan abundante cobertura vegetal (regulación ecosistémica), las cuales se usan como potreros en ganadería extensiva (47,7% de área).

-Clasificación con amenaza media: áreas que tienen pendientes altas con rocas de cuarzo monzoníticas y esquistosa meteorizadas, también pendientes moderadas con rocas sedimentarias. Uso común en ganadería extensiva y/o cultivos misceláneos (47,5% de área).

-Clasificación con amenaza alta: estas zonas se subdividen en (4,8% de área):

a. *El Tembladal (drenaje 1 y 2):* presenta intercalaciones entre rocas blandas y duras provenientes de procesos periglaciares, así como rocas cretáceas paralelas. Zona usada comúnmente para ganadería extensiva con un alto riesgo por deslizamientos.

b. *La terraza (vertiente norte con drenaje 5):* zona de la subcuenca aledaña al municipio de Tona que presenta altas pendientes usadas como potreros con riesgo alto de represamientos.

c. *Zona septentrional (vertiente suroriental con drenaje 7):* área entre quebradas El Silencio y Morrochico que presenta suelos residuales de los esquistos con formaciones Silgará y pendientes moderadas a altas cubiertas por pastos.

d. *Otras áreas puntuales dispersas:* zonas de alto riesgo por impacto antrópico que presenta erosión por quemas para adecuar potreros, otras debido a precipitaciones intensas y otras por usadas para adecuación de vías a media ladera ubicadas en la vía a Pirgua y al Gramal (CDMB, 2020).

5.3.3. Cambios en el uso del suelo y coberturas del páramo de Santurbán

La subcuenca río Tona pertenece a la zona Sur del Complejo de Páramo Santurbán-Berlín de alta montaña paramuna que presenta en Colombia conflictos sobre el uso de suelo para actividades mineras y agropecuarias, esto debido a que son áreas protegidas por su fauna y flora nativa (Decreto 2372 de 2010). Se caracteriza por altas precipitaciones con temperatura entre 0 a 35 °C y alturas entre 2800-4290 msnm (CDMB, 2020). Es así como se tienen categorías para el uso del suelo en estas tierras que son:

a. *Suelo productivo:* en uso agropecuario subpáramo (4,73%), uso agroforestal (26,42%), uso forestal (17,08%) o uso minero (5,08%).

b. Suelo protegido: páramo y bosque alto andino (14,04%), humedales (23,3%), zonas con erosión como matorrales paramunos (2,53%), laderas y cerros (7,3%), áreas aledañas a nacimientos de agua y reservas naturales (7,86%).

Un estudio publicado en el año 2013 realizó un modelo para la variación del caudal en la subcuenca del río Tona teniendo en cuenta el cambio de la cobertura en el páramo de Santurbán en los años 2001, 2002, 2007, 2008, 2009 y 2011. La metodología incluyó selección y procesamiento de imágenes LANDSAT con procesos de ortorrectificación, aplicación de índices OIF y TASSELED CAP, clasificación supervisada, análisis multitemporal, cuantificación de áreas y modelo logístico para calcular el caudal según la cobertura anual. El estudio no presenta como componente la urbanización/parcelación, solamente coberturas matorral, rastrojo y vegetación rasante. Sin embargo, el estudio destaca el riesgo del cambio de uso del suelo asociado a una disminución de la cobertura rastrojo y aumento de la cobertura matorral y vegetación rasante (MORENO *et al.*, 2013).

Hay otros 3 estudios sobre cambios de uso del suelo y cobertura vegetal sobre el páramo Santurbán y alrededores. El primero fue espaciado entre los años 2000, 2014 y 2021 por la Universidad de los Andes (ROMERO, 2021), ya el segundo se llevó a cabo entre los años 2013 a 2020 en las Unidades Tecnológicas de Santander (CÁCERES *et al.*, 2022) y el último estudio se trató entre los años 2016 a 2019 usando imágenes satelitales de radar LANDSAT 8 y SENTINEL 1 por la Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Hoyos y Pérez, 2021), Estas fuentes se consultaron para determinar los cambios en la dinámica del suelo cada año y se resumen los resultados en:

Años 2000, 2014 y 2021: mapas temáticos de la cobertura del páramo Santurbán fueron obtenidos por procesamiento con ArcGIS pro de imágenes Landsat 7 y 8. Se realizó una clasificación supervisada con 6 tipos: sombras y cuerpos de agua (ecosistemas naturales), cultivos/parcelas, tierras eriales, bosque, páramo y nubes (figura 5). En el uso del suelo se observó un crecimiento para producción agropecuaria al sur del páramo (25% de actividad antrópica).

Municipios de Silos, Tona, Mutiscua y Cácuta presentaron más cambios y evidencias que hace falta aumentar las áreas de protección en estas zonas de páramo para su conservación. Solamente entre los años 2020-2021 hubo un aumento de 10,6% en área de cultivos y parcelas con 8,5 veces más superficie de tierras eriales. No se observó cambio de suelo por minería en los límites del páramo (ROMERO, 2021).

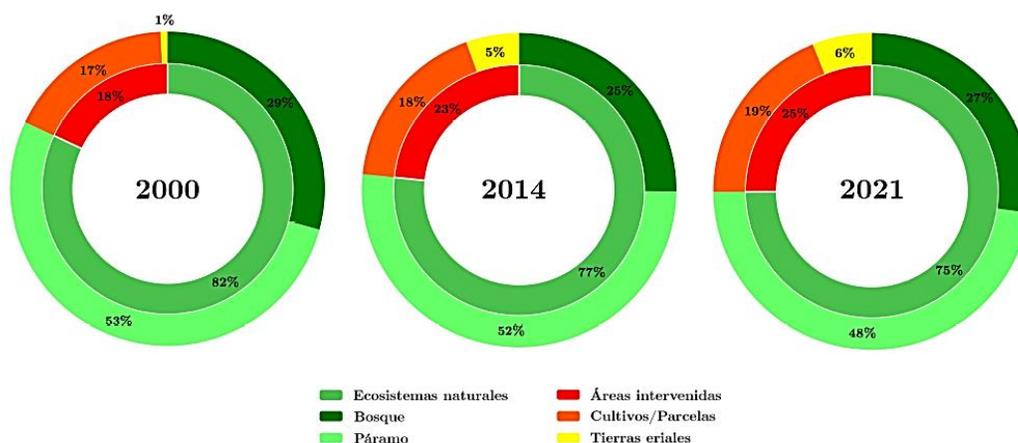


Figura 5. Proporción de coberturas del suelo en el páramo Santurbán (ROMERO, 2021)

Año 2013 a 2020: La Tabla 4 resume la dinámica territorial entre los años 2013-2021 por medio de clasificación supervisada y procesamiento digital de imágenes Landsat usando software ArcGIS incluyendo proceso *pan-sharpened composit* (Figura 6).

Tabla 4

Proporción de coberturas del suelo en la subcuenca del río Tona (CÁCERES et al., 2022).

Uso/año	2013	2017	2021
Bosque	43%	41%	37%
Pastoreo	23%	17%	20%
Arbustiva/herbácea	15%	14%	13%
Agrícola heterogénea	14%	11%	12%
Urbanización	0,64%	1,34%	2,46%

Fuente: Elaboración propia

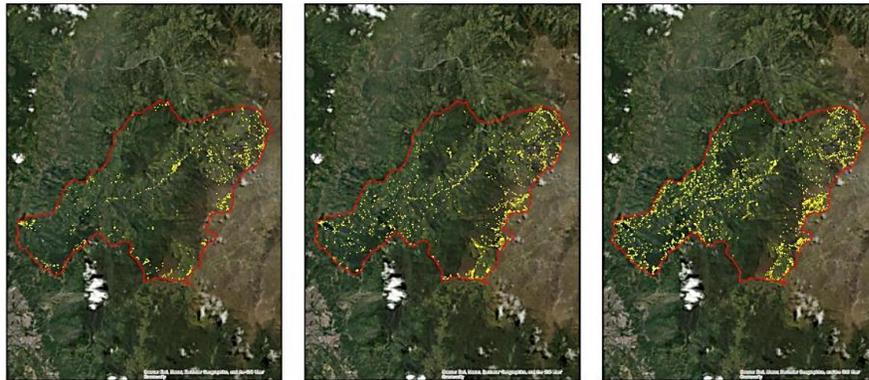


Figura 6

Dinámica territorial de la zona urbanizada en el municipio de Tona (CÁCERES et al., 2021).

El impacto antrópico en la zona Sur del páramo de Santurbán, la cual comprende la subcuenca del río Tona fue monitoreada por imágenes satelitales entre los años 2016-2019:

Año 2016: depósitos locales de roca, regiones escarpadas y pendientes altas en intersección de la vía Bucaramanga- Cúcuta. Asentamientos urbanos, pendientes bajas, parcelación, vías veredales, agricultura y pastoreo en el corregimiento Berlín con fragmentación del ecosistema paramuno (Figura 7).

2017: aumento de parcelación, viviendas y un lago artificial en la vereda Ucatá y en la vía principal que conduce a Cúcuta en una extensión de 12 ha de urbanización y 8 ha de cultivos agrícolas (medición por geomática). Año sin derrumbes y pocas precipitaciones (Figura 8).

2018: no se tuvo buena visibilidad en el municipio de Tona y alrededores (nubosidad). La metodología multitemporal se resume en la Figura 9.

2019: no se observaron movimientos de masa en el primer semestre del año que fue tiempo seco, pero se presentan mayores superficies de uso agrícola, quemas y pastoreo intensivo con fraccionamiento del páramo y bosque andino (Figura 10 de HOYOS y PÉREZ, 2021).

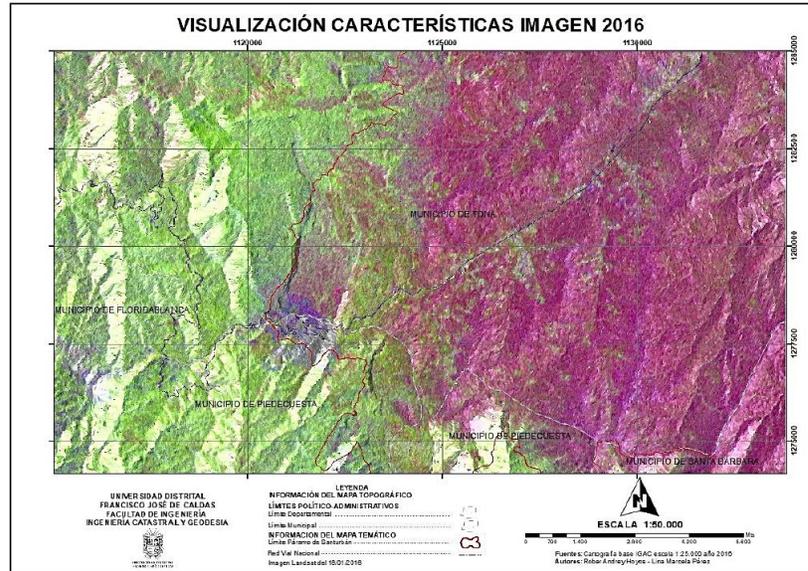


Figura 7
Zona de derrumbes y asentamientos humanos en azul año 2016 (HOYOS y PÉREZ, 2021).

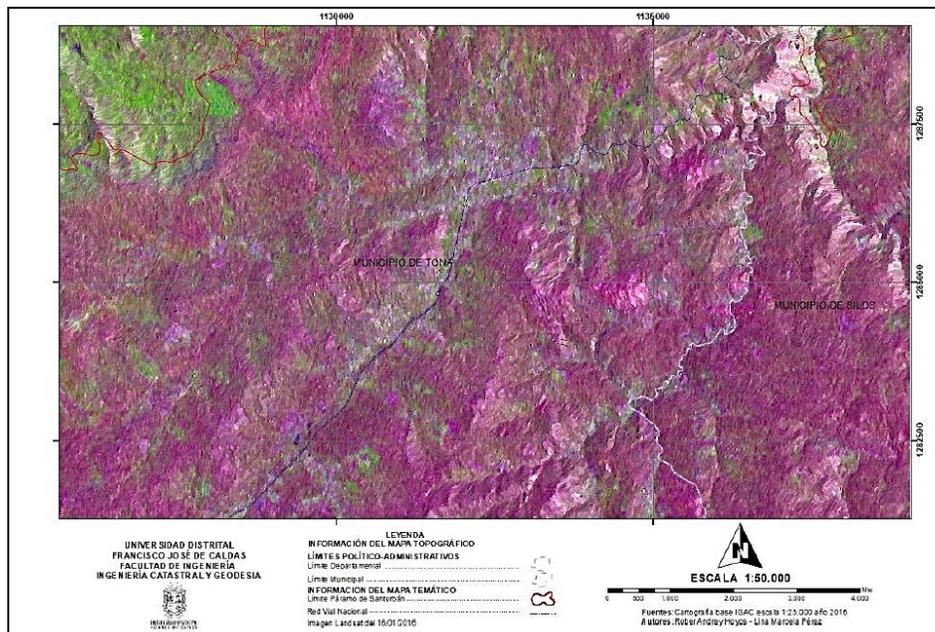


Figura 8.
Parcelaciones ubicadas en el municipio de Tona año 2017 (HOYOS y PÉREZ, 2021)

ELABORADO POR:
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR: Asesor de planeación
FECHA APROBACION:

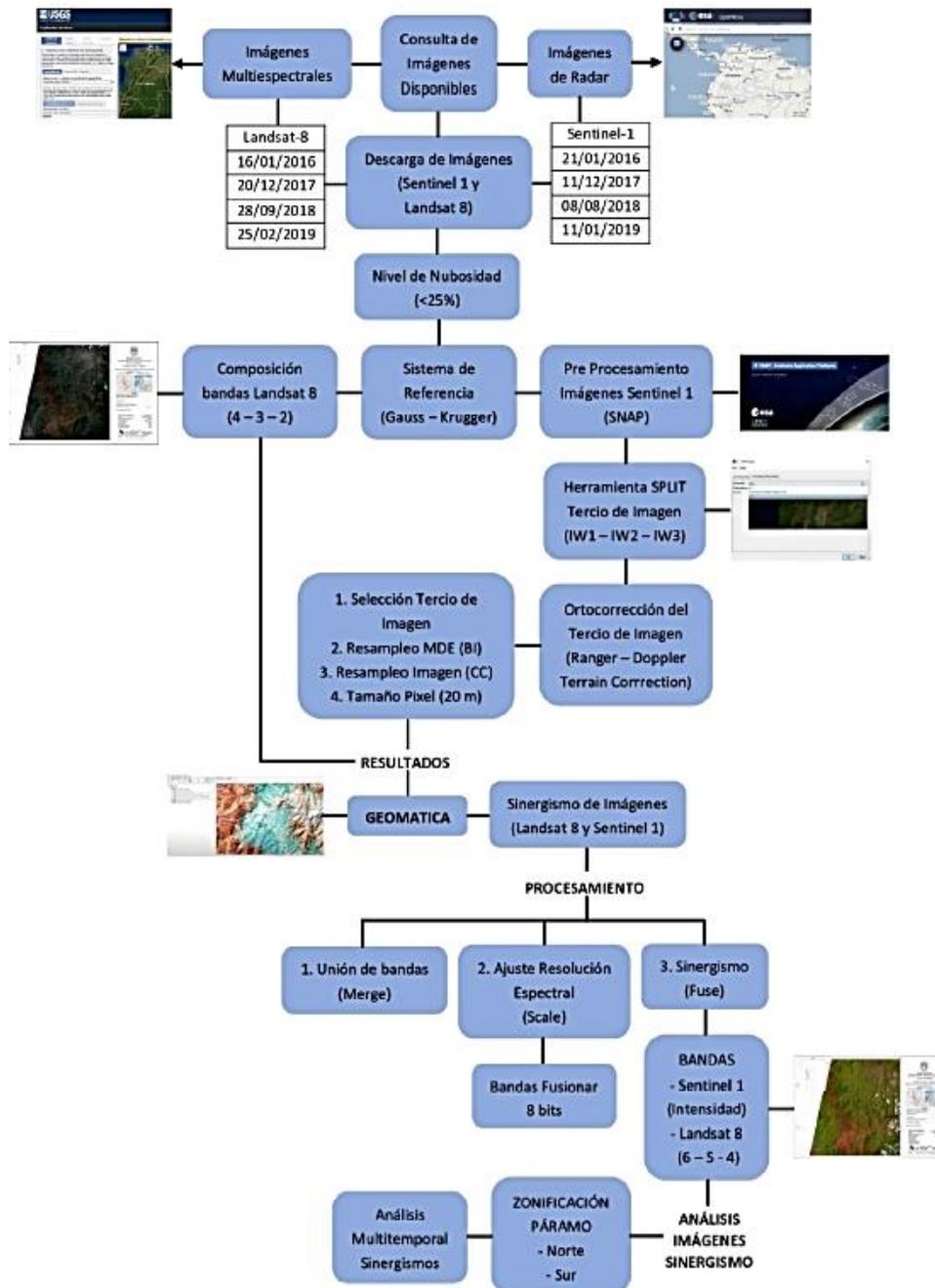


Figura 9

Metodología para análisis multitemporal del suelo en el páramo de Santurbán usada por HOYOS y PÉREZ (2021).

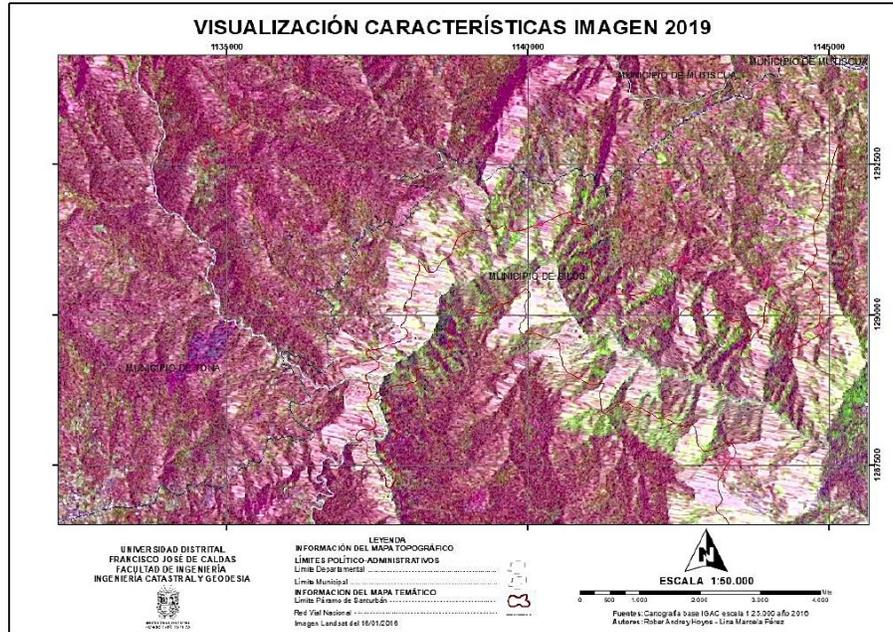


Figura 10

Zona sur del páramo Santurbán en el primer semestre del año 2019 (HOYOS y PÉREZ, 2021)

CONCLUSIONES

La dinámica territorial asociada con el crecimiento demográfico se ha podido observar mediante selección y procesamiento de imágenes satelitales, lo cual se presentó en esta monografía exponiendo las principales metodologías y herramientas aplicadas en análisis multitemporales en zonas de la cordillera andina para conocer los riesgos ante fenómenos de remoción en masa. En este sentido se destacaron métodos determinísticos y probabilísticos, los cuales se relacionan con un modelo matemático como el sistema de lógica difusa y el análisis estadístico que se usan para conocer el grado de vulnerabilidad ante amenazas de remoción en masa en una zona específica.

Además, el intenso uso del suelo y la concentración de asentamientos urbanos en terrenos de topografía escarpada con alto grado de erosión o de explotación minera pueden presentar niveles altos de riesgo por deslizamientos. Por lo que los niveles de amenaza y eventual riesgo por flujos de tierra se analizan teniendo en cuenta un sistema de variables de origen geológico, geomorfológico, geotécnico, hidrológico, climatológico y antrópico. El conjunto de estos factores se evalúa para zonificar los terrenos de acuerdo con la estabilidad y saturación del suelo frente a lluvias intensas u otros factores externos (sismos o erupciones volcánicas). Al final mediante las herramientas aquí mencionadas se realiza un mapa temático que permite conocer riesgos y niveles de vulnerabilidad ante remoción en masa según componentes estructurales por grado de alteración del suelo, erosión, meteorización, flujos de tierra, etc.

Por último, el estudio de caso trató sobre la subcuenca del río Tona en Santander, región que pertenece a la jurisdicción del páramo de Santurbán. El levantamiento de mapas temáticos de la cobertura del páramo Santurbán mediante clasificación supervisada por procesamiento con ArcGIS de imágenes Landsat 7 y 8 ha presentado mayores superficies de uso agrícola, pastoreo intensivo y parcelación en el corregimiento de Berlín y vereda Ucatá con fragmentación del ecosistema paramuno y bosque andino. Las zonas que presentan alto riesgo son El Tembladal usado para pastoreo intensivo, La Terraza aledaña al municipio de

Tona con altas pendientes, vertiente suroriental de suelos residuales con pendientes moderadas a altas y algunas zonas dispersas con alta erosión por impacto antrópico en la vía a Pírgua y al Gramal.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARÉVALO, D., PARIAS, J. (2013). Análisis de amenaza por fenómenos de remoción en masa en la región del Boquerón ubicada entre los departamentos de Cundinamarca y Tolima mediante el uso de un sistema de información geográfica de libre distribución. [Tesis de pregrado, Universidad Católica de Colombia]. Repositorio Institucional, Bogotá D.C, Colombia.

CÁCERES, J. R., FERNÁNDEZ, C. M., TORRES, C. P. (2022). Efectos que ha generado los cambios de uso del suelo en los ecosistemas naturales en la subcuenca hídrica del río Tona en los últimos 10 años. [Tesis de pregrado, Unidades Tecnológicas de Santander]. Repositorio Institucional, Bucaramanga, Colombia.

CARTAYA, S., MÉNDEZ, W., PACHECO, H. (2006). Modelo de zonificación de la susceptibilidad a los procesos de remoción en masa a través de un sistema de información geográfica. *Interciencia*, 31, p. 638-646.

CASTELLANOS, Q. H. (2010). Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia. Escala 1:100.000. IDEAM. ISBN: 978-958-806729-2.

CDMB. (2020). Plan de Ordenamiento y Manejo Ambiental Río Tona 2020-2023.

ESPILCO, Y., ARANA, C. (2020). Análisis de cambios de cobertura y uso del suelo con imágenes satelitales: una revisión sistemática. [Tesis de pregrado, Universidad Privada del Norte]. Repositorio Institucional, Cajamarca, Perú.

FLÓREZ, Y. G., RINCON, S. A., CARDONA, P. S., ALZATE, A. A. (2017). Análisis multitemporal de las coberturas vegetales en el área de influencia de las minas de oro ubicadas en la parte alta del sector de Maltería en Manizales, Colombia. DYNA rev.fac.nac.minas, 84, <https://doi.org/10.15446/dyna.v84n201.55759>

FONSECA, J. J. (2001). Análisis multitemporal mediante imágenes Landsat. Caso de estudio: cambio de área laderas de la ciénaga de Tumaradó parque natural Los Katíos. (Tesis de especialización). Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá D.C, Colombia.

GÓMEZ, I. S., GÓMEZ, R. V. (2016). Análisis de flujo base usando curvas maestras e recesión y algoritmos numéricos en cuencas de montaña: cuenca del río Suratá y cuenca del río de Oro (Santander, Colombia). Dyna, 83, p- 213-222.

GONZÁLEZ, A. G., MILLAN, J. L., SOLER, F. S., VESGA, L. M. (1999). Evaluación de riesgo por fenómenos de remoción en masa en Santafe de Bogotá-Colombia. X Jornadas geotécnicas de la ingeniería colombiana, p. 1-23.

HOYOS, R. A., PÉREZ, L. M. (2021). Evaluación de la utilización de imágenes satelitales de radar Sentinel 1 para determinar el impacto antrópico en el páramo de Santurbán. [Tesis de pregrado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. Repositorio Institucional. Bogotá D. C, Colombia.

HURTADO, L., PULIDO, D. M., LIZARAZO, I. A. (2020). Análisis multitemporal em la cobertura del suelo para la reserva forestal Thomas Van der Hammen- Bogotá. Revista Geográfica de Chile Terra Australis, 56, p. 71-86.

IDEAM. (Diciembre de 2013). Guía metodológica para la elaboración de mapas geomorfológicos a escala 1:100.000. obtenido de guía metodológica para la

elaboración de mapas geomorfológicos a escala 1:100.000:
http://www.ideam.gov.co/documents/11769/152722/Guia_Enero_201401+%281%29.pdf/501aa421-a0e4-4a1d-a5c8-d6cb1b0de520

MONROY, J. H., SANDOVAL, M. R. (2018). Evaluación de servicios ecosistémicos de regulación de remoción en masa y erosión, en las cuencas Salitre y Teusacá, área rural de Bogotá, Colombia. *Revista de Geografía (Recife)*, 35.

MORENO, A. D., GARCÍA, V. J., FUENTES, L. H. (2013). Modelo de variación del caudal en los ríos principales de las microcuencas Suratá Alto, Suratá Bajo y Tona con base en el cambio de coberturas que conforman el páramo de Santurbán. *Revista UD y la Geomática*, 7, p. 5-12.

MUÑOZ, J. J., HERNÁNDEZ, V. M. (2012). Zonificación de procesos de remoción en masa en Puerto Vallarta, mediante combinación de análisis multicriterio y método heurístico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. 29, p. 103-114.

PINTO, E. B. (2016). Análisis de vulnerabilidad por el fenómeno de remoción en masa en la vereda San Luis, municipio de Silvania- Cundinamarca. [Tesis de pregrado, Universidad de la Salle]. Repositorio Institucional, Bogotá D.C, Colombia.

PORTILLA, M. G. (2001). Aplicación de los sistemas de lógica difusa en la evaluación de susceptibilidad a fenómenos de remoción en masa. *Geología Colombiana*, 26, 189-205.

QUINTANA, C. C., MOSQUERA, T. J., PARRA, C. O. (2022). Modelado del fenómeno de remoción en masa para determinar la profundidad de infiltración de la lluvia en el suelo. *Tecnura*, 72, p. 78-102.

ROMERO, I. M. (2021). Análisis de cambios de uso y cobertura del suelo en el páramo de Santurbán durante un periodo de 20 años. [Tesis de pregrado, Universidad de los Andes]. Repositorio Institucional, Bogotá D.C, Colombia.

SUÁREZ, J. (2001). Control de erosión en zonas tropicales. [Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander]. Repositorio Institucional, Bucaramanga, Colombia.

VERA, J. R., ALBARRACIN, A. C. (2017). Metodología para el análisis de vulnerabilidad ante amenazas de inundación, remoción en masa y flujos torrenciales en cuencas hidrográficas. Ciencia e Ingeniería Neogranadina, 27, p. 109-136. DOI:<http://dx.doi.org/10.18539/rcin.2309>.