

ZONIFICACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA ESCALA  
1:25.000 EN LA MICROCUENCA DEL RÍO TONA, SANTANDER

Andrés Felipe Guevara Joya, Joel David Ramos Martínez

Trabajo de Grado para Optar al Título de geólogo

Directora

Kelly Patricia Sandoval Rincón

Geóloga Msc

Codirector

Jorge Leonardo Chaparro Cordón

Geólogo

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Geología

Bucaramanga

2023

**Dedicatoria**

*A la memoria de Luis Roberto Martínez, mi abuelo y amigo, por heredarme una imaginación tan fantástica.*

*A mi madre, Alba Martínez, por ser mi inspiración y ejemplo. Tu amor infinito, sacrificio y perseverancia me permitieron cumplir este sueño. Este logro es más tuyo que mío.*

*A mi dulce abuela, Doris Martínez, sé que tus bendiciones me acompañaron en todo momento.*

*A mis hermanas Luisa y Alba Rosa, por también salir adelante por nuestra familia.*

*A mi tío, Roberto Martínez, por siempre extenderme la mano.*

*A mi gran amor, Diana Romero, por creer en mí todo este tiempo, por el camino y el futuro compartido, por enseñarme de lo mutuo y de la alegría de vivir.*

*Con amor para todos ustedes. ¡Gracias!*

**Joel David Ramos Martínez**

**Dedicatoria**

*A mi madre, Ana Joya, por su resiliencia, amor y apoyo incondicional. Sin tu presencia nada de esto sería posible, tú eres quien merece todos los elogios.*

*A mis hermanos, Adriana, Fernanda y Sergio, que la vida nos mantenga unidos y que nuestro hermano Jorge Enrique nos cuide siempre desde el infinito.*

*Al amor de mi vida, Arhy, te estaré eternamente agradecido, tu amor es primordial para mí, tu motivación fue el empujón final que necesitaba.*

*A la memoria de Toby, mi fiel compañero al cual siempre recordare y agradeceré por estar a mi lado durante tantas noches de desvelo.*

***Andres Felipe Guevara Joya***

### **Agradecimientos**

A nuestra alma mater, por brindarnos la oportunidad de acceder a la educación, por darnos las herramientas para formarnos y educarnos como profesionales íntegros.

A nuestra directora Kelly Patricia Sandoval, por su guía, apoyo, consejos y enseñanzas durante el desarrollo de nuestro proyecto.

A Jorge Leonardo Chaparro, nuestro codirector, por guiarnos, brindarnos su ayuda y darnos su opinión experta cada vez que la necesitamos.

A todos y cada uno de nuestros docentes, compañeros y amigos que estuvieron presentes durante nuestra formación académica.

A la comunidad de Tona por su hospitalidad, calidez, solidaridad y amabilidad, por brindarnos su apoyo y mostrar interés por nuestro proyecto.

Finalmente, pero no menos importante, agradecimiento para nosotros, por creer en nosotros y en nuestro proyecto, por esforzarnos, por no rendirnos a pesar de las adversidades y por culminar satisfactoriamente nuestra investigación.

**Tabla de contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	14
1. Objetivos.....	15
1.1 Objetivo general.....	15
1.2 Objetivos específicos .....	15
2. Antecedentes .....	16
3. Planteamiento del problema.....	17
4. Justificación .....	18
5. Marco geológico .....	20
5.1 Localización.....	21
5.2 Estratigrafía de la microcuenca del Río Tona.....	22
5.3 Geología estructural .....	24
6. Marco teórico .....	27
6.3 Caracterización Geoambiental .....	28
7. Metodología .....	30
8. Resultados .....	31
8.1 Caracterización ambiental de la microcuenca del Río Tona.....	31
8.1.1 Pendiente del terreno.....	31
8.1.2 Curvatura del terreno .....	32
8.1.3 Inventario de movimientos en masa .....	33
8.1.4 Subunidades geomorfológicas .....	37
8.1.4.1 Ambiente antrópico:.....	38

## SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA

	6
8.1.4.2 Ambiente fluvial .....	38
8.1.4.3 Ambiente estructural .....	39
8.1.4.4 Ambiente denudacional: .....	39
8.1.4.5 Ambiente glacial .....	40
8.1.5 Unidades geológicas superficiales (UGS) .....	40
8.2 Análisis de la susceptibilidad.....	43
8.2.1 Cálculo de la función de susceptibilidad .....	48
8.2.2 Curva de éxito y validación para la zonificación de la susceptibilidad .....	51
9 Conclusiones .....	62
10 Recomendaciones .....	64
11 Futuras tareas que se realizarán .....	65
Referencias Bibliográficas .....	67

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Localización de la microcuenca del Río Tona .....	21
Figura 2. Mapa Geológico a escala 1:25.000 de la Microcuenca del Río Tona. ....	22
Figura 3. Geología estructural de la microcuenca del Río Tona.....	24
Figura 4. Fases metodológicas .....	31
Figura 5. Mapa de pendientes de la Microcuenca del Río Tona.....	32
Figura 6. Mapa de curvaturas de la Microcuenca del Río Tona. ....	33
Figura 7. Mapa del inventario de deslizamientos y flujos no canalizado .....	35
Figura 8. Cantidad de movimientos en masa en el rango temporal 2002-2021 .....	36
Figura 9. Mapa de subunidades geomorfológicas.....	37
Figura 10. Mapa de Subunidades Geológicas Superficiales (UGS) .....	40
Figura 11. Índice de susceptibilidad a deslizamientos – LSI – Microcuenca del Río Tona .....	49
Figura 12. Curva de éxito y curva de validación del modelo .....	52
Figura 13. Curva de éxito categorizada del modelo de susceptibilidad.....	53
Figura 14. Zonificación de la susceptibilidad por deslizamientos y flujos no canalizados en la microcuenca del Río Tona .....	54

**Lista de tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Descripción de las unidades geológicas presentes en el área de estudio .....	23
Tabla 2. Estructuras geológicas en la microcuenca del Río Tona .....	25
Tabla 3. Estructuras geológicas en el área de estudio.....	26
Tabla 4. Tipos de movimientos en masa.....	27
Tabla 5. Movimientos en masa registrados en el SIMMA de la microcuenca del Río Tona. ....	34
Tabla 6. Datos recopilados de movimientos en masa .....	34
Tabla 7. Porcentajes calculados por tipo de movimiento .....	35
Tabla 8. Subunidades geomorfológicas de origen antrópico .....	38
Tabla 9. Subunidades geomorfológicas de origen fluvial.....	38
Tabla 10. Subunidades geomorfológicas de origen estructural .....	39
Tabla 11. Subunidades geomorfológicas de origen denudacional.....	39
Tabla 12. Subunidades geomorfológicas de origen glacial .....	40
Tabla 13. UGS de la Microcuenca del Río Tona .....	41
Tabla 14. Algunas características geomecánicas de las UGS, Unidades de Roca.....	42
Tabla 15. Resultados del método de Pesos de Evidencia, Pendiente del terreno .....	43
Tabla 16. Resultados del método de Pesos de Evidencia, Curvatura de Plano. ....	43
Tabla 17. Resultados del método de Pesos de Evidencia, subunidades geomorfológicas.....	45
Tabla 18. Resultados del método de Pesos de Evidencia, Unidades geológicas superficiales.....	47
Tabla 19. Descripción de los deslizamientos y flujos no canalizados en función de la división administrativa de la Microcuenca .....	56

Tabla 20. Descripción de los deslizamientos y flujos no canalizados tipo puntos en función de la división administrativa de la Microcuenca del Río Tona ..... 58

Tabla 21. Cuantificación de las categorías de susceptibilidad en la Microcuenca del Río Tona . 59

Tabla 22. Actividades propuestas para el apoyar la iniciativa de "creación de un comité rural y comunitario de Gestión del Riesgo ..... 66

**Lista de Apéndices**

**Ver apéndices adjuntos y pueden ser consultados en la base de datos de la Biblioteca UIS**

Apéndice A. Matriz de eventos históricos en la Microcuenca del Río Tona

Apéndice B. Geología Estructural

Apéndice C. Movimientos en masa

Apéndice D. Metodología

Apéndice E. Rangos de pendientes

Apéndice F. Ilustraciones Curvatura de plano

Apéndice G. Movimientos en masa identificados en campo

Apéndice H. Subunidades Geomorfológicas

Apéndice I. Unidades Geológicas Superficiales

Apéndice J. Susceptibilidad alta a nivel de veredas

Apéndice K. Susceptibilidad media a nivel de veredas

Apéndice L. Susceptibilidad baja a nivel de veredas

Apéndice M. Mapa de pendientes

Apéndice N. Mapa de curvatura de plano

Apéndice O. Mapa del inventario de deslizamientos y flujos no canalizados

Apéndice P. Mapa de procesos morfodinámicos

Apéndice Q. Mapa geológico

Apéndice R. Mapa estructuras geológicas

Apéndice S. Mapa de unidades geológicas superficiales

Apéndice T. Mapa de subunidades geomorfológicas

Apéndice U. Mapa del índice de susceptibilidad por movimientos en masa.

Apéndice V. Mapa de zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa.

Apéndice W. Inspección satelital Microcuenca del Río Tona Inventario de procesos morfodinámicos y otros.

Apéndice X. Aplicación y resultados de procedimientos.

Apéndice Y. Base de datos geoespacial.

### Resumen

**Título:** Zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa escala 1:25.000 en la Microcuenca del Río Tona, Santander

**Autor:** Andrés Felipe Guevara Joya y Joel David Ramos Martínez\*\*

**Palabras Clave:** Susceptibilidad, Zonificación, Movimientos en masa, Método estadístico Bivariado.

**Descripción:** La zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa es esencial para la gestión del riesgo en áreas vulnerables. Este estudio se enfocó en la Microcuenca del Río Tona, la cual posee una extensión de 193,6 km<sup>2</sup>. Se siguieron las pautas propuestas por el Servicio Geológico Colombiano (SGC) en la guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa a escala 1:25.000 (2017). Los resultados de la caracterización geo ambiental permitieron generar mapas de Pendiente, Curvatura, Unidades Geológicas Superficiales (UGS) y Subunidades Geomorfológicas, así como un inventario de 1.571 movimientos en masa realizado mediante el análisis multitemporal de imágenes satelitales, donde los deslizamientos representan el 87,6% del total de movimientos, seguidos por los movimientos tipo flujo no canalizado (11,3%) y caída de roca (1,1%). Además, se identificaron 48 tipos de subunidades geomorfológicas, principalmente de origen estructural, y 30 unidades geológicas superficiales. Al combinar estos factores mediante el método estadístico bivariado (WofE) se establecieron categorías de susceptibilidad a deslizamientos y flujos no canalizados, Alta (32%), Media (52%) y Baja (16%). Los resultados indican que las zonas más críticas se encuentran en el sector occidental de la microcuenca, en las inmediaciones de la represa del Río Tona y las veredas Arnanía, Babilonia, Vegas, Gualilo Bajo, Monserrate, Retiro Chiquito, Retiro Grande, donde se identificaron las mayores concentraciones de movimientos en masa.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Geología. Directora: Kelly Patricia Sandoval Rincón. Geóloga Magíster en Planificación y Gestión de riesgos naturales. Codirector: Jorge Leonardo Chaparro Cordón. MsC. Geólogo.

**Abstract**

**Title:** Zoning of susceptibility to mass movements at a scale of 1:25.000 in the Tona River Micro-basin, Santander\*

**Author(s):** Andres Felipe Guevara Joya y Joel David Ramos Martínez\*\*

**Key Words:** Susceptibility, Zoning, Mass Movements, Bivariate Statistical Method

**Description:** The zoning of susceptibility to mass movements is essential for risk management in vulnerable areas. This study focused on the Río Tona micro-basin, which covers an area of 193,6 km<sup>2</sup>. The guidelines proposed by the Colombian Geological Service (SGC) in the methodological guide for zoning of hazard due to mass movements at a scale of 1:25.000 (2017) were followed. The results of the geo-environmental characterization allowed for the creation of maps of the Surface Geological Units (SGU) and Geomorphological Subunits (GS), as well as an inventory of 1.571 mass movements, which were found through remote multitemporal satellite image analysis. Landslides represented 87,6% of the total movements, followed by non-channelized flow movements (11,3%) and rockfalls (1,1%). Additionally, forty-eight types of geomorphological subunits were found, most of structural origin, and thirty Surface Geological Units (SGU). By combining these factors using the bivariate statistical method (WofE), Categories of susceptibility to landslides and non-channelized flows were set up, such as High (32%), Medium (52%), and Low (16%). The results show that the most critical zones are in the western sector of the micro-basin, near the Río Tona dam, and the villages of Armania, Babilonia, Vegas, Gualilo Bajo, Monserrate, Retiro Chiquito, Retiro Grande, where the highest concentrations of mass movements were found.

---

\* Degree Work

\*\* Faculty of Physical-Chemical Engineering. School of Geology. Geology. Director: Kelly Patricia Sandoval Rincon. Geologist master in planning and management of Natural Risks. Co-Director: Jorge Leonardo Chaparro Cordon. Geologist.

## **Introducción**

La microcuenca del Río Tona, ubicada en el departamento de Santander, es una zona con gran diversidad de recursos naturales y de importante actividad económica. Sin embargo, esta región presenta una alta susceptibilidad a los movimientos en masa debido a su complejidad geológica, topográfica y sus condiciones climáticas.

La ocurrencia de eventos de movimientos en masa en la microcuenca del Río Tona ha tenido impactos significativos en las comunidades locales, la infraestructura y los recursos naturales de la región. Por lo tanto, es fundamental contar con información detallada y actualizada sobre la susceptibilidad a estos eventos, a fin de identificar y priorizar áreas de riesgo, y establecer medidas de prevención y mitigación.

En este contexto, este trabajo tiene como objetivo principal realizar un mapa a escala 1:25.000 de la susceptibilidad por movimientos en masa en la microcuenca del Río Tona. Para lograr este propósito, se llevará a cabo un estudio detallado que integrará información geológica, geomorfológica, topográfica, entre otras variables relevantes.

La zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa permitirá generar información valiosa para la toma de decisiones en cuanto a la planificación territorial, la gestión del riesgo y la inversión pública y privada en la región. Además, contribuirá a la protección y conservación de los recursos naturales, y a la reducción del impacto que puedan ocasionar estos fenómenos naturales.

## **1. Objetivos**

### **1.1. Objetivo general**

Elaborar el mapa de susceptibilidad por movimientos en masa a escala 1:25.000 en la microcuenca del Río Tona, aplicando la metodología propuesta por el Servicio Geológico Colombiano (SGC) para la zonificación de amenaza por movimientos en masa del 2017, mediante el uso de las Tecnologías de la Información Geoespacial.

### **1.2. Objetivos específicos**

Construir un inventario detallado de los procesos morfodinámicos que tienen lugar en la microcuenca del Río Tona.

Realizar la cartografía de subunidades geomorfológicas (SGMF) y unidades geológicas superficiales (UGS) a escala 1:25.000, aplicando la clasificación sugerida por el SGC y utilizando herramientas de fotointerpretación basadas en teledetección y SIG.

Estimar la susceptibilidad relativa a los movimientos en masa más comunes de la microcuenca (deslizamientos y flujos no canalizados) mediante el método estadístico bivariado.

Comparar los resultados obtenidos mediante el método estadístico bivariado con otros estudios de susceptibilidad realizados en la microcuenca a escala 1:25.000

## 2. Antecedentes

En la actualidad, existen varias entidades en Colombia que se dedican a la evaluación de la susceptibilidad y la amenaza por movimientos en masa, como el Servicio Geológico Colombiano, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD). Estas entidades han desarrollado metodologías y herramientas para la evaluación del riesgo geológico y para la prevención y mitigación de los desastres naturales a diferentes escalas.

Algunos de los estudios realizados en la zona son: 1) Análisis y determinación de la Amenaza de inestabilidad de los taludes, generado por su saturación y desembalse, en el proyecto de regulación del Río Tona- Embalse De Bucaramanga, el cual tuvo un enfoque desde la ingeniería civil a escala muy detallada y basado en simulaciones (Prada & Serrano, 2009). 2) Plan municipal para la gestión del riesgo de desastre, Tona, para el cual elaboraron un Mapa de amenaza por fenómenos de remoción en masa, con metodologías heurísticas y sin escala de trabajo definida (CMGRD, 2013). 3) Evaluación de la amenaza relativa por movimientos en masa a escala 1:100.000 desarrollada por el SGC (2015). 4) Componente de gestión del riesgo del POMCA Alto Lebrija, donde se aplicó un método estadístico para estimar la susceptibilidad y la amenaza por movimientos en masa a escala 1:25.000 (CDMB, 2014) y 5) Diagnóstico de la falla presentada en el talud localizado en el km22 sobre la vía Bucaramanga-Tona, sector vereda Caragua Bajo Finca del Porvenir, Departamento de Santander, el cual tuvo un enfoque desde la ingeniería civil a escala muy detallada y basado en simulaciones (Nieto y Díaz, 2016).

### 3. Planteamiento del problema

Los movimientos en masa son eventos naturales que se pueden asociar a procesos que modelan la superficie terrestre e involucran la interacción sistémica y abierta de los componentes de la litosfera, la hidrosfera, la biosfera y la atmósfera, los cuales han dejado un amplio registro de afectaciones en el mundo, cobrando vital importancia al aumentar los elementos expuestos al riesgo, resultado del crecimiento poblacional y la expansión urbana en regiones susceptibles a su ocurrencia, configurando problemas no resueltos del desarrollo.

Es ampliamente conocido que Colombia presenta unas características geográficas, hidroclimatológicas y geológicas que propician la generación de dichas amenazas, de acuerdo con las cifras de la UNGRD (2020), en los últimos 100 años se registraron más de 11.800 eventos asociados a movimientos en masa (MM), cerca de 7.590 personas perdieron la vida y aproximadamente 239.740 familias se vieron afectadas. De igual forma, el Servicio Geológico Colombiano (SGC), como entidad encargada en el país de realizar investigación, seguimiento y monitoreo de amenazas geológicas, en su Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA, 2022) presenta un catálogo histórico nacional (1492 – 2022) de 28.181 MM, que le arrebataron la vida a 30.809 personas, mientras que 528 se reportaron como desaparecidas, 9.128 resultaron heridas, 1.296.179 fueron afectadas y un total de 62.542 familias resultaron damnificadas, esto ocasionó pérdidas monetarias por los daños ambientales, en la infraestructura y las actividades económicas, estimadas en \$1.217.072.372 dólares (USD).

En relación con la problemática expuesta, a nivel regional para la UNGRD (2020) el departamento de Santander ocupa el sexto lugar en Colombia en cuanto a registro de movimientos en masa se refiere, con 785 eventos, mientras que en el catálogo histórico del SGC (1939 - 2022)

presenta 1.052 incidentes (puesto 10), con 231 muertos (puesto 8), 8 desaparecidos, 135 heridos, 67.191 personas afectadas (puesto 6) y 1.285 familias damnificadas (SIMMA, 2022).

Por último, pese a la problemática generalizada en el área de estudio, el SIMMA (2022) en su inventario y catálogo de MM, registra tan solo 24 eventos, 6 de los cuales ocurrieron entre la década de los 50's y los 90's, mientras que los 18 restantes tuvieron lugar desde 2008 hasta 2021, con un incremento significativo en su frecuencia durante el 2010, 2011 y 2012 con 3, 3 y 5 movimientos respectivamente, que se correlacionan con la intensa ola invernal que desató el fenómeno de La Niña durante esos años.

A pesar de que esta región ha sido objeto de múltiples estudios geológicos y geotécnicos, no se cuenta con una zonificación detallada que permita identificar las áreas de mayor riesgo ante eventos de movimientos en masa, la falta de información específica sobre las zonas de susceptibilidad por movimientos en masa en la microcuenca implica un riesgo constante para las comunidades locales, la infraestructura y los recursos naturales.

#### **4. Justificación**

Las reflexiones en torno al problema demuestran la imperante necesidad de actualizar y ampliar el conocimiento científico de este, por lo que se considera relevante realizar una zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa a escala 1:25.000 aplicando la metodología del SGC (2017).

La información base para desarrollar este trabajo es la caracterización ambiental o variables condicionantes de movimientos en masa en el terreno, tales como: geología, geomorfología, inventario de procesos morfodinámicos, entre otros.

Estos resultados podrán ser insumos claves en la toma de decisiones públicas en temas relacionados con la caracterización, mitigación y prevención del riesgo, logrando aportar a la materialización y defensa de los derechos humanos fundamentales, tales como: el derecho a un ambiente sano, a la vida, a la educación, al trabajo y a la seguridad alimentaria, etc., que en situaciones relacionadas con estos fenómenos se han visto seriamente afectados y/o obstaculizados en la zona de estudio. (Ver Apéndice A. Matriz de eventos históricos)

Además, una de las ventajas de este enfoque metodológico es la cuenca hidrográfica como área de estudio, ya que representa un espacio donde las interacciones e interrelaciones de los individuos con sus pares y con el medio natural ocurren de forma más estrecha y tangible que en cualquier otro ámbito de ordenamiento existente.

La zonificación de la susceptibilidad es el primer paso para la zonificación de la amenaza y el estudio integral del riesgo en áreas rurales. La microcuenca del Río Tona posee una extensión territorial de 193,6 Km<sup>2</sup>, en la cual se encuentra ubicada la cabecera Municipal y 11 de las 19 veredas que conforman el municipio. Aunado a que la población de Tona, de acuerdo con el DANE (2018), es de aproximadamente 7.373 habitantes, de los cuales 6.835 se distribuyen en los centros poblados y rural disperso y 538 en la cabecera municipal.

También, cabe resaltar que, a pesar de los trabajos adelantados a nivel municipal enfocados en la gestión del riesgo: Esquema de Ordenamiento Municipal del 2002, Plan de Ordenamiento y Manejo Ambiental de la Microcuenca del Río Tona del 2005, Plan Municipal para la Gestión del Riesgo de Desastres (PMGRD) del 2013 y el Plan de Desarrollo 2020 – 2023, sólo existen resultados cartográficos en el PMGRD a través de un mapa de “Susceptibilidad a fenómenos de remoción en masa y erosión” sin escala definida y basado en métodos heurísticos, hasta el momento no se han abordado detalladamente aspectos claves para el entendimiento y la

representación cartográfica de las condiciones de susceptibilidad por movimientos en masa en la microcuenca a partir de metodologías estadísticas basadas en evidencia y principios de replicabilidad, posibilidad de validación de resultados y unificación internacional de la nomenclatura.

Por otra parte, los trabajos regionales tales como el Plan de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca Hidrográfica (POMCA) del río Alto Lebrija y los productos cartográficos del Servicio Geológico Colombiano para la Zonificación de la Susceptibilidad y la Zonificación de la Amenaza relativa por movimientos en Masa a escala 1:25.000 y 1:100.000 respectivamente, han sido aportes importantes para la comprensión de estos fenómenos naturales, sin embargo, la utilización del método estadístico bivariado pesos de evidencia presenta una novedad metodológica.

Por último, en la microcuenca se llevó a cabo el Proyecto Estratégico para la Regulación del Río Tona y la construcción del Embalse de Bucaramanga, que tiene como fin generar un potencial de almacenamiento de aproximadamente 17.029 millones de metros cúbicos de agua para garantizar el suministro del área Metropolitana de Bucaramanga durante los próximos 35 años (CRCIS, 2018), en este sentido, se ha evidenciado que los movimientos en masa pueden aportar material rocoso al cauce del río Tona -afluente principal de la microcuenca- que posteriormente son canalizados, ocasionando represamientos y avenidas torrenciales.

Por lo tanto, contribuir al conocimiento de dicha problemática puede llegar a tener una trascendencia social enorme.

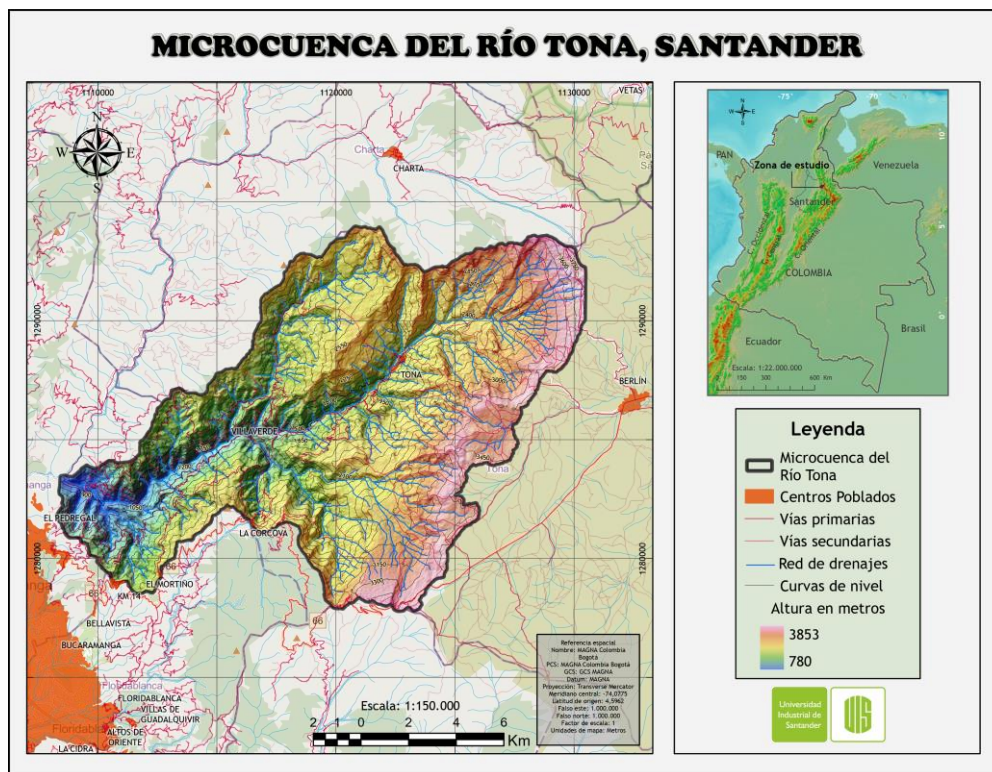
## **5. Marco geológico**

### 5.1. Localización

La microcuenca del Río Tona se encuentra ubicada al Nororiente de la cuenca superior del Río Lebrija, en la provincia de Soto Norte, Santander, posee una extensión territorial de 193,6 km<sup>2</sup>, de los cuales el 91% (174,11 km<sup>2</sup>) son de la jurisdicción del Municipio de Tona y el 9% restante pertenecen a Bucaramanga. Limita al norte con el municipio de Charta y Vetas, al este con el altiplano del Páramo de Berlín, al oeste con la microcuenca del río Surata Bajo y al Sur con el área metropolitana de Bucaramanga. A su vez, la zona de estudio se encuentra contenida en las planchas 109 – Rionegro, 110 – Pamplona, 120 – Bucaramanga y 121 – Cerrito, del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 2005).

#### Figura 1.

*Localización de la microcuenca del Río Tona*



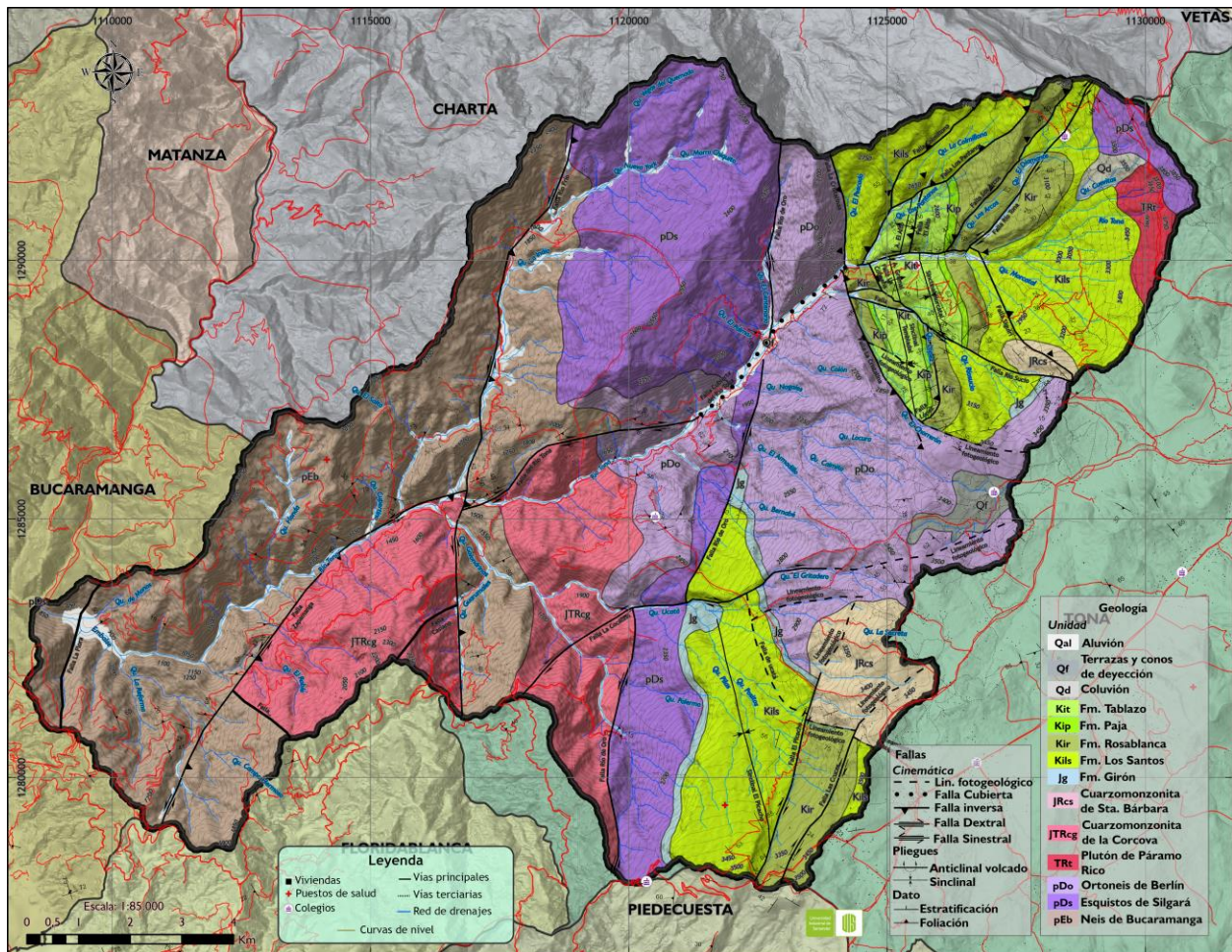
*Nota.* Creado a partir de datos abiertos DANE – IGAC

### 5.2. Estratigrafía de la microcuenca del Río Tona

La Geología Regional consiste en rocas metamórficas, ígneas y sedimentarias con edades que varían desde el Precámbrico hasta el Holoceno pertenecientes al sistema geológico del Macizo de Santander (CDMB, 2020).

**Figura 2.**

*Mapa Geológico a escala 1:25.000 de la Microcuenca del Río Tona.*




*Nota.* Realizado a partir de la información de las fuentes: Osorio & Salazar (2006), Ulloa & Gómez (2007), Bejarano & Navas (2018) e interpretación geomorfológica.

**Tabla 1.**

*Descripción de las unidades geológicas presentes en el área de estudio*

Era	Periodo	Unidad Litológica	Descripción	Autor	
Cenozoico	Cuaternario	Qal	Depósitos Aluviales	Depósitos no consolidados de aluvi6n, fluviales	Royero & Clavijo (2001)
		Qf	Terrazas y conos de deyecci6n	Dep6sitos no consolidados aluviales en abanicos y terrazas	
		Qd	Coluvi6n	Dep6sitos no consolidados de coluvi6n, derrubios, glaciares, fluvioglaciares	
Mesozoico	Cret6cico Inferior	Kit	Formaci6n Tablazo	Calizas grises a negras, fosilíferas, localmente glauconíticas y arcillosas de color negro, con niveles intercalados de arcillolitas grises a gris azulado, calcáreas, fosilíferas.	Royero & Clavijo (2001)
		Kip	Formaci6n Paja	Lutitas y shales gris oscuros a azulosos, fosilíferos, con intercalaciones de areniscas gris amarillentas, de grano fino, localmente arenosos, calcáeos, fosilíferos, de ambiente epicontinental.	Royero & Clavijo (2001)
		Kir	Formaci6n Rosablanca	Está compuesta en su parte inferior por capas de caliza y yeso; hacia la parte superior consta de areniscas y lodolitas calcáreas. En la parte inferior presenta dep6sitos evaporíticos como que indican una hipersalinidad y tranquilidad en las condiciones de deposici6n; el resto de la secuencia se deposit6 en un medio marino somero en condiciones neríticas	Royero & Clavijo (2001)
		Kils	Formaci6n Los Santos (Tambor)	Areniscas conglomeráticas, lodolitas rojo-grisáceas y cuarzoareniscas gris amarillentas, con estratificaci6n cruzada, en capas tabulares de espesores variables, estas facies han sido interpretadas como dep6sitos fluviales acumulados por corrientes trenzadas.	Royero & Clavijo (2001)
	Jurásico Superior	Jg	Formaci6n Gir6n	Areniscas conglomeráticas y conglomerados, de color gris amarillento a pardo rojizo, masivos y lenticulares y limolita parda rojiza, estratificaci6n cruzada, en capas gruesas, con interstratificaciones de limolitas y lodolitas, de color rojo violeta, grisáceo y algunos niveles delgados de conglomerados. El ambiente de sedimentaci6n es continental, fluvial a lacustre fluviátil	Royero & Clavijo (2001)
	Jurásico inferior	JRcs	Cuarzo-monzonita Santa Barbara	La cuarzomonzonita varia de color rosado, naranja a gris violáceo, es equigranular, compuesta por feldespato potásico, plagioclasa, cuarzo y biotita, localmente hornblenda.	Hincapié & Veloza (2009)
		JTRcg	Cuarzo-monzonita la Corcova	Cuarzomonzonita gris, Granodiorita y Diorita, se caracteriza por ser una roca equigranular, de grano fino a medio, de textura sacaroides, con biotita uniformemente diseminada de color gris.	Royero & Clavijo (2001)

	TRt	Plutón de Paramo Rico	Es un cuerpo intrusivo tonalítico de color gris, muestra una composición intermedia, con textura porfirítica y tamaño de grano medio a grueso.	Hincapié & Veloza (2009)
	pDo	Ortoneis de Berlín	Neises cuarzo-feldespáticos que composicionalmente varían entre tonalita y granodiorita, en los cuales se presentan lentes de anfibolita; corresponden a rocas de medio y alto grado de metamorfismo, todas estas rocas están relacionadas con un magma que se sometió a cristalización fraccionada y el cuerpo ortoneisico tiene naturaleza calcoalcalina, peralumina	Ward <i>et al</i> (1973), Jiménez (2016)
	pDs	Esquistos del Silgará	Filitas, esquistos y cuarcitas; con una pequeña cantidad de meta volcánicos. Se tiene una secuencia típica de un gradiente barroviense, comprende cuerpos de esquistos, filitas, metalodolitas, metareniscas, y algunos mármoles.	Ward <i>et al</i> (1973), García & Ríos (1999)
	pEb	Neis de Bucaramanga	Esquistos, neis y migmatitas producto de metamorfismo de alto grado y en ocasiones con abundantes masas pequeñas de ortogneis. El neis aflora en tres grandes fajas como una sucesión de neises pelíticos y semipelíticos intercalados con capas delgadas de roca calcosilicatadas, mármoles, neis hornblendico y anfibolita.	Ward <i>et al</i> (1973), Ureña y Zuluaga (2011)

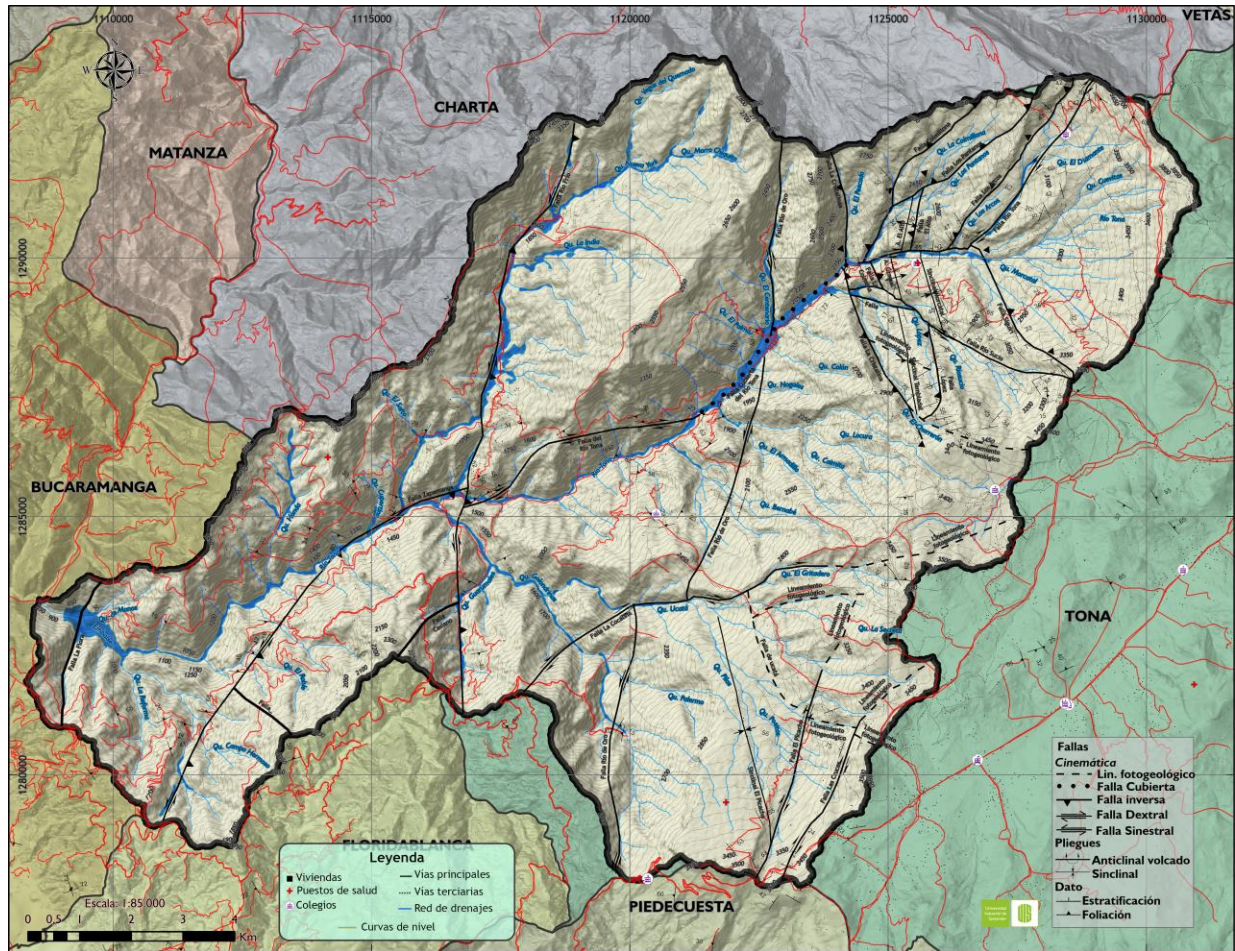
Nota. Creado a partir de la literatura de referencia.

### 5.3. Geología estructural

Como se puede observar en la figura 3, la geología estructural de la Microcuenca del Río Tona es compleja, los esfuerzos tectonicos han deformado las diferentes unidades rocosas presentes en la microcuenca generando pliegues, fallamientos, cabalgamientos y diaclasas a lo largo de su historia geológica, esto se debe a que la zona esta directamente influenciada por la actividad tectónica del levantamiento del Macizo de Santander y por lo tanto de la formación de la cordillera oriental. La zona comprende fallas verticales, inversas, normales, de cabalgamiento, esfuerzos compresivos en la cobertera sedimentaria generando estructuras a diferentes escalas como sinclinales y anticlinales (Osorio & Salazar, 2006).

#### Figura 3.

Geología estructural de la microcuenca del Río Tona



Nota. Para más información ver el Apéndice B que contiene la descripción de estructuras principales y material fotográfico.

**Tabla 2.**

*Estructuras geológicas en la microcuenca del Río Tona*

Nombre	Geometría	Plano axial	Formaciones	Nota	Extensión
Anticlinal El Alto	Asimétrico apretado	Inclinado hacia el W - volcado hacia el E con capas invertidas	Tablazo	Producto de la propagación de la Falla El Alto - presenta pliegues parásitos en capas	1,12 km
Anticlinal El Gramal	Volcado apretado	Vergencia hacia el W siguiendo el desplazamiento del bloque sur de la Falla Río Tona	Superficialmente: Tablazo. En Profundidad: Rosablanca y Paja	Formado por la Falla La Colmena	0,93 km
Sinclinal Morcatal	Flancos abiertos	S.I	Los Santos, Rosablanca, Paja y Tablazo.	Limitado al N por la F. Río Tona. Segmentada al S por la F. Río Sucio y Limitada al E por la F. Siquiri	1,73 km
Sinclinal Tembladal	Suave	S.I	Los Santos, Rosablanca, Paja y Tablazo.	Estructura segmentada y cortada al norte por la F. Río Sucio	2,14 km
Sinclinal El Picacho	Simétrico, con una apertura suave	Vertical, con ligero cabeceo hacia al NW	Girón y Los Santos	Cortado por la F. El Picacho	4,54 km

Nota. Creación propia a partir de Osorio & Salazar (2006), Ulloa & Gómez (2007) y Bejarano & Navas (2018)

**Tabla 3.**

*Estructuras geológicas en el área de estudio*

Nombre	Cinemática	Orientación	Inclinación	Afecta	Extensión	Nota
Falla Río de Oro	Sinistral con leve componente inverso	NNE-SSW	hacia el W con vergencia al E	Pone en contacto a los E. de Silgará con: O. de Berlín - Fm. Girón y Los Santos y - C. de la Corcova	14 km	Está cortada dextralmente por la F. Río Tona - Controla el cauce del Río de Oro y es paralela a la Falla Río Frío.
Falla Río Tona	Rumbo dextral con componente vertical	NE	X	Deforma las unidades sedimentarias cretácicas	15,8 km	Corta a las fallas Río de Oro y La Cristalina - Controla el cauce del Río Tona y las Q. El Diamante y Los Arcos
Falla Colmillona	Inversa	NE-SW	Bajo ángulo hacia el NW	Pone en contacto a la Fm. Los Santos con Tablazo. Duplica la secuencia de la Fm. Los Santos	4,12 km	Hace parte del sistema imbricado de fallas de cabalgamiento
Falla Pantanos	Inversa	NE-SW	Bajo ángulo hacia el NW	Pone en contacto a la Fm. Los Santos, Rosablanca, Paja y Tablazo.	3,54 km	Se desprende de la F. Colmillona y cabalga perpendicularmente sobre el A. El Alto
Falla El Alto	Inversa	NE-SW	baja inclinación hacia el W con desplazamiento hacia el W	Duplica el espesor de la Fm. Tablazo	1,3 km	Controla el A. El Alto
Falla Río Frío	Inversa con componente sinistral	NW	El bloque E está levantado	Pone en contacto al Neis de Bucaramanga con la Cuarzomonzonita de la Corcova	12 km	Controla el cauce del Río Frío
Falla Zapamanga	Inversa	E-W	120° de azimut	Pone en contacto al Neis de Bucaramanga con la Cuarzomonzonita de la Corcova	9 km	El bloque SE está levantado sobre el bloque NW
Falla Siquirí	Con componente inversa	NW - SE	50° hacia el este	Fm Los Santos - Basamento cristalino	3,44 km	Genera el flanco E del S. Morcatal
Falla La Colmena	Inversa	NNW - SSE	hacia el E y vergencia hacia el W	Coloca a la Fm. Tablazo sobre Rosablanca	0,58 km	Se desprende de la Falla Río Sucio - Genera el A. El Gramal y el flanco W del S. Morcatal
Falla Río sucio	De rumbo sinistral con movimiento en la vertical de tipo inverso	NW - SE	60° al E	Pone en contacto a la Fm. Los Santos - Tablazo	4,9 km	Controla el cauce de la quebrada Río Sucio
Falla López	Normal - Buza aprox. 40° NW	N-S	Baja inclinación hacia el W	Pone en contacto a la Fm. Paja - Tablazo	2 km	Se genera por al flexura del S. Tembladal - Afecta a las capas de la Fm. Rosablanca
Falla La Cocalina	Rumbo dextral	E-W	X	Afecta a la Fm. Girón y Los Santos	6,6 km	Al W desplaza a la Falla Río de Oro - Controla el cauce de la quebrada Pescadero
Falla Ucatá	Sin información	NW - SE	X	Al N separa las unidades sedimentarias de la Cuarzomonzonita de Santa Bárbara	2,77 km	Separa las unidades del S. El Picacho de la Cuarzomonzonita
Falla El Picacho	Rumbo dextral con componente inverso	NE-SW	Ligero Buzamiento hacia el W	Al N pone en contacto a la Fm. Los Santos sobre Rosablanca - Al S pone en contacto unidades metamórficas con cuerpos intrusivos del Jurásico	4,10 km	Hacia el Alto del Picacho se distingue un desplazamiento dextral en las unidades sedimentarias
Falla Las Cruces	Dextral Inversa	NE-SW	Hacia el E	Al N corta a la Fm. Rosablanca y desplaza dextralmente las unidades del escarpe del Picacho	3,46 km	Se desprende de la Falla Sevilla y forma una estructura en flor positiva

*Nota.* Creación propia a partir de Osorio & Salazar (2006), Ulloa & Gómez (2007) y Bejarano & Navas (2018)

## 6. Marco teórico

### 6.1. Movimientos en masa

En esta investigación se adopta la definición de la guía del PMA: GCA y el SGC, en concordancia con Sharpe (1938, citado en Alcántara, 2000) Terzaghi (1950), Varnes (1958) y Cruden (1991) los cuales incluye todos aquellos movimientos ladera abajo de una masa de roca, de detritos o de tierras por efecto de la gravedad.

### 6.2. Generalidades sobre los sistemas de Clasificación de los movimientos en masa:

De acuerdo con Cruden y Varnes (1958, 1978) los criterios básicos de clasificación son 1) el tipo de movimiento y 2) el tipo de material, dividiendo los movimientos en cinco tipos: caídas, vuelcos, deslizamientos, propagaciones y flujos, y a los materiales en dos clases: rocas y suelos, que a su vez se subdividen en detritos y tierras. Esta clasificación presenta varias posibles combinaciones de tipo de movimiento y material.

#### Tabla 4.

*Tipos de movimientos en masa.*

Tipo	Subtipo
Caídas	Caída de roca (detritos o suelo)
Volcamientos	Volcamiento de roca (bloque) Volcamiento flexural de roca o del macizo rocoso
Deslizamientos de roca o suelo	Deslizamiento traslacional o en cuña Deslizamiento rotacional
Propagación lateral	Propagación lateral lenta Propagación lateral rápida (por licuación)
Flujos	Flujo de detritos Crecida de detritos Flujo de lodo Flujo de tierra Flujo de turba Avalancha de detritos Avalancha de rocas Deslizamiento por flujo o por licuación

*Nota.* Tomado y modificado de PMA: GCA, 2007 (p. 32)

El Apéndice C amplía la información sobre movimientos en masa, tipos, definiciones y modelos esquemáticos.

### **6.3. Caracterización Geoambiental**

Las características geoambientales, también llamadas variables condicionantes permiten establecer la relación entre diferentes factores del terreo y la ocurrencia de movimientos en masa (SGC, 2017). En general, se pueden dividir en variables continuas que pueden expresarse numéricamente y son susceptibles de medirse; y variables discretas o categóricas, que expresan una cualidad, característica o atributo, que solo permite clasificar en rangos o categorías. (Ariztizábal *et al*, 2019)

Implica la recopilación de un inventario de procesos morfodinámicos (evidencias de mm) y la cartografía de los factores del terreno como pendiente, curvatura de plano, subunidades geomorfológicas y unidades geológicas superficiales. La relación de causalidad entre la ocurrencia de movimientos en masa y los factores condicionantes depende de las particularidades de la zona de estudio.

### **6.4. Susceptibilidad por movimientos en masa:**

Un mapa de susceptibilidad contiene información sobre los tipos de movimientos en masa, áreas más probables para su ocurrencia e incluso áreas posiblemente afectadas y por lo general divide el territorio en áreas homogéneas según el grado de susceptibilidad: en alta, media y baja (SGC, 2017). La guía metodológica a escala 1:25.000 del SGC indica que para el análisis de susceptibilidad por deslizamientos y flujos no canalizados se recomienda la aplicación del método estadístico bivariado WoE (pesos de evidencia).

**6.5. Método estadístico bivariado WoE (Weight of evidence):**

Es una técnica utilizada en análisis de datos para evaluar la relación entre dos variables categóricas. El objetivo principal de este método es determinar la fuerza de la asociación entre dos variables y cómo afecta una a la otra. Ariztizábal et al (2019) afirman que:

El método estadístico bivariado denominado WoE está basado en la teoría de la probabilidad bayesiana, donde se analiza la relación entre dos sucesos. Para el caso de los movimientos en masa, se evalúa la relación de las áreas afectadas por los movimientos en masa y la distribución espacial de los factores condicionantes del terreno. Este método está fundamentalmente basado en calcular los pesos de las clases que conforman las variables condicionantes. Dicho peso indica la presencia e influencia de la clase como parámetro en la ocurrencia del movimiento en masa (p. 44).

En términos generales estos pesos son una medida de correlación entre los factores condicionantes y la ocurrencia de movimientos en masa, así un peso positivo indica que la presencia del condicionante contribuye a la presencia del movimiento y su magnitud es directamente proporcional con su grado de correlación. Sin embargo, la interpretación espacial o el mapa resultante de este método requiere del criterio experto y de campo para evitar sesgos conceptuales causados por la sensibilidad a los errores de mapeo y la unidad de análisis del terreno, mediante la ponderación manual de los pesos de algunas clases que conforman las variables condicionantes utilizadas para calcular la función final de susceptibilidad – LSI.

La fórmula para calcular los pesos de evidencia requiere que la información esté en formato ráster y es la siguiente:

<p><i>Peso positivo</i></p> $W_i^+ = \ln \left( \frac{\frac{Npix_1}{Npix_1 + Npix_2}}{\frac{Npix_3}{Npix_3 + Npix_4}} \right)$	<p><i>Peso Negativo</i></p> $W_i^- = \ln \left( \frac{\frac{Npix_2}{Npix_1 + Npix_2}}{\frac{Npix_4}{Npix_3 + Npix_4}} \right)$	<p><i>Donde:</i></p> <p><math>Npix_1</math> = # de pixeles con presencia del factor condicionante y de deslizamientos  <math>Npix_2</math> = # de pixeles con ausencia del factor condicionante y presencia de deslizamientos  <math>Npix_3</math> = # de pixeles con presencia del factor condicionante y ausencia de deslizamientos  <math>Npix_4</math> = # de pixeles con ausencia del factor condicionante y de deslizamientos                      y:</p> <p><math>W_i^+ &gt; 0</math>, indica que la presencia del factor contribuye a la presencia del deslizamiento.  <math>W_i^+ &lt; 0</math>, indica que la presencia del factor contribuye a la ausencia del deslizamiento.  <math>W_i^- &gt; 0</math>, indica que la ausencia del factor contribuye a la presencia del deslizamiento.  <math>W_i^- &lt; 0</math>, indica que la ausencia del factor contribuye a la ausencia del deslizamiento.  <math>W_i^{+-} = 0</math> indica que el factor no es relevante</p>
<p><i>Peso final</i></p> $W_f = W_i^+ - W_i^-$		
<p><math>W_f = 0</math>, indica que los mm son independientes del factor  <math>W_f &gt; 0</math>, indica una asociación positiva  <math>W_f &lt; 0</math>, indica una asociación negativa</p>		

Seguidamente, se debe aplicar la función final de susceptibilidad o LSI, la cual corresponde a la suma de los pesos finales calculados para cada clase de los factores condicionantes, como se muestra a continuación:

$$LSI = W_{fclases}Pendiente + W_{fclases}Curvatura + W_{fclases}UGS + W_{fclases}GMF$$

El LSI representa la probabilidad espacial de ocurrencia de los deslizamientos e indica las zonas menos y más susceptibles. Además, permite inferir – mediante la combinación de los factores analizados- las causas espaciales por las que ocurren en el área de estudio estos fenómenos, proponiendo hipótesis de falla.

## 7. Metodología

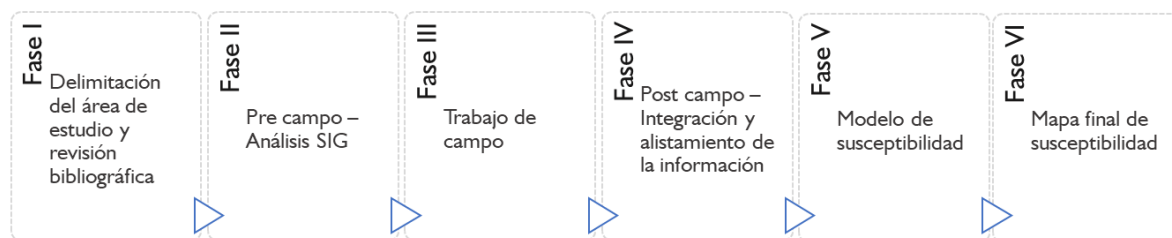
En la literatura internacional existen gran variedad de métodos y enfoques metodológicos a diferentes escalas de trabajo para el abordaje de los temas relacionados con el estudio, la gestión de riesgos naturales y la prevención de desastres.

Como se ha mencionado, se empleó la “Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa a escala 1:25.000” publicada en el año 2017 por el SGC, la cual se adapta a los requerimientos presentados por la normatividad de ordenamiento territorial y gestión del

riesgo (Ley 1523 de 2012, Decretos 1807 de 2014, 1077 de 2015, etc.) y es congruente con otras herramientas de planificación y/o políticas de gestión (POMCAS, POT, etc.).

#### Figura 4.

##### *Fases metodológicas*



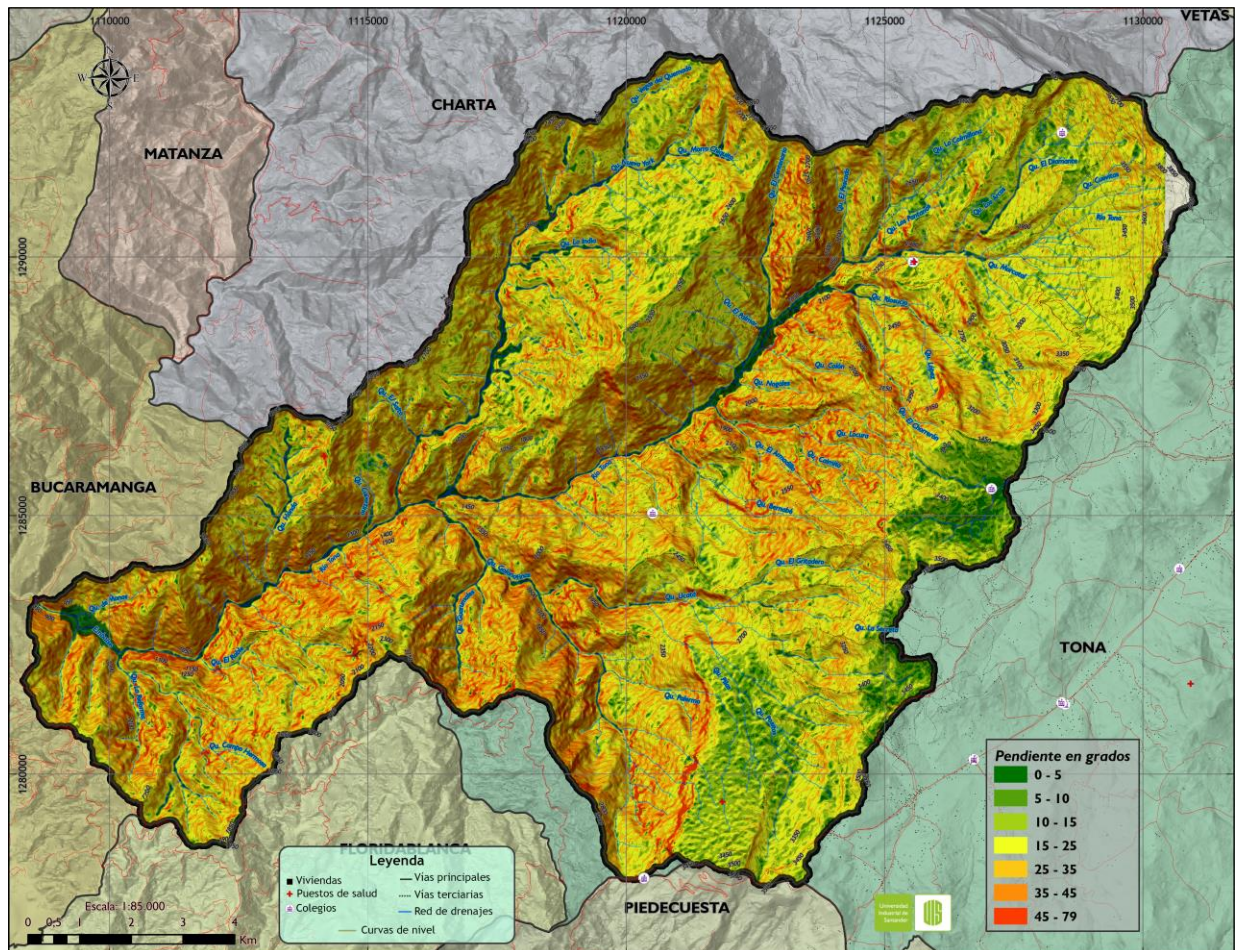
*Nota.* las fases metodológicas se detallan en el Apéndice D.

## 8. Resultados

### 8.1. Caracterización ambiental de la microcuenca del Río Tona

#### 8.1.1. *Pendiente del terreno.*

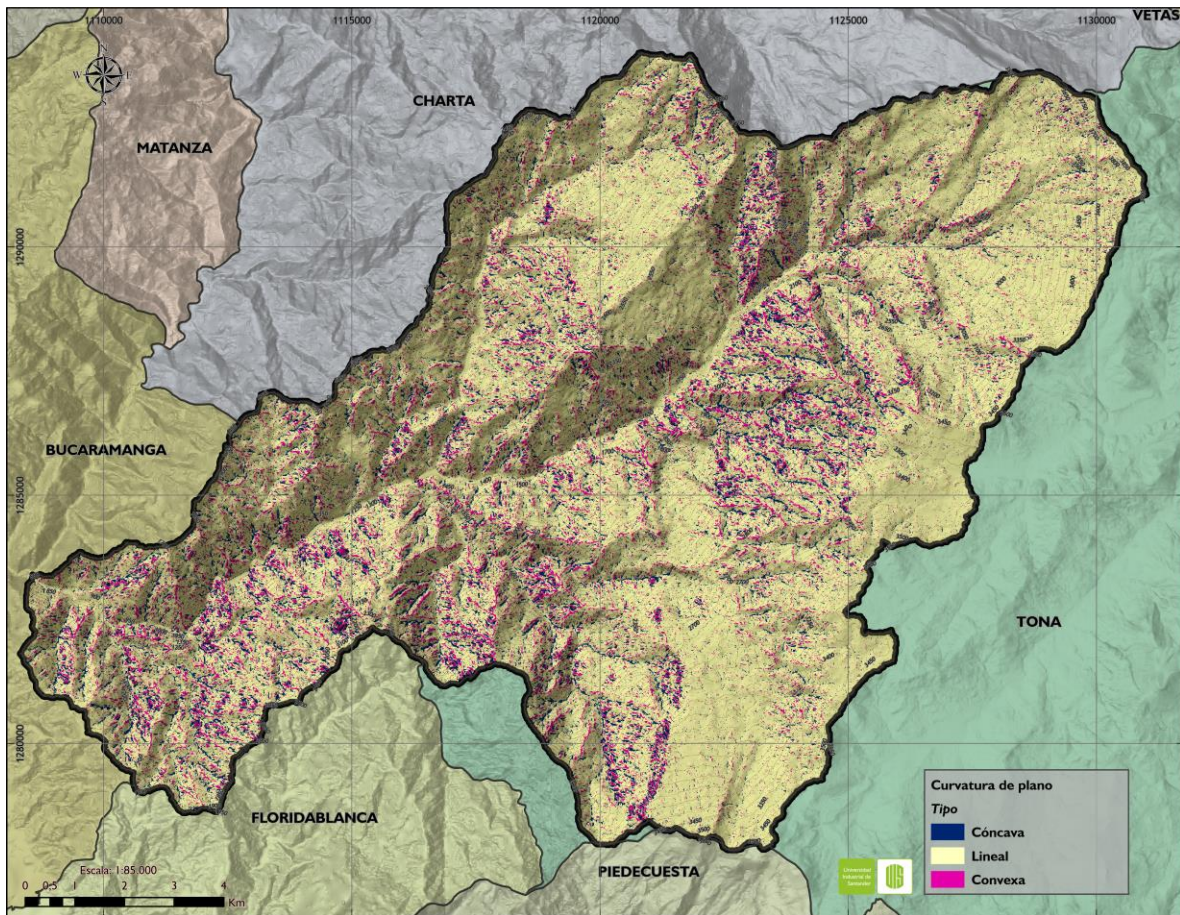
La pendiente se define como el ángulo existente entre la superficie del terreno y la horizontal, su valor se expresa en grados de 0 a 90°. Los rangos de pendiente utilizados en esta investigación (Ver Apéndice E.) presentan valores diferentes a los propuestos por el SGC (2017) y se definieron a partir de las características propias de la microcuenca:

**Figura 5.***Mapa de pendientes de la Microcuenca del Río Tona***8.1.2. Curvatura del terreno**

Esta variable indica la forma de las laderas y permite determinar el grado de convexidad (+), concavidad (-) y linealidad (0) a partir del radio de curvatura de una celda según un plano vertical. El SGC sugiere la utilización de la curvatura de plano la cual es perpendicular a la dirección de máxima pendiente e indica la convergencia y divergencia del flujo en la superficie (Ver Apéndice F).

**Figura 6.**

*Mapa de curvaturas de la Microcuenca del Río Tona.*



### 8.1.3. *Inventario de movimientos en masa*

La información recopilada respecto a movimientos en masa en la microcuenca fue adquirida mediante la revisión del registro histórico del SIMMA, análisis e interpretación multitemporal de imágenes satelitales y validación en campo.

**Tabla 5.**

*Movimientos en masa registrados en el SIMMA de la microcuenca del Río Tona.*

Fecha	Municipio	Primer movimiento	Subtipo	Segundo movimiento	Subtipo	Latitud	Longitud	Altura
15/05/1993	Tona	Deslizamiento	Traslacional	Reptación	Solifluxion	7.206.081	-72.968.967	2000
13/06/2008	Tona	Deslizamiento	Traslacional			7.206.081	-72.968.967	2000
22/06/2010	Tona	Deslizamiento	Traslacional	Flujo	de detritos	7.150.556	-73.052.778	1585
3/08/2010	Tona	Caída	De tierras			7.161.667	-73.02	1476
12/10/2010	Bga	Deslizamiento	Traslacional planar			7.145.278	-73.054.167	1611
3/07/2011	Tona	Deslizamiento	Rotacional			7.21	-72.936.111	2637
17/11/2011	Tona	Deslizamiento	Traslacional			71.825	-72.992.778	1570
4/07/2013	Tona	Deslizamiento	Traslacional	Caída	de rocas	7.183.056	-72.989.167	1625

Nota. Tomado de SIMMA (2022).

El análisis e interpretación de imágenes satelitales y las validaciones de campo, dieron como resultado la clasificación e identificación de 1571 movimientos en masa: 1026 polígonos de movimientos en masa (deslizamientos, deslizamientos traslacionales, deslizamientos rotacionales, deslizamientos compuestos, flujos no canalizados y caídas de roca) y 545 puntos correspondientes a deslizamientos y flujos no canalizados, como se observa en la tabla 6.

**Tabla 6.**

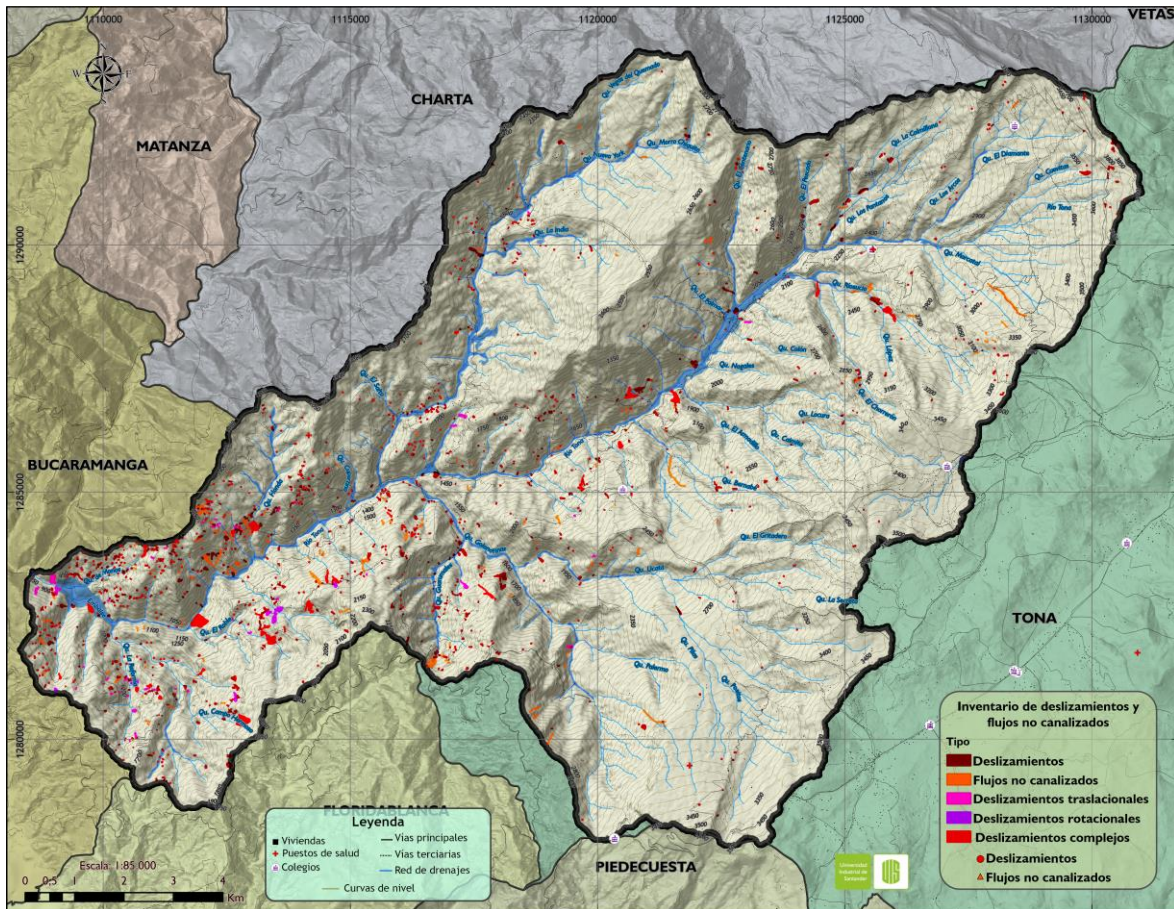
*Datos recopilados de movimientos en masa*

	Deslizamiento	Deslizamiento Traslacional	Deslizamiento rotacional	Deslizamiento compuesto	Flujos no canalizados	Caída de roca	Total
Puntos	533	0	0	0	12	0	545
Poligonos	743	56	9	35	166	17	1026
Total	1276	56	9	35	178	17	1571

Los deslizamientos simples (aquellos a los que no fue posible determinar su mecanismo de falla) representan el 97,8% de los movimientos tipo punto, el 72,4% de los movimientos tipo polígono y el 81,2% del total de movimientos (puntos y polígonos) al agruparse con los demás

tipos de deslizamiento (traslacionales, rotacionales y compuestos) representan el 87,6% del total de movimientos (Ver Tabla 6). Los movimientos tipo flujos no canalizados y caída de roca representan el 11,3% y 1,1% del total de movimientos respectivamente.

**Figura 7.** Mapa del inventario de deslizamientos y flujos no canalizado



**Tabla 7.**

Porcentajes calculados por tipo de movimiento

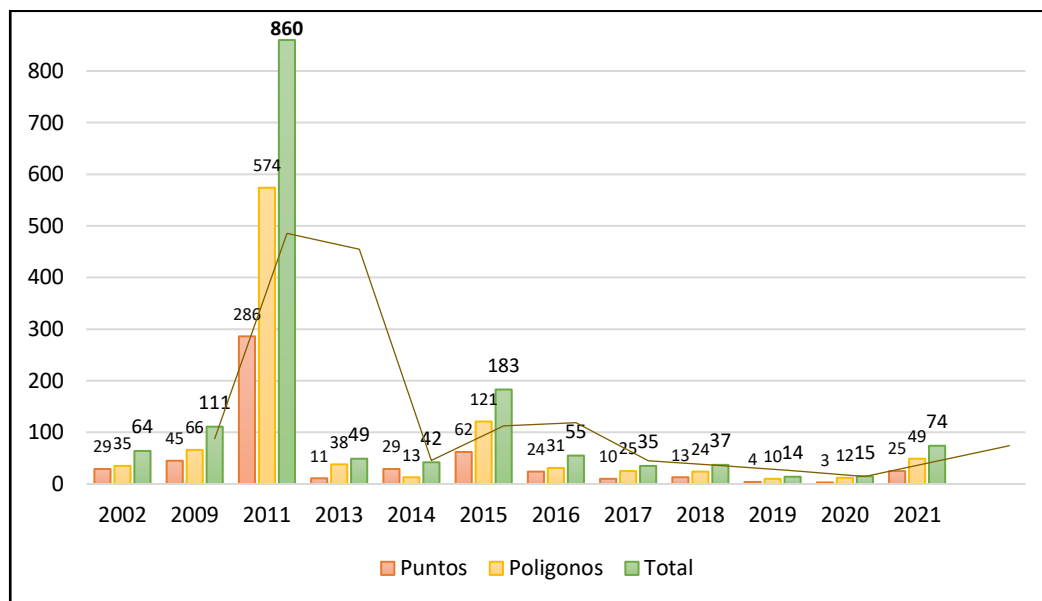
	Deslizamiento	Deslizamiento Traslacional	Deslizamiento Rotacional	Deslizamiento Compuesto	Flujo	Caída de roca	Total de movimientos
Puntos	97,8%	0,0%	0,0%	0,0%	2,2%	0,0%	545
Poligonos	72,4%	5,5%	0,9%	3,4%	16,2%	1,7%	1026
Todos	81,2%	87,6%			11,3%	1,1%	1571

En cuanto a las áreas afectadas, los deslizamientos simples abarcan un área de 60,5 hectáreas, los deslizamientos compuestos un área de 34,2 hectáreas, los deslizamientos traslacionales ocupan un área de 8,5 hectáreas, los deslizamientos rotacionales un área de 5,13 hectáreas y los flujos ocupan un área de 20,5 hectáreas.

**8.1.3.1. Análisis multitemporal de los movimientos en masa.** En la figura 8 se puede observar la permanencia y variabilidad en el número de movimientos en masa a lo largo del tiempo en la microcuenca. Es importante resaltar que en las imágenes satelitales del año 2011 se identificaron el mayor número de movimientos (860), los cuales se correlacionan con las lluvias torrenciales ocasionadas por la Oscilación del Sur (ENOS) fase La Niña en los años 2010 y 2011. Los demás años parecen presentar un número medio de movimientos en masa, aunque con algunas diferencias significativas.

**Figura 8.**

*Cantidad de movimientos en masa en el rango temporal 2002-2021*



*Nota.* El Apéndice G. Contiene descripción y fotografía de movimientos en masa identificados en campo.



topográficos y geológicos utilizando técnicas como el análisis de fotografías aéreas y de satélite, posteriormente se obtuvo información de campo para recopilar datos y verificar la clasificación realizada a través del análisis remoto. De este modo se identificaron 48 tipos de subunidades diferentes, correspondientes a ambiente estructural (32), denudacional (5), fluvial (4), glacial (4) y antrópico (3).

La mayor parte de éstas son de origen estructural, representando aproximadamente el 91,7% del área total de la microcuenca. Por otro lado, las subunidades glaciales representan el 3,8%, las subunidades fluviales y denudacionales ocupan 2,2% del área cada una. Por último, se encontró un pequeño porcentaje de subunidades de origen antrópico, que representan el 0,1% del total como se puede observar a continuación desde la tabla 8 hasta la tabla 12.

#### 8.1.4.1. Ambiente antrópico.

**Tabla 8.**

*Subunidades geomorfológicas de origen antrópico*

<b>Codigo</b>	<b>Unidad</b>	<b>Área(ha)</b>	<b>AT(ha)</b>	<b>%</b>	<b>% T</b>
Alev	Laderas explanadas de vías	0,976347		0,01%	
Aoh	Obras hidraulicas	3,509822	17,484407	0,02%	0,1%
Atu	Tejido urbano	12,998238		0,07%	

*Nota.* Los porcentajes fueron calculados respecto al área total de la microcuenca (en hectáreas)

#### 8.1.4.2. Ambiente fluvial

**Tabla 9.**

*Subunidades geomorfológicas de origen fluvial*

<b>Codigo</b>	<b>Unidad</b>	<b>Área(ha)</b>	<b>AT(ha)</b>	<b>%</b>	<b>%T</b>
Fc	Cauce de río	326,148319		1,68%	
Fca	Cauce abandonado	1,474688	425,848628	0,01%	2,2%
Fe	Embalse	55,472233		0,29%	
Ftan	Terraza de acumulación antigua	42,753388		0,22%	

### 8.1.4.3. Ambiente estructural

**Tabla 10.**

*Subunidades geomorfológicas de origen estructural*

Unidad	Área(ha)	AT(ha)	%	%T
Cerro estructural	29,223815		0,15%	
Colina estructural	258,34639		1,33%	
Ladera estructural de cuesta	68,521183		0,35%	
Cuenca de tracción pequeña	97,413145		0,50%	
Espolón facetado	981,64758		5,06%	
Espolón facetado alto de longitud corta	252,17664		1,30%	
Espolón festoneado	1904,3716		9,81%	
Ladera estructural de cuesta	198,09616		1,02%	
Espolón	1497,2244		7,71%	
Facetas triangulares	198,36014		1,02%	
Faceta triangular erosionada	2,184761		0,01%	
Gancho de flexión	330,17665		1,70%	
Ladera contrapendiente	534,9943		2,76%	
Ladera escalonada	260,54772		1,34%	
Ladera estructural	398,61715		2,05%	
Escarpe de línea de falla	210,03172		1,08%	
Lomo de obturación	171,44994		0,88%	
Lomo de Falla	3,757868		0,02%	
Lomo de presión	339,30645		1,75%	
Sierra	736,87871		3,80%	
Ladera contrapendiente de sierra anticlinal	48,967499		0,25%	
Ladera estructural de sierra anticlinal	11,936595		0,06%	
Sierra anticlinal	564,58639		2,91%	
Ladera de contrapendiente de sierra homoclinal	2136,4232		11,00%	
Ladera estructural de sierra homoclinal	3446,3746		17,75%	
Ladera estructural de sierra homoclinal de pendiente suave	94,23697		0,49%	
Ladera de sierra homoclinal de pendiente moderada	479,65207		2,47%	
Ladera de sierra homoclinal de pendiente suave	588,81131		3,03%	
Sierras y lomos de presión	824,187		4,25%	
Ladera de contrapendiente de sierra sinclinal	105,13619		0,54%	
Ladera estructural de sierra sinclinal	668,99053		3,45%	
Ladera estructural de sierra sinclinal de pendiente moderada	153,85204		0,79%	

### 8.1.4.4. Ambiente denudacional:

**Tabla 11.**

*Subunidades geomorfológicas de origen denudacional*

Codigo	Unidad	Área(ha)	AT(ha)	%	%T
Dco	Cono o lóbulo coluvial	82,189333		0,42%	
Dcd	Cuenca denudada	45,438993	436,51	0,23%	2,2%
Dsd	Sierra denudada	133,22532		0,69%	
Dle	Ladera erosiva	175,65241		0,90%	



**Tabla 13.***UGS de la Microcuenca del Río Tona*

<b>UGS</b>	<b>Nombre</b>	<b>(ha)</b>	<b>% Total</b>
Emb	Embalse	55,5	
Urb	Tejido urbano	13	0,4
Obh	Obras hidraulicas	3,51	
Rbcls	Roca de buena calidad de la Fm. Los Santos	181	0,9
Rcrg	Roca de calidad regular de la Fm. Girón	180	
Rcrls	Roca de calidad regular de la Fm. Los Santos	1820	
Rcrp	Roca de calidad regular de la Fm. Paja	73,8	
Rcrr	Roca de calidad regular de la Fm. Rosablanca	652	27,1
Rcrt	Roca de calidad regular de la Fm. Tablazo	328	
Rcres	Roca de calidad regular de los Esquistos de Silgará	1996	
Rcrppr	Roca de calidad regular del Plutón de Páramo Rico	207	
Rmccc	Roca de mala calidad de la Cuarzomonzonita de la Corcova	1208	
Rmccsb	Roca de mala calidad de la Cuarzomonzonita de Sta. Bárbara	350	
Rmcr	Roca de mala calidad de la Fm. Rosablanca	249	
Rmct	Roca de mala calidad de la Fm. Tablazo	133	45,5
Rmces	Roca de mala calidad de los Esquistos de Silgará	1207	
Rmcnb	Roca de mala calidad del Neis de Bucaramanga	3472	
Rmcob	Roca de mala calidad del Ortoneis de Berlín	2211	
Rmmccc	Roca de muy mala calidad de la Cuarzomonzonita de la Corcova	1110	
Rmmcr	Roca de muy mala calidad de la Fm. Rosablanca	29,3	15,7
Rmmcnb	Roca de muy mala calidad del Neis de Bucaramanga	1217	
Rmmcob	Roca de muy mala calidad del Ortoneis de Berlín	691	
Srls	Suelo residual de la Fm. Los Santos	847	
Srr	Suelo Residual de la Fm. Rosablanca	46,9	5
Sres	Suelo residual de los esquistos del Silgará	12,5	
Srnb	Suelo residual del Neis de Bucaramanga	56,3	
Stat	Suelo transportado aluvial de terrazas	42,8	
Stc	Suelo transportado de coluvión	60,4	5,5
Stgf	Suelo Transportado glaciofluvial	632	
Stal	Suelos transportados aluvial	328	

**Tabla 14.***Algunas características geomecánicas de las UGS, Unidades de Roca*

<b>Código</b>	<b>Nombre</b>	<b>GSI</b>	<b>Tipo de calidad</b>	<b>Grado de meteorización</b>	<b>Resistencia a la compresión simple</b>
Rbcls	Roca de buena calidad de la Fm. Los Santos	50 - 70	II	II	N. A
Rcrg	Roca de calidad regular de la Fm. Girón	40 - 60	IV - III	III	N. A
Rcrls	Roca de calidad regular de la Fm. Los Santos	40 a 60	IV	II - III	N. A
Rcrp	Roca de calidad regular de la Fm. Paja	35 a 50	IV - V	II - III	N. A
Rcrr	Roca de calidad regular de la Fm. Rosablanca	35 a 50	VII	III - IV	N. A
Rcrt	Roca de calidad regular de la Fm. Tablazo	35 a 50	VII	III - IV	N. A
Rcres	Roca de calidad regular de los Esquistos de Silgará	35 a 50	IV	III	N. A
Rcrppr	Roca de calidad regular del Plutón de Páramo Rico	40 a 60	V	II - III	N. A
Rmccc	Roca de mala calidad de la Cuarzomonzonita de la Corcova	20 - 40	VII	II - III	50 a 100 Mpa
Rmccsb	Roca de mala calidad de la Cuarzomonzonita de Sta. Bárbara	20 - 30	IX	IV - V	N. A
Rmcr	Roca de mala calidad de la Fm. Rosablanca	30 a 50	VI - VII	IV - V	N. A
Rmct	Roca de mala calidad de la Fm. Tablazo	30 a 50	VI-VII	IV - V	N. A
Rmces	Roca de mala calidad de los Esquistos de Silgará	30 a 40	VII	IV - V	N. A
Rmcnb	Roca de mala calidad del Neis de Bucaramanga	30 - 40	VII	III - IV	20 a 50 Mpa
Rmcob	Roca de mala calidad del Ortoneis de Berlín	30 a 40	VI	III	N. A
Rmmccc	Roca de muy mala calidad de la Cuarzomozonita de la Corcova	10 a 40	VIII	III - IV	40 a 100 Mpa
Rmmcr	Roca de muy mala calidad de la Fm. Rosablanca	10 a 30	V-VII	IV - V	N. A
Rmmcnb	Roca de muy mala calidad del Neis de Bucaramanga	0 - 25	IX	IV - V	5 a 30 Mpa
Rmmcob	Roca de muy mala calidad del Ortoneis de Berlín	10 a 25	IX - VI	III - IV	20 a 50 Mpa

Nota: El Apéndice I contiene descripciones de las UGS más representativas, validaciones de campo y fotografías.

## 8.2. Análisis de la susceptibilidad

A continuación, se muestran las tablas de los resultados obtenidos en el cálculo de los pesos de evidencia, descripciones de hipótesis de falla y el mapa resultante:

**Tabla 15.**

*Resultados del método de Pesos de Evidencia, Pendiente del terreno*

Pendiente	Área (ha)	Área (%)	# de pixeles	Npix1	% mm	Npix2	Npix3	Npix4	Wi+	Wi-	Wf
0° a 5°	485,5171757	3	31075	21	0,3	6761	31054	1211454	-2,0883	0,0222	-2,1106
5° a 10°	1273,843954	7	81531	113	1,7	6669	81418	1161090	-1,3693	0,051	-1,4203
10° a 15°	2382,713624	12	152503	263	3,9	6519	152240	1090268	-1,1504	0,0912	-1,2416
15° a 25°	6622,110548	34	423841	1601	23,6	5181	422240	820268	-0,3643	0,146	-0,5103
25° a 35°	5756,194767	30	368419	2715	40,0	4067	365704	876804	0,3076	-0,163	0,47035
35° a 45°	2436,179103	13	155925	1724	25,4	5058	154201	1088307	0,717	-0,161	0,8778
>45°	450,8005494	2	28853	340	5,0	6442	28513	1213995	0,7814	-0,028	0,80966

Es ampliamente conocido que la pendiente es uno de los factores más importante a la hora de estudiar los movimientos en masa, esta variable geométrica se relaciona directamente con la estabilidad del terreno ante procesos gravitacionales, la forma en la que se distribuye el agua en las laderas y su resistencia a las tensiones de corte. Nótese en la tabla 15 que en general el Wf es directamente proporcional al valor de la pendiente, resaltando los siguientes aspectos: 1) el 40% de los mm ocurren en áreas con pendientes de 25 a 35°, que ocupan el 30% de la zona; 2) el Wf con mayor correlación positiva está dado por pendientes de 35° a 45°; 3) aunque el área con pendientes > 45° es del 2% lógicamente conserva una correlación positiva muy alta en la ocurrencia de movimientos en masa y 4) el 45% de la microcuenca es de pendientes que contribuyen a la ocurrencia de este fenómeno (de 25° a 79°).

**Tabla 16.**

Resultados del método de Pesos de Evidencia, Curvatura de Plano.

Curvatura	Área (ha)	Área (%)	# de pixeles	Npix1	% mm	Npix2	Npix3	Npix4	Wi+	Wi-	Wf
Cóncava	1965,348529	10%	125790	980	14,5	5802	124810	1117698	0,3636	-0,05	0,4138
Lineal	15408,74494	79%	986220	4957	73,1	1825	981263	261245	-0,077	0,2467	-0,3242
Convexa	2039,031522	11%	130506	843	12,4	5939	129663	1112845	0,1749	-0,023	0,1974

Nótese en la tabla 16 que la curvatura de plano tipo cóncava presenta el peso positivo con mayor correlación espacial, pese a que es en el tipo lineal donde se concentran la mayoría de los movimientos (73%), esto quiere decir fundamentalmente dos cosas: 1) la relación espacial de áreas/#píxeles entre las clases y los movimientos en masa son un factor que influye significativamente en el valor del peso final y 2) que tiene sentido que las zonas en las que hay mayor captación de agua o que las celdas donde la convergencia de la escorrentía se da a través de su centro son un condicionante morfológico característico en la ocurrencia de deslizamientos y/o flujos no canalizados.

En la tabla 17 se evidencia que el ambiente estructural predomina espacialmente en la zona de estudio, con un 91,7% del área total, reúne el 96,4% de los píxeles deslizados y presenta la mayor cantidad de subunidades con pesos finales de correlación positiva 14/33 (42%). Por otro lado, se tiene que el ambiente antrópico, específicamente las “laderas explanadas de vías” presenta el Wf más positivo, esto se debe a la relación de áreas (#de píxeles/Npix1) pero refleja la realidad del terreno; seguidamente en el ambiente denudacional los Wf con mayor magnitud corresponden a las “sierras denudadas y escarpes facetados”; complementariamente en el ambiente estructural el Wf de mayor magnitud corresponde al “Espolón facetado alto de longitud corta y las facetas triangulares”, mientras que son los “espolones festoneados” la subunidad que presenta mayor cantidad de píxeles deslizados (20%).

Tabla 17.

Resultados del método de Pesos de Evidencia, subunidades geomorfológicas

Codigo	Ambiente	Unidad	Área(ha)	AT(ha)	%	%T	# de pixeles	Npix1	% MM	Npix2	Npix3	Npix4	Wi+	Wi-	Wf
Alev	Antrópico	Laderas explanadas de vías	0,976347	17,4844	0,01%	0,1%	61	2	0,03	6780	59	1242449	1,82622	-0,0002	1,8265
Aoh		Obras hidráulicas	3,509822		0,02%		228	0	0,00	6782	228	1242280	#####	0,0002	-3,783
Atu		Tejido urbano	12,99824		0,07%		834	0	0,00	6782	834	1241674	#####	0,0007	-3,783
Dco	Denudacional	Cono o lóbulo coluvial y de solifluxión	82,18933	436,506	0,42%	2,2%	5264	0	0,00	6782	5264	1237244	#####	0,0042	0
Def		Escarpe facetado	45,43899		0,23%		2903	43	0,63	6739	2860	1239648	1,01324	-0,0041	1,0173
Dsd		Sierra denudada	133,2253		0,69%		8538	189	2,79	6593	8349	1234159	1,42247	-0,0215	1,444
Dle		Ladera erosiva	175,6524		0,90%		11250	38	0,56	6744	11212	1231296	-0,47654	0,0034	-0,48
Sles	Estructural	Ladera escalonada	260,5477	17805,5	1,34%	91,7%	16676	70	1,03	6712	16606	1225902	-0,25841	0,0031	-0,261
Sce		Cerro estructural	29,22382		0,15%		1871	22	0,32	6760	1849	1240659	0,77926	-0,0018	0,781
Sces		Colina estructural	258,3464		1,33%		16523	45	0,66	6737	16478	1226030	-0,6925	0,0067	-0,699
Scle		Ladera estructural de cuesta	68,52118		0,35%		4396	49	0,72	6733	4347	1238161	0,72519	-0,0037	0,7289
Sctp		Cuenca de tracción pequeña	97,41315		0,50%		6229	21	0,31	6761	6208	1236300	-0,47846	0,0019	-0,48
Sefc		Espolón facetado	981,6476		5,06%		62824	736	10,85	6046	62088	1180420	0,77554	-0,0636	0,8392
Sefclc		Espolón facetado alto de longitud corta	252,1766		1,30%		16134	420	6,19	6362	15714	1226794	1,58856	-0,0512	1,6398
Sefes		Espolón festoneado	1904,372		9,81%		121876	1361	20,07	5421	120515	1121993	0,72706	-0,122	0,849
Sele		Ladera estructural de cuesta	198,0962		1,02%		12685	111	1,64	6671	12574	1229934	0,48076	-0,0063	0,4871
Ses		Espolón	1497,224		7,71%		95803	879	12,96	5903	94924	1147584	0,52857	-0,0593	0,5879
Sft		Facetas triangulares	198,3601		1,02%		12687	202	2,98	6580	12485	1230023	1,0866	-0,0201	1,1067
Sfte		Faceta triangular erosionada	2,184761		0,01%		0	0	0,00	0	0	0	0	0	0
Sgf		Gancho de flexión	330,1767		1,70%		21109	269	3,97	6513	20840	1221668	0,8607	-0,0236	0,8843
Stcp		Ladera contrapendiente	534,9943		2,76%		34233	23	0,34	6759	34210	1208298	-2,09416	0,0245	-2,119
Sle		Ladera estructural	398,6171		2,05%		25518	0	0,00	6782	25518	1216990	#####	0,0208	0
Sife		Escarpe de línea de falla	210,0317		1,08%		13448	117	1,73	6665	13331	1229177	0,47494	-0,0066	0,4816
Slo		Lomo de obturación	171,4499		0,88%		10980	75	1,11	6707	10905	1231603	0,23113	-0,0023	0,2334
Slp		Lomo de Falla	3,757868		0,02%		241	0	0,00	6782	241	1242267	#####	0,0002	0
Slp		Lomo de presión	339,3065		1,75%		21717	133	1,96	6649	21584	1220924	0,12126	-0,0023	0,1235
Ss		Sierra	736,8787		3,80%		47154	50	0,74	6732	47104	1195404	-1,63748	0,0312	-1,669
Ssalc		Ladera contrapendiente de sierra anticlinal	48,9675		0,25%		3136	0	0,00	6782	3136	1239372	#####	0,0025	0
Ssalc		Ladera estructural de sierra anticlinal	11,9366		0,06%		760	6	0,09	6776	754	1241754	0,37698	-0,0003	0,3773
Ssan		Sierra anticlinal	564,5864		2,91%		36140	70	1,03	6712	36070	1206438	-1,03411	0,0191	-1,053
Sshlc		Ladera de contrapendiente de sierra homoclinal	2136,423		11,00%		136773	843	12,43	5939	135930	1106578	0,12769	-0,0169	0,1446
Sshle		Ladera estructural de sierra homoclinal	3446,375		17,75%		220616	543	8,01	6239	220073	1022435	-0,79399	0,1115	-0,905
Sshles		Ladera estructural de sierra homoclinal de pendiente suave	94,23697		0,49%		6034	0	0,00	6782	6034	1236474	#####	0,0049	0
Sshlm		Ladera de sierra homoclinal de pendiente moderada	479,6521		2,47%		30698	159	2,34	6623	30539	1211969	-0,04724	0,0012	-0,048
Sshls		Ladera de sierra homoclinal de pendiente suave	588,8113		3,03%		37695	113	1,67	6669	37582	1204926	-0,59628	0,0139	-0,61
Sslp		Sierras y lomos de presión	824,187		4,25%		52741	169	2,49	6613	52572	1189936	-0,52943	0,018	-0,547
Ssslc		Ladera de contrapendiente de sierra sinclinal	105,1362		0,54%		6738	3	0,04	6779	6735	1235773	-2,50585	0,005	-2,511
Sssle		Ladera estructural de sierra sinclinal	668,9905		3,45%		42815	11	0,16	6771	42804	1199704	-3,05588	0,0334	-3,089
Ssslem		Ladera estructural de sierra sinclinal de pendiente moderada	153,852		0,79%		9851	0	0,00	6782	9851	1232657	#####	0,008	0
Sssles		Ladera estructural de sierra sinclinal de pendiente suave	209,0282		1,08%		13374	0	0,00	6782	13374	1229134	#####	0,0108	0
Fc	Fluvial	Cauce de río	326,1483	425,849	1,68%	2,2%	20864	3	0,04	6779	20861	1221647	-3,63641	0,0165	-3,653
Fca		Cauce abandonado	1,474688		0,01%		90	0	0,00	6782	90	1242418	#####	7E-05	-3,783
Fe		Embalse	55,47223		0,29%		3550	0	0,00	6782	3550	1238958	#####	0,0029	-3,783
Ftan		Terraza de acumulación antigua	42,75339		0,22%		2741	0	0,00	6782	2741	1239767	#####	0,0022	-3,783
Gcgf	Glacial	Conos glaciofluviales	104,8712	729,81	0,54%	3,8%	6721	0	0,00	6782	6721	1235787	#####	0,0054	0
Gmf		Morrena de fondo	9,74003		0,05%		624	0	0,00	6782	624	1241884	#####	0,0005	0
Gml		Morrena lateral	5,522563		0,03%		351	0	0,00	6782	351	1242157	#####	0,0003	0
Gsg		Sierra glaciada	609,6766		3,14%		39013	5	0,07	6777	39008	1203500	-3,75147	0,0312	-3,783

Finalmente, deben tenerse en cuenta las siguientes consideraciones: 1) la subunidad con el Wf más negativo fue la Sierra Glaciada, este valor (-3,783) se le asignó a otras subunidades en las que *lógicamente* no se espera que ocurran estos movimientos o que no pueden ser estudiados a esta escala ni con este método, tales como el ambiente fluvial y antrópico, los cuales requieren escalas de trabajo más detalladas; 2) el inventario de movimientos en masa tuvo que ser refinado en el sentido que el método presenta problemas con las áreas de depósito de los deslizamientos y/o flujos no canalizados, es decir, en la zona han ocurrido deslizamientos cuyo material cae al río o

al casco urbano u ocurren en las terrazas, pero conceptualmente no se pueden presentar pesos positivos en estas zonas, por lo tanto se optó por recortar los polígonos y suprimir las zonas de depósito en las subunidades del ambiente fluvial y antrópico, mientras que -en el caso de los movimientos de las terrazas- no fueron tenidos en consideración en el análisis; 3) esto se puede ejemplificar en que pese al ajuste el cauce del río “presentó” tres pixeles de deslizamiento, aunque el  $W_f$  sea muy negativo, dada las áreas de depósitos reales en esta unidad el  $W_f$  anterior daba positivo; 4) los valores de 0 deben ser tratados con mucha precaución, por ejemplo, la faceta triangular erosionada genera conflictos por la unidad de análisis y no es lógico que esta subunidad no condicione el terreno a la ocurrencia de movimientos, sin embargo, se decidió colocar valores de cero donde no habían pixeles de deslizamiento, siendo que el peso final calculado matemáticamente es indeterminado o con una tendencia marcada hacia el cero.

**Tabla 18.**

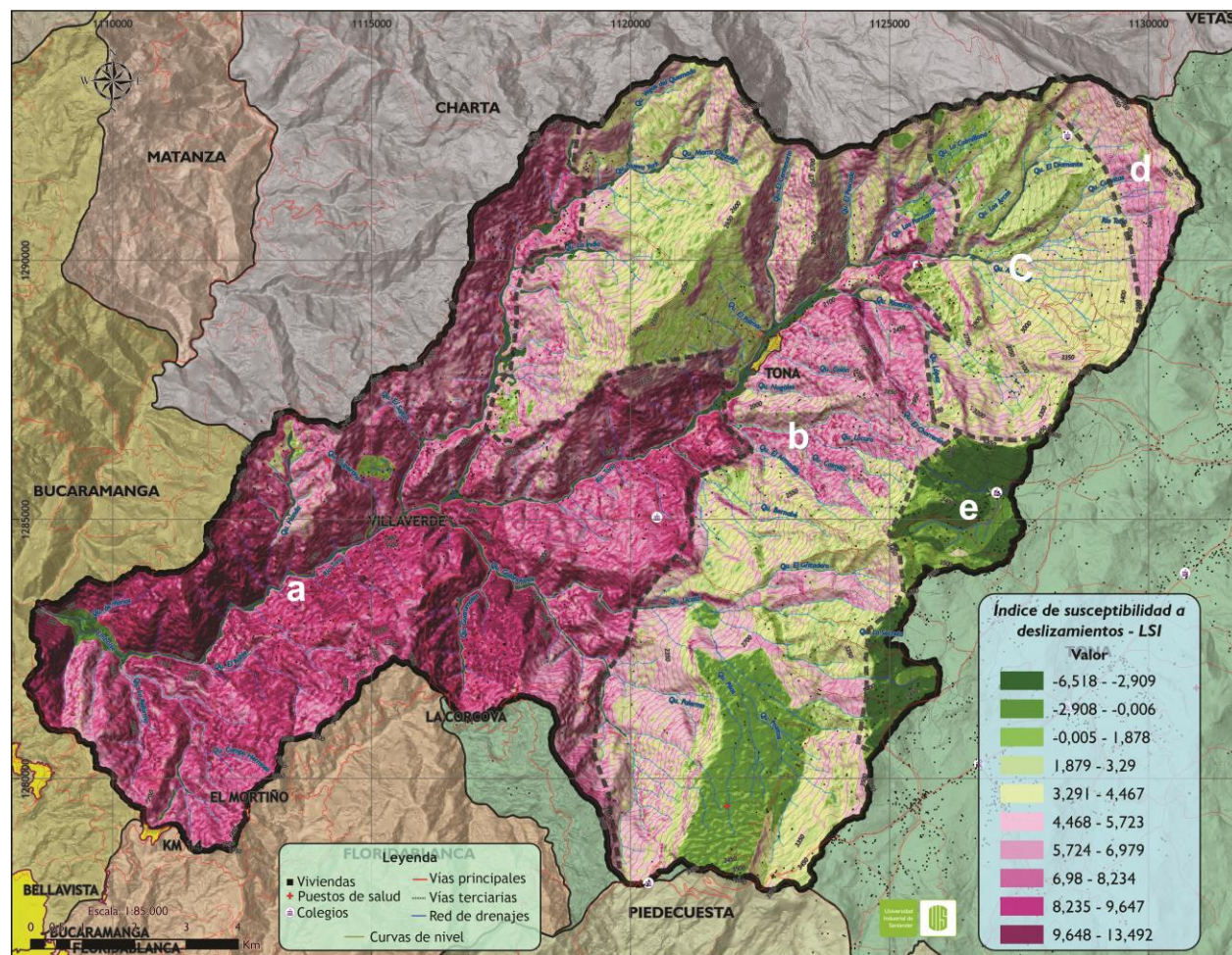
*Resultados del método de Pesos de Evidencia, Unidades geológicas superficiales (UGS)*

Código	Tipo	área (ha)	AT (ha)	% área	% Total	# pixeles	Npix1	%MM	Npix2	Npix3	Npix4	Wi+	Wi-	Wf
Emb		55,47		0,29		3550	0	0,0	6782	3550	1238958	#¡NUM!	0,002861214	-4,73665703
Urb	Antrópico	3,51	71,98	0,02	0,37	228	0	0,0	6782	228	1242280	#¡NUM!	0,000183517	-4,73665703
Obh		13,00		0,07		834	0	0,0	6782	834	1241674	#¡NUM!	0,000671448	-4,73665703
Rbcls	Buena calidad	180,64	180,64	0,93	0,93	11573	26	0,4	6756	11547	1230961	-0,88546925	0,005495708	-0,89096496
Rcrt		327,86		1,69		20980	292	4,3	6490	20688	1221820	0,950059854	-0,02721915	0,977279
Rcrppr		207,00		1,07		13243	72	1,1	6710	13171	1229337	0,00150855	-1,6175E-05	0,001524725
Rcrp		73,78		0,38		4722	21	0,3	6761	4701	1237807	-0,20039294	0,000689417	-0,20108236
Rcrcls	Calidad regular	1820,35	5257,40	9,38	27,08	116526	256	3,8	6526	116270	1126238	-0,90787775	0,059771197	-0,96764895
Rcres		1995,93		10,28		127758	197	2,9	6585	127561	1114947	-1,26253108	0,078847339	-1,34137842
Rcrr		652,08		3,36		41745	37	0,5	6745	41708	1200800	-1,81691517	0,028673362	-1,84558853
Rcrg		180,40		0,93		11531	3	0,0	6779	11528	1230980	-3,0433067	0,008878872	-3,05218557
Rmcnb		3471,73		17,88		222220	1742	<b>25,7</b>	5040	220478	1022030	0,369851115	-0,10152489	0,471376004
Rmccc		1208,30		6,22		77335	322	4,7	6460	77013	1165495	-0,26656282	0,015343302	-0,28190612
Rcres		1207,30		6,22		77276	116	1,7	6666	77160	1165348	-1,28943112	0,046860099	-1,33629122
Rmccsb	Mala calidad	350,31	8830,11	1,80	45,49	22429	32	0,5	6750	22397	1220111	-1,34033124	0,013460541	-1,35379179
Rmcob		2210,80		11,39		141496	217	3,2	6565	141279	1101229	-1,26797943	0,088185553	-1,35616498
Rmcr		248,56		1,28		15902	11	0,2	6771	15891	1226617	-2,06499776	0,011248687	-2,07624645
Rmct		133,09		0,69		8500	3	0,0	6779	8497	1234011	-2,738241	0,006419633	-2,74466063
Rmmcnb		1216,51		6,27		77855	1740	<b>25,7</b>	5042	76115	1166393	1,432254912	-0,23325338	1,66550829
Rmmcr	Muy mala	29,34	3047,12	0,15	15,70	1879	46	<b>0,7</b>	6736	1833	1240675	1,525547302	-0,00532944	1,530876737
Rmmccc		1109,81		5,72		71015	1118	<b>16,5</b>	5664	69897	1172611	1,075133798	-0,12224266	1,197376454
Rmmcob		691,46		3,56		44250	484	7,1	6298	43766	1198742	0,70608752	-0,03818068	0,744268197
Sres		12,45		0,06		797	0	0,0	6782	797	1241711	#¡NUM!	0,00064165	0
Srr	Suelo residual	46,93	963,04	0,24	4,96	3005	7	0,1	6775	2998	1239510	-0,84917538	0,0013831	-0,85055848
Srnb		56,25		0,29		3604	2	0,0	6780	3602	1238906	-2,28548219	0,002608244	-2,28809044
Srls		847,40		4,37		54237	31	0,5	6751	54206	1188302	-2,25594453	0,040025119	-2,29596964
Stc		60,45		0,31		3878	0	0,0	6782	3878	1238630	#¡NUM!	0,003125987	-4,73665703
Stal	Suelo transportado	327,62	1062,66	1,69	5,47	20955	3	0,0	6779	20952	1221556	-3,64076194	0,016564016	-4,73665703
Stat		42,75		0,22		2741	0	0,0	6782	2741	1239767	#¡NUM!	0,002208459	-4,73665703
Stgf		631,84		3,25		40444	2	0,0	6780	40442	1202066	-4,70386179	0,032795233	-4,73665703

Las características geomecánicas son un condicionante importante a la hora de zonificar la susceptibilidad por movimientos en masa, conocer la distribución espacial de la composición, disposición y comportamiento esperado de los materiales rocosos se convierte en información de gran valor ingenieril para explicar las causas de ocurrencia y aportar a otros procesos de la gestión del riesgo como la planificación de obras civiles de mitigación. De este modo, de acuerdo con la tabla 18 se reconoce que las unidades con mayor correlación positiva corresponden a las rocas de mala y muy mala calidad, las cuales ocupan el 61% de la microcuenca del río Tona. De estos resultados se puede concluir lo siguiente: 1) la unidad en la que se concentran la mayoría de los movimientos en masa -el 51%- es en el Neis de Bucaramanga, que además ocupa el 25% del área de la microcuenca; 2) la cuarzomonzonita de la corcova de muy mala calidad presenta una correlación positiva significativa, sin embargo ¿por qué el método indica que las de mala calidad, pese a tener presencia de deslizamientos, presentan correlación negativa? Son problemas en la relación de áreas, es aquí donde el criterio experto puede decidir ponderar el resultado; y 3) las rocas de muy mala calidad de la Fm. Rosablanca presentan una correlación positiva coherente con la realidad del terreno y en esencia se le atribuyó esta calidad por un deslizamiento de grandes dimensiones por el cual el peso de esta unidad debía indicar una alta correlación positiva.

### **8.2.1. *Cálculo de la función de susceptibilidad***

A partir de lo anterior, se emplearon los pesos finales correspondientes a las unidades o clases de las cartografías temáticas en formato ráster mediante reclasificación/unión de tablas y se aplicó la función de sumatoria LSI en la calculadora ráster para generar un mapa con la información estadística georreferenciada.

**Figura 11.** Índice de susceptibilidad a deslizamientos – LSI – Microcuenca del Río Tona

En la figura 11, el índice presenta un rango de -6,518 a 13,492, categorizado en 10 intervalos naturales que permiten una asociación de colores tolerablemente discriminada de los niveles interpretativos de la distribución espacial de la probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa tipo deslizamientos y flujos no canalizados en el área de estudio. Siguiendo estas disposiciones, se analizó el resultado de la siguiente manera: 1) las unidades fluviales presentan coherencia cartográfica en el índice de susceptibilidad con valores muy bajos en tonos verdes, mientras que el coluvión en el Neis de Bucaramanga, en inmediaciones de la quebrada Cupertina es resultado de un error a la sensibilidad del mapeo que conduce a subestimar la susceptibilidad real o que dada su cercanía a un área extensa de alta susceptibilidad su valor  $W_f$  debe ser

reconsiderado y corregido; 2) el LSI en la microcuenca del Río Tona se puede dividir en áreas homogéneas marcadas y diferenciadas espacialmente: *a)* la parte más Occidental del área de estudio y además la más estrecha, presenta un índice muy alto de susceptibilidad con tonalidades magentas oscuras y se debe a la combinación de factores condicionantes cuyos pesos finales presentan una importante correlación positiva y en la que han ocurrido la mayor cantidad de deslizamientos dentro de la microcuenca; *b)* la zona media presenta valores intermedios a altos en tonalidades pálidas a magentas en sentido N-S y hacia el extremo Sur la ladera estructural de sierra sinclinal del Picacho presenta valores bajos en tonalidades verdes; *c)* en la parte alta de la microcuenca predominan los valores intermedios en tonalidades verdes – pálidas y ocasionalmente tonos magentas claros; *d)* la zona más oriental -hacia el páramo de Berlín, en la cuesta boba- presenta valores intermedios en tonalidades magentas claros y *e)* la franja Suroriental de la microcuenca donde predomina el ambiente glacial – en zona de páramo- presentó los valores más bajos de la función LSI.

3) A grandes rasgos, el mapa indica que la zona *a*, donde están las vías de acceso principales hacia la cabecera municipal y la interconectividad vial intermunicipal – veredal entre Tona y el Norte de Bucaramanga, las zonas rurales de Bucaramanga, Charta y Matanza y hacia el Mortiño y la Corcova (vía Nacional Bucaramanga – Cúcuta) presentan una alta probabilidad espacial en la ocurrencia de movimientos en masa tipo deslizamientos y flujos no canalizados. En términos geográficos, los trayectos más utilizados por los pobladores para entrar y salir de Tona son los del Mortiño hasta la Cabecera Municipal y desde el “Embalse de Bucaramanga” – Cabecera Municipal, los cuales tienen longitudes de 26 y 25 km respectivamente, físicamente se encuentran en esta zona, estableciendo un contexto muy alarmante por la cantidad de movimientos cartografiados y los antecedentes de graves situaciones de riesgo desde el pasado hasta la

actualidad, que han sido documentadas a partir de material de prensa o referidos por los habitantes de la microcuenca durante conversaciones en las labores de campo, en pocas palabras, el índice en sí ya es un insumo para la priorización de zonas a ser intervenidas bajo un enfoque integral de la gestión del riesgo, por ejemplo, para diseñar estrategias de divulgación, prevención y mitigación de los riesgos causados por estos fenómenos. Además, es un insumo inicial para razonamientos de tipo multiamenazas, cabe considerar que a lo largo de todo el cauce del río Tona el índice es predominantemente alto desde los límites de la zona b-c hasta el embalse de Bucaramanga, aproximadamente 30km. Esto permite inferir que existe una gran disponibilidad de material rocoso susceptible de ser depositado en el río, favoreciendo la ocurrencia de avenidas torrenciales.

Sumado a esto, hacia el margen Este de la cabecera municipal se desarrolla la expansión urbana en un área que presenta una diferencia topográfica importante frente a la antigua terraza de acumulación en la que está asentado el caserío y que además la combinación de los factores condicionantes tenidos en cuenta da como resultado un LSI alto en sus inmediaciones.

Seguidamente, en la terraza de acumulación activa del río Tona (margen oeste) hay caída de banca/socavación lateral o “movimientos en masa” de tipo deslizamiento, los cuales aportan volúmenes de material rocoso al caudal, ténganse en cuenta que el material de arrastre está comprendido por alta densidad de bloques de roca de grandes dimensiones.

### **8.2.2. *Curva de éxito y validación para la zonificación de la susceptibilidad***

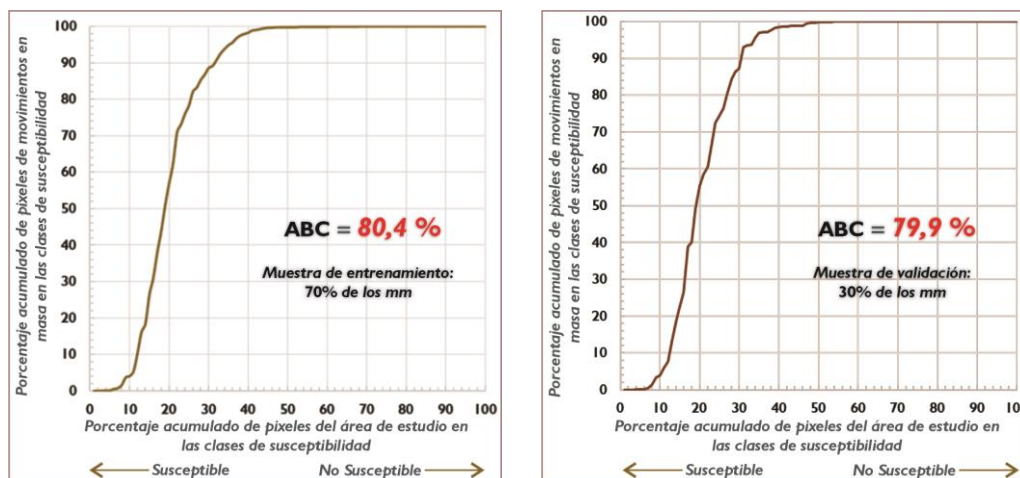
En la literatura existen diferentes formas de evaluar el desempeño y la capacidad predictiva de los mapas de susceptibilidad (LSI), dado que cartográficamente el mapa obtenido se considera coherente con la realidad del terreno, se prosigue con la parte final de la zonificación de la susceptibilidad propuesta por el SGC, que consiste en medir la bondad de ajuste de la función LSI con el inventario de movimientos en masa de la variable de agrupamiento. La guía metodológica

indica que se deben organizar los valores de LSI de forma descendente en 100 percentiles. Seguidamente, cada categoría del 1% se cruza con inventario (el 70% de los mm) para determinar la cantidad de pixeles con los que tiene relación. Entonces, el eje X representará los percentiles de menor a mayor cada 1%, de tal manera que a la izquierda esté el percentil 1 (susceptible), a la derecha el P100 (no susceptible) y en el eje Y se organizan los valores porcentuales cada 1% de los movimientos en masa correspondientes para cada percentil del LSI, dicha curva se construye a partir del área total de la microcuenca y la de deslizamientos y flujos no canalizados considerados, acto seguido se evalúa el área bajo la curva (ABC) para establecer la calidad del ajuste, el cuál debe ser por lo menos mayor al 70%. Además, se cuenta con una muestra de validación (30% de los mm) para la que se realizaron todos los pasos mencionados y poder analizar el comportamiento de la función, explicar la ocurrencia de movimientos existentes y medir la capacidad de predicción de nuevos procesos. Por último, esto permitió categorizar la susceptibilidad siguiendo los criterios propuestos por Van Westen (2013) que recomienda el SGC.

A continuación, se muestra la curva de éxito y validación para el modelo de susceptibilidad por deslizamientos y flujos no canalizados en la microcuenca del Río Tona:

**Figura 12.**

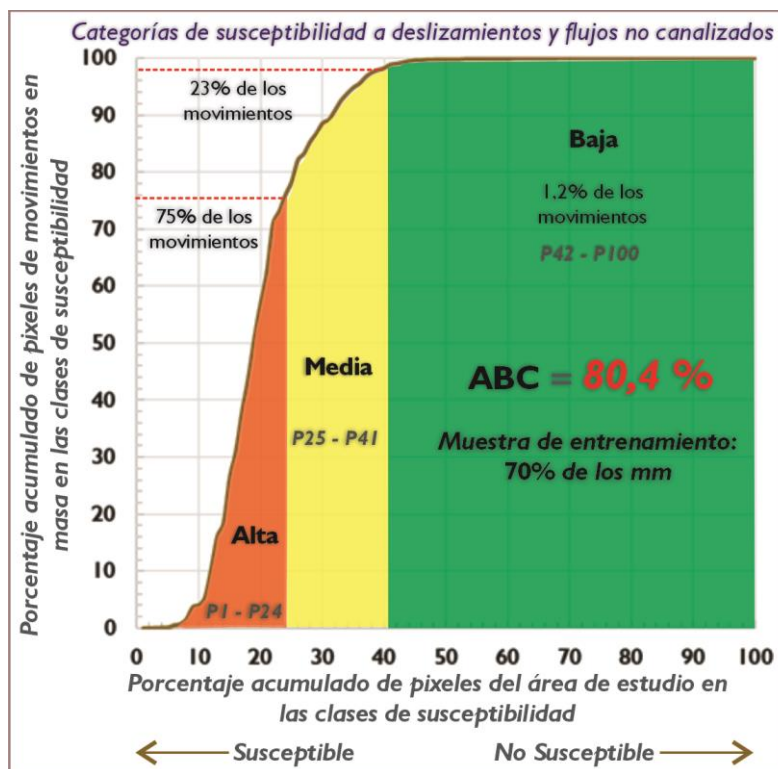
*Curva de éxito y curva de validación del modelo*



El área bajo la curva -obtenida con la muestra de entrenamiento ABC = 80,4%- evidencia un buen rendimiento del modelo construido y cumple con los parámetros técnicos mínimos que sugiere el SGC para que se le considere un insumo en la toma de decisiones territoriales (POT, PMGRD, ODS, etc.). En esencia, un buen ajuste del modelo permite categorizar el LSI con un alto grado de confiabilidad espacial, por lo que se siguieron los criterios de Van Westen (2013) para realizar una zonificación de la susceptibilidad por categorías alta, media y baja, a su vez, las evidencias o todos los movimientos cartografiados se les considera espacialmente como susceptibilidad muy alta:

### Figura 13.

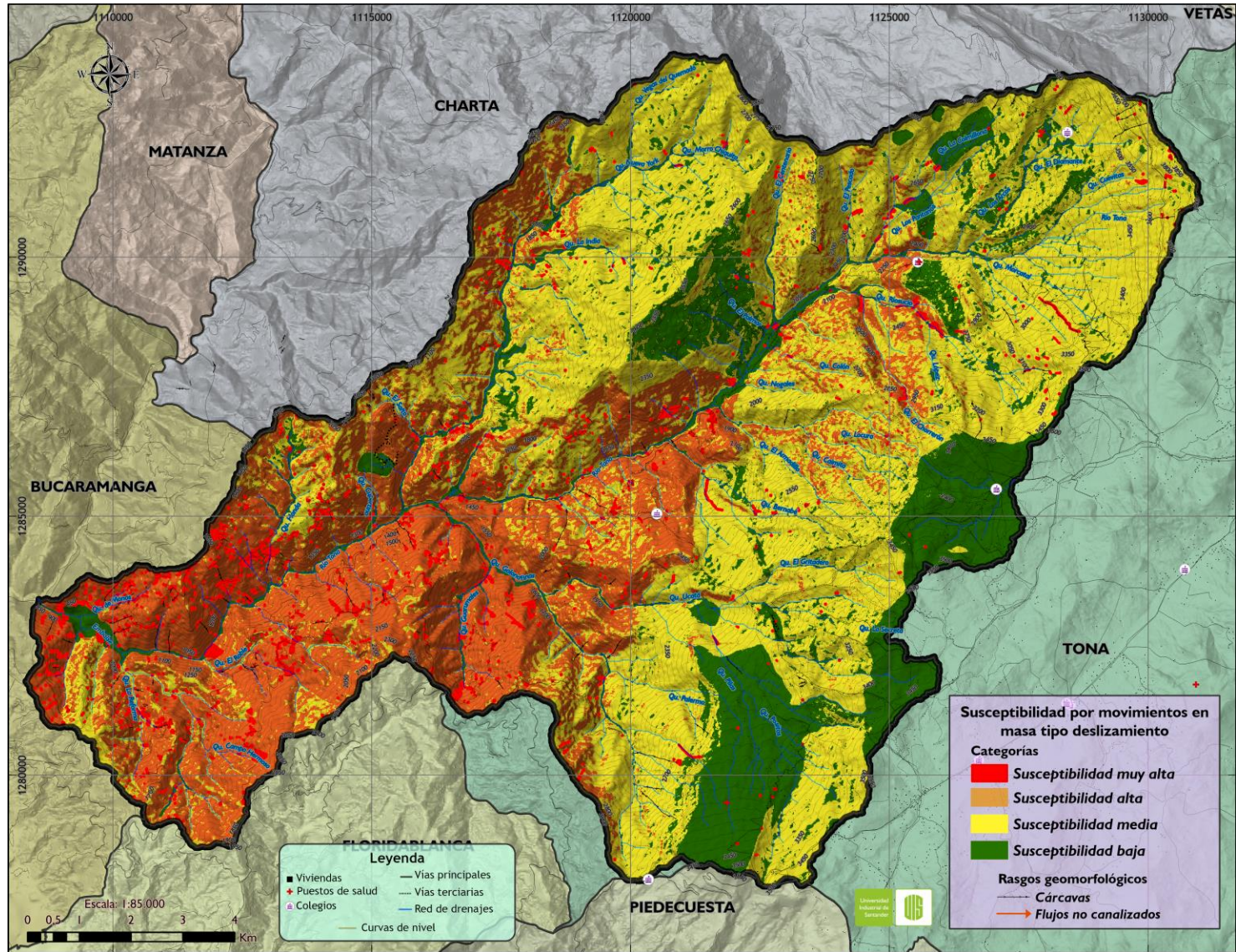
*Curva de éxito categorizada del modelo de susceptibilidad*



Teniendo en cuenta estos resultados, a la capa ráster de 100 percentiles de LSI se le aplicó una simbología de grupos para representar por colores semáforo las categorías de susceptibilidad como se muestra en el siguiente mapa:

**Figura 14.**

*Zonificación de la susceptibilidad por deslizamientos y flujos no canalizados en la microcuenca del Río Tona*



**Susceptibilidad muy alta:** Esta categoría es el inventario completo de deslizamientos y flujos no canalizados, la georreferenciación de un compendio de 1.009 eventos o polígonos que ocupan un área de 119,42 ha y 545 puntos, a esta capa se le aplicó un buffer de 25 m (para que ocuparan un píxel en la capa ráster) que dimensionan un área de 26,16 ha, para un total de 145,58 ha afectadas que equivalen al 0,75% de la microcuenca de estudio. Esta categoría es sumamente importante en la medida que permite la priorización de zonas para la gestión del riesgo.

Recuérdese que administrativamente la microcuenca del Río Tona hace parte de los municipios de Tona en un 91% y Bucaramanga en un 9%, este último abarca espacialmente el embalse en cuyas inmediaciones y en general la región occidental, predominan las Rocas de Mala Calidad del Neis de Bucaramanga y de la Cuarzomonzonita de La Corcova, dominados por geoformas indicativas de origen estructural y ocasionalmente denudacional, la injerencia del contexto estructural de la Falla Casiano, Zapamanga y Río Frío, el alto grado de meteorización, el alto índice de relieve relativo y las pendientes abruptas a extremadamente abruptas, agrupan el 51% de los movimientos modelados. Algunas de las consecuencias de la ocurrencia de estos fenómenos en el área de estudio son la destrucción de cultivos de pancoger y cultivos comerciales de café y plátano, el bloqueo de las vías de acceso primarias y terciarias, la exposición permanente a incluso perder la vida, situación de la que se tiene un antecedente histórico; y se interrelacionan con diversas problemáticas socio ambientales, políticas y administrativas.

Para ampliar el contexto espacial de las afectaciones se aplicaron operaciones espaciales de conjuntos en ambiente SIG (uniones, intersecciones, otros), entre las capas del inventario y las divisiones municipales y veredales, con el objetivo de cuantificar la cantidad de eventos, las áreas, los tipos y hacer anotaciones adicionales sobre los mecanismos de falla (transversales, rotacionales y complejos) identificados y los deslizamientos/flujos no canalizados con aporte de material al cauce del Río Tona y en inmediaciones de la cabecera municipal.

**Tabla 19.**

*Descripción de los deslizamientos y flujos no canalizados en función de la división administrativa de la Microcuenca*

<b>Inventario de deslizamientos y flujos no canalizados, una aproximación territorial a la muy alta susceptibilidad en la microcuenca del Río Tona</b>									
Municipios	# de eventos	Área (ha)	Veredas	# de eventos	Área	# de Deslizamientos	Área (ha)	# de flujos no canalizados	Área (ha)
<b>Tona</b>	<b>692</b>	<b>89,4</b>	Alizal	27	7,85 ha	21	5,8	6	2,05
			<b>Armania</b>	134	17,07 ha	108	13,63	26	3,44
			<b>Babilonia</b>	144	11,65 ha	101	7,65	43	4
			Caragua	36	3,41 ha	27	1,97	9	1,44
			Cuestaboba	8	1,53 ha	8	1,53	0	0
			El Palmar	31	5,9 ha	30	5,74	1	0,16
			Guarumales	8	2,04 ha	4	0,67	4	1,37
			Monte Chiquito	36	13,33 ha	36	13,33	0	0
			Pirgua	42	6,17 ha	31	5,46	11	0,71
			Pitones	17	1,11 ha	14	1,04	3	0,07
			Quemado	49	4,72 ha	40	3,93	9	0,79
			Tembladal	15	2,15 ha	7	0,43	8	1,72
			Ucatá	7	0,25 ha	7	0,25	0	0
			<b>Vegas</b>	138	12,22 ha	121	10,45	17	1,77
<b>Bucaramanga</b>	<b>317</b>	<b>30</b>	Bolarquí Alto	15	1,55 ha	13	1,44	2	0,11
			<b>Gualilo Bajo</b>	57	5,76 ha	49	5	8	0,76
			<b>Monserate</b>	59	2,86 ha	50	2,48	9	0,38
			<b>Retiro Chiquito</b>	64	9,82 ha	56	9,45	8	0,37
			Retiro Grande - Acueducto	39	4,1 ha	35	3,84	4	0,26
			<b>Retiro Grande Parte Baja</b>	61	5,1 ha	60	5	1	0,1
			San José	22	0,9 ha	18	0,78	4	0,12
			<b>Total</b>	1009	119,42 ha	836	99,8	173	19,62
Un total de 1009 eventos con <b>119,42</b> ha afectadas, aproximadamente <b>178 canchas de fútbol</b>									
(DC:deslizamiento compuesto; DT:d. traslacional; DR:d. rotacional; DAP:d. con aportes al río; DIP: d. inmediaciones del pueblo; FIAP:flujo no canalizado con aportes al río.									
<b>Veredas de Tona:</b>					<b>Veredas de Bucaramanga:</b>				
Alizal: 1 DC, 1 DAR, 2 FIAP. - Armania: 9 DC, 2 DT, 2 DAR, 1 FIAP.					Bolarquí Alto: 1 DC - Gualilo Bajo: 2 DC, 11 DT				
Babilonia: 2 DC, 12 DT - El Palmar: 1 DC, 3 DAR, 2 DIP.					Monserate: 3 DC, 2 DT - Retiro Chiquito: 4 DC, 7 DT, 1 DR				
Monte Chiquito: 4 DC, 3 DT, 3 DR - Pirgua: 1 DC, 3 DT					Retiro Grande Acueducto: 3 DC, 1 DR				
Quemado: 1 DT, 1 DAR - Vegas: 8 DC, 3 DT, 1 DR					Retiro Grande Parte Baja: 5 DT				

De acuerdo con la tabla 19, se tiene que, en la microcuenca, la jurisdicción de Tona es la más afectada y agrupa el 68,5% de los movimientos, que representan el 74,88% del área total “movida”, por otro lado, la jurisdicción de Bucaramanga agrupa el 31,5 % de los movimientos, cuya área total movida es de 25,12%.

A su vez, en Tona las veredas con mayor cantidad de movimientos son Arnanía, Babilonia y Vegas con 134, 144 y 138 eventos cuyas áreas movidas son de 17,07 ha, 11,65 ha y 12,2 ha respectivamente. Se advierte que Monte Chiquito con apenas 36 eventos presenta un área movida de 13,33 ha. Mientras que en Bucaramanga las veredas con mayor cantidad de movimientos son: Gualilo Bajo, Monserrate, Retiro Chiquito y Retiro Grande Parte Baja con 57, 59, 64 y 61 eventos, cuyas áreas movidas son: 5,76 ha, 2,86 ha, 9,82 ha y 5,1 ha respectivamente.

En este orden de ideas, la susceptibilidad muy alta está dada primordialmente por 836 deslizamientos (45 compuestos, 49 traslacionales, 6 rotacionales, 7 con aportes o zonas de depósito en el río Tona y 2 en inmediaciones de las laderas de la cabecera municipal) que representan un área de 99,8 ha deslizadas; y 173 flujos no canalizados (3 con aportes o zonas de depósito en el Río Tona) que representan un área de 19,62 ha movidas. Además, se advierte que -en concordancia con las labores de inspección satelital durante la construcción del inventario de procesos- la deforestación por quema, por tala de árboles y la adecuación de terrenos para cultivos se correlacionan con la generación de movimientos en masa temporalmente en el siguiente orden:  $t_1$  → ausencia de mm;  $t_2$  → intervención antrópica y  $t_3$  → movimiento en masa; por esta razón fueron georreferenciadas y se incluyen en el análisis. Sin embargo, esta variable no se utilizó para calcular la función LSI, pero se concluye que: considerando que en la microcuenca hay una expansión gradual en las actividades turísticas y agropecuarias, ocasionalmente en zonas cuyos condicionantes presentan un  $W_f > 0$  y su LSI es alto generan una problemática puntual de la gestión

del riesgo puesto que la expansión de dichas actividades económicas debe tener en consideración la susceptibilidad del terreno para su óptimo desarrollo.

**Tabla 20.**

*Descripción de los deslizamientos y flujos no canalizados tipo puntos en función de la división administrativa de la Microcuenca del Río Tona*

<b>Inventario de deslizamientos y flujos no canalizados, una aproximación territorial a la muy alta susceptibilidad en la microcuenca del Río Tona</b>					
<b>Municipios</b>	<b># de eventos</b>	<b>Veredas</b>	<b># de eventos</b>	<b># de Deslizamientos</b>	<b># de flujos no canalizados</b>
<b>Tona</b>	397	Alizal	23	23	0
		Armania	85	83	2
		Babilonia	58	54	4
		Caragua	10	10	0
		Cuestaboba	4	4	0
		El Palmar	4	4	0
		Guarumales	4	3	1
		Monte Chiquito	14	14	0
		Pirgua	30	30	0
		Pitones	11	11	0
		Quemado	53	53	0
		Tembladal	11	9	2
		Ucatá	2	2	0
		Vegas	88	85	3
<b>Bucaramanga</b>	138	Bolarqui Alto	12	12	0
		Gualilo Bajo	18	18	0
		Monsserrate	41	41	0
		Retiro Chiquito	19	19	0
		Retiro Grande - Acueducto	10	10	0
		Retiro Grande Parte Baja	24	24	0
		San José	14	14	0
<b>Total</b>			535	523	12

Se presenta una tendencia similar a las apreciaciones hechas para el inventario de polígonos, nuevamente Tona está mayormente afectada y Bucaramanga sigue presentando una concentración preocupante de movimientos. A su vez, las veredas Vega, Armania, Babilonia, Quemado y Monsserrate, presentan la mayor distribución de puntos.

A continuación, se mostrará la información de las categorías alta, media y baja de la zonificación obtenida en este estudio:

**Tabla 21.***Cuantificación de las categorías de susceptibilidad en la Microcuenca del Río Tona*

<b>Información de las Categorías de la susceptibilidad por deslizamientos y flujos no canalizados</b>									
Susceptibilidad	Área (ha)	% (AT)	# de puntos	% mm	# de polígonos	% mm	Área (ha)	% área	# de casas
Alta	6130	32%	328	61%	577	57,2%	43,42	36,67%	346
Media	10050	52%	149	28%	323	32%	41	34,33%	483
Baja	3212	16%	58	11%	109	10,8%	35	29%	344
<b>Total</b>	<b>19392 ha</b>		<b>535</b>		<b>1009</b>		<b>119,42 ha</b>		<b>1173</b>

**Susceptibilidad alta:** corresponde al 32% del área de la microcuenca con 6130ha (61,3 km<sup>2</sup>), del inventario de movimientos agrupa 327 puntos y 577 polígonos de deslizamientos y/o flujos no canalizados, un aproximado de 43,42 ha movidas y se presenta principalmente en las vertientes de la zona occidental en sentido W-E desde el Embalse de Bucaramanga hasta inmediaciones de la cabecera municipal de Tona y en menor medida en inmediaciones de la quebrada Río Sucio.

Su zonificación se relaciona con rocas de mala a muy mala calidad, el predominio de geoformas de origen estructural y denudacional, pendientes abruptas a extremadamente abruptas y en general intensos procesos de erosión, meteorización y control estructural.

Adicionalmente, la expansión de las actividades agrícolas de cultivos de café y plátano suelen hacerse de manera “no planificada” (para no decir descontrolada) en estas zonas, a su vez que las vías primarias, terciarias y los caminos reales de mayor importancia para los pobladores se encuentran mayoritariamente en esta categoría, sumado a que condiciona a un daño potencial a aproximadamente 346 casas (y diversas infraestructuras: potreros, cercas, postes de luz, red artesanal de acueducto, marraneras, salones de acopio, etc.) con mención espacial del colegio rural integrado Rafael Uribe Uribe – Escuela Palma, donde estudian por lo menos unos 20 niños, niñas y adolescentes y el centro Poblado Villaverde, con aproximadamente 70 hab.

Se advierte que en períodos de intensas precipitaciones es muy probable que las zonas de depósito de los deslizamientos y flujos no canalizados que ocurran en esta área puedan llegar a hacer aportes de material a los afluentes y al cauce principal del Río Tona, con consecuencias gravísimas y alarmantes.

Las veredas con mayor área susceptible a la ocurrencia de estos movimientos en la jurisdicción de Tona son: Arnanía, Vegas, Pirguá y Babilonia, mientras que en Bucaramanga lo son: Retiro Chiquito, Retiro Grande Acueducto y Monserrate, lo cual se correlaciona con la gran densidad de movimientos registrados en esas veredas.

Nota: El Apéndice J presenta las características cuantitativas de la alta susceptibilidad en función de la división veredal de la Microcuenca del Río Tona.

**Susceptibilidad media:** corresponde al 52% de la microcuenca con 10.050ha (100,5 km<sup>2</sup>), del inventario de movimientos agrupa 149 puntos y 323 polígonos de deslizamientos y/o flujos no canalizados, un aproximado de 41 ha movidas. Su distribución está dada a lo largo de toda la microcuenca, ocasionalmente hay áreas de esta categoría en la región austral, pero presenta un dominio espacial hacia la parte central y superior y hacia los márgenes laterales en sentido N-S.

Esta región posee rocas de calidad regular a mala, geoformas de origen estructural, denudacional y fluvial y presenta un patrón de pendientes moderadamente abruptas a abruptas, pisos climáticos diferenciados desde cálido a páramo y procesos bajos/intermedios de erosión y meteorización.

Entre otras cosas, se presenta una expansión a menor escala de las actividades agrícolas, predomina la cobertura arbórea con gran densidad de vegetación, lo cual da al terreno una moderada permeabilidad pluvial y mayor resistencia a la erosión superficial por el soporte de las raíces en el suelo. En esta categoría hay un aproximado de 483 casas. Eventualmente, la

priorización de lugares en esta categoría debe enfocarse en los movimientos activos con monitoreos continuos en los procesos de reptación y erosión superficial.

Las veredas con mayor área de susceptibilidad media a la ocurrencia de estos movimientos en la jurisdicción de Tona son: Quemado, Alizar y Pirgua, mientras que en Bucaramanga los porcentajes de área no alcanzan ni el 1% debido al alto predominio espacial de la alta susceptibilidad.

Nota: El Apéndice K presenta las características cuantitativas de la susceptibilidad media en función de la división veredal de la Microcuenca del Río Tona.

**Baja susceptibilidad:** corresponde al 16% de la microcuenca con 3212ha (32 km<sup>2</sup>), del inventario de movimientos agrupa 58 puntos y 109 polígonos de deslizamientos y/o flujos no canalizados, un aproximado de 35 ha movidas. Se hace la aclaración que para esta descripción espacial se utilizó toda el área de los polígonos, por lo que las hectáreas referidas corresponden principalmente a las zonas de depósito en el cauce del río/terrazas de acumulación que fueron refinadas (omitidas) para el cálculo de la función LSI, por lo que no son significativos en esta categoría de zonificación.

Siguiendo con la discusión, su distribución está dada en todo el ambiente fluvial controlado por el Río Tona y sus afluentes, el paisaje glaciar en las zonas de páramo al margen NE, por la ladera estructural de sierra sinclinal del Picacho y la ladera de contrapendiente de los esquistos de Silgará en inmediaciones NW de la cabecera municipal, además las rocas presentan una calidad regular a mala, caracterizándose principalmente por pendientes planas a inclinadas y ocasionalmente moderadamente abruptas, sin embargo, hay indicios de fuerte erosión superficial debido a la gelifluxión que genera carcavamientos profundos e intervenciones antrópicas (vías, etc.) con rasgos indicativos de erosión superficial.

Llama la atención que durante las visitas de campo y, en general, en los reportes de situaciones de riesgo, los depósitos fluviales presentan múltiples movimientos (caída de banca, deslizamientos) asociados al desgaste que generan los materiales de arrastre del río y, que a partir de diversas metodologías de estudio para la zonificación de otros movimientos en masa (avenidas Torrenciales), pueden ser adecuadamente incluidos en el análisis del riesgo. Para dar por terminado este apartado, una cantidad importante de dichos movimientos ocurrieron y/o incidieron en la zona donde posteriormente se construyó el embalse de Bucaramanga, los cuales fueron omitidos en el cálculo de los  $W_f$  para la función LSI.

Nota: El Apéndice L presenta las características cuantitativas de la susceptibilidad baja en función de la división veredal de la Microcuenca del Río Tona.

## 9. Conclusiones

Esta investigación logró compilar un gran volumen de información espacial de referencia para futuras investigaciones en la microcuenca del Río Tona, con aportes significativos al conocimiento cartográfico de la geología, geomorfología, los procesos morfodinámicos y la zonificación de la susceptibilidad a deslizamientos y flujos no canalizados a escala 1:25.000. Así mismo, la aplicación de la guía metodológica del SGC permitió desarrollar un trabajo sistemático con resultados objetivos y cuantitativos, mediante la aplicación del método estadístico bivariado de pesos de evidencia ( $W_oF_e$ ) y el criterio experto, construyéndose un modelo actualizado cuyo desempeño o ABC es del 80% y su capacidad predictiva del 79%, el cual cumple con los requisitos mínimos para ser incluido en la gestión del riesgo dentro de los planes de ordenamiento Territorial de los municipios de Tona y Bucaramanga.

De este modo, la microcuenca del Río Tona es un territorio en el que la combinación espacio temporal de los procesos morfodinámicos, las características geoambientales, los factores climáticos y las actividades antrópicas han generado por lo menos 1.571 movimientos en masa en los últimos quince años, principalmente de tipo deslizamientos (1.376) y flujos no canalizados (178) los cuales han ocasionado graves situaciones de riesgo. En síntesis, el modelo de susceptibilidad permitió realizar la siguiente zonificación: la categoría alta afecta unas 6.130 ha (32% AT) principalmente en las veredas de Arnanía, Vegas, Pirgua, Babilonia, Quemado, Monte Chiquito, Retiro Chiquito, Retiro Grande acueducto y Monserrate; la categoría media se da en 10.050 ha (52% AT) a lo largo de toda el área de estudio, mientras que solamente 3.212 ha (16% AT) presentan susceptibilidad baja.

A su vez, los factores condicionantes con mayor correlación positiva son las pendientes  $>35^\circ$ , la curvatura de plano de tipo cóncava, las subunidades geomorfológicas de origen denudacional “Sierras denudadas y Escarpes Facetados”, el 44% de las subunidades del ambiente estructural, en especial los “espolones facetados altos de longitud corta, las facetas triangulares y los ganchos de flexión” y las “Laderas explanadas de vías” de origen antrópico; por último las rocas de muy mala calidad del Neis de Bucaramanga, de la Cuarzomonzonita de la Corcova y de la Formación Rosablanca son los factores que dan al terreno una alta probabilidad de ocurrencia de deslizamientos y flujos no canalizados.

Por otro lado, pese a que el método implementado arrojó buenos resultados, presenta limitaciones para representar la realidad del terreno en inmediaciones del embalse de Bucaramanga (movimientos subacuáticos), la terraza de acumulación del Río Tona y el casco urbano, por lo que no explica la ocurrencia de deslizamientos en estas zonas.

## 10. Recomendaciones

La Microcuenca del Río Tona es un área de gran importancia para el desarrollo del departamento de Santander en términos de sostenibilidad ambiental y la protección del agua, la seguridad alimentaria, la recreación y el turismo, entre otros. La gestión integral de esta cuenca hidrográfica demanda la ejecución de múltiples políticas, estrategias y acciones de ordenamiento, planificación, administración y desarrollo del territorio que superan las capacidades económicas y humanas de un solo administrador u alcaldía. Una de las soluciones propuestas es incluir dicha cuenca en la denominada “Área Metropolitana de Bucaramanga”, primero porque ya hace parte de ella en un 9% y segundo porque el municipio de Tona presenta una estrecha relación física, ambiental, económica y social, etc. con 3 de los 4 municipios que la conforman: Bucaramanga, Floridablanca y Piedecuesta.

Por otra parte, para obtener un cálculo más preciso de la función LSI debe incluirse la capa de coberturas y usos del suelo a escala 1:25.000, esto permitiría discriminar mejor las categorías de susceptibilidad y además contribuir a la formulación de hipótesis de falla más rigurosas.

Otras labores que deben hacerse para el refinamiento del modelo de susceptibilidad son las de dividir los polígonos del inventario de movimientos en zonas de inicio y depósito, y determinar la susceptibilidad para cada parte de los deslizamientos y/o flujos no canalizados.

Además, se debe complementar este análisis teniendo en cuenta los factores detonantes, principalmente las precipitaciones, para estudiar la probabilidad temporal de ocurrencia mediante la zonificación de la amenaza.

Adicionalmente, es necesario profundizar en el estudio del riesgo por deslizamientos y flujos no canalizados a través de estudios más detallados a nivel de laderas en inmediaciones del embalse de Bucaramanga y la cabecera municipal de Tona.

Siguiendo este orden de ideas, en la microcuenca se deben realizar estudios multiamenazas donde se incluyan los movimientos en masa tipo caída y avenidas torrenciales. También sería muy conveniente aplicar métodos estadísticos multivariados como lo son los análisis discriminantes, la regresión logística y el análisis condicional.

Complementariamente, se deben llevar a cabo estrategias geoeducativas para que las comunidades comprendan y se adapten adecuadamente a los fenómenos naturales que tienen ocurrencia en su territorio y se incentive la conformación de comités rurales o comunitarios de gestión del riesgo. También se recomienda el cumplimiento de la prevención y gestión del riesgo por parte de las entidades del estado competentes con la puesta en marcha de campañas de monitoreo de los movimientos en masa (labores de campo y sensores remotos), el desarrollo de cartografías más detalladas (1:10.000 – 1:5.000 – 1:1.000) para las variables condicionantes, la estimación y análisis de umbrales críticos de lluvias detonantes, la implementación de mecanismos para la generación de alertas temprana, la señalización adecuada de las vías y los puntos críticos e investigaciones/intervenciones con enfoque multidisciplinario.

## **11. Futuras tareas que se realizarán**

La gestión y el esfuerzo de los autores de la investigación tuvieron como resultado la formalización de un espacio con la comunidad para la socialización de los resultados de este ejercicio académico y se llevarán a cabo una serie de actividades pedagógicas con el propósito de

generar aportes a la gestión del riesgo y prevención de desastres, principalmente a través de una participación activa en el fortalecimiento de la “Iniciativa de particulares y personas naturales habitantes de Tona: “Creación de un comité Rural y Comunitario de Gestión del Riesgo” para lo cual se han planteado las siguientes actividades:

**Tabla 22.**

*Actividades propuestas para el apoyar la iniciativa de "creación de un comité rural y comunitario de Gestión del Riesgo*

INICIATIVA DE PARTICULARES Y PERSONAS NATURALES HABITANTES DE TONA: "CREACION DE UN COMITÉ RURAL Y COMUNITARIO DE GESTION DEL RIESGO" MUNICIPIO DE TONA - SANTANDER.						
DIA	LUGAR	HORA	CONVOCADOS	ACTIVIDAD	DURACIÓN	ENCARGADOS
DIA1 SABADO 27 MAYO DE 2023	COLISEO CASCO URBANO	8:00 a. m.	TODOS LOS HABITANTES Y AUTORIDADES DEL MUNICIPIO DE TONA	<b>INTRODUCCION</b> a la Iniciativa. <b>Exposición Resultados de la Investigación:</b> "Zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa a escala 1:25.000 en la Microcuenca del Río Tona" <b>Socialización:</b> "Diagnóstico Geotécnico de socavaciones en el casco urbano del Municipio causadas por el río y sus posibles soluciones"	3 HORAS	Ing. S.T.T. Angela Celis Ing. Nicolas Mantilla Vol. D.C.C. Ferney Ramos Estudiantes Tesistas U.I.S. Andrés Felipe Guevara Joya Joel David Ramos Martínez T.S. Diana Romero Dr. Jairo Barroso Gloria Franco
	COLISEO CASCO URBANO	2:00 p. m.	TODOS LOS HABITANTES Y AUTORIDADES DEL MUNICIPIO DE TONA	<b>APRENDO SOBRE GESTION DEL RIESGO Y SUS PALABRAS</b> <b>Jornada de geoeducación</b> en Terminología sobre Gestión del Riesgo de Desastres y Fenómenos Amenazantes.	3 HORAS	Estudiantes Tesistas U.I.S. Andrés Felipe Guevara Joya Joel David Ramos Martínez T.S. Diana Romero
DIA2 DOMINGO 28 MAYO DE 2023	COLISEO CASCO URBANO	8:00 a. m.	TODOS LOS HABITANTES Y AUTORIDADES DEL MUNICIPIO DE TONA	<b>PARTICIPO Y APORTO</b> <b>Taller de cartografía social:</b> Percepciones y Situaciones de Riesgo por movimientos en masa en la microcuenca del Río Tona.	4 HORAS	Estudiantes Tesistas U.I.S. Andrés Felipe Guevara Joya Joel David Ramos Martínez T.S. Diana Romero Gloria Franco
VISITAS DE CAMPO A COORDINAR	VIA KM 18 - TONA	6:00 a. m.	VOLUNTARIOS ACOMPAÑANTES DE APOYO A LABOR DE CAMPO DE LOS FUTUROS GEOLOGOS	<b>Visita de inspección de campo:</b> Recorridos en la vía principal desde el Mortiño hasta el Casco Urbano de Tona con paradas en cada deslizamiento y visitar las inmediaciones de la Quebrada Río Sucio.	6 a 8 HORAS	Estudiantes Tesistas U.I.S. Andrés Felipe Guevara Joya Joel David Ramos Martínez
PROXIMAS JORNADAS DE CAPACITACION A COORDINAR	A CONVENIR	A CONVENIR	TODOS LOS HABITANTES Y AUTORIDADES DEL MUNICIPIO DE TONA	<b>Capacitación:</b> Uso de herramientas tecnológicas útiles para fortalecer el comité rural y comunitario de gestión del riesgo.	A CONVENIR	Estudiantes Tesistas U.I.S. Andrés Felipe Guevara Joya Joel David Ramos Martínez T.S. Diana Romero
	A CONVENIR	A CONVENIR	TODOS LOS HABITANTES Y AUTORIDADES DEL MUNICIPIO DE TONA	<b>Capacitación:</b> Normatividad de la gestión del riesgo y prevención de desastres.	A CONVENIR	Estudiantes Tesistas U.I.S. Andrés Felipe Guevara Joya Joel David Ramos Martínez T.S. Diana Romero
	A CONVENIR	A CONVENIR	TODOS LOS HABITANTES Y AUTORIDADES DEL MUNICIPIO DE TONA	<b>Capacitación:</b> Como estar preparado para emergencias comunitarias y como organizar brigadas y acciones adecuadas en caso de desastres	A CONVENIR	Voluntarios especialistas en gestion del riesgo.

**Referencias Bibliográficas**

- Alcántara, Irasema. (2000). *Landslides: ¿deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificaciones y terminología*. Investigaciones Geográficas (Mx). 41, 7-25.
- Alcaldía municipal de Tona, Santander. (2002). *Esquema de ordenamiento territorial municipio de Tona*.
- Ariztizábal, E., Vásquez, M., & Ruíz, D. (2019). Métodos estadísticos para la evaluación de la susceptibilidad por movimientos en masa. *TecnoLógicas*, 22(46), 39-60.
- Bejarano, D., & Navas, A. (2018). *Análisis estructural de los patrones de fracturamiento y su relación con el flujo de aguas subterráneas en inmediaciones del municipio de Tona, Macizo de Santander*. Bucaramanga: Universidad Industrial De Santander.
- CDMB. (2014). *Actualización POMCA Rio Alto Lebrija plan de ordenacion y manejo de la cuenca hidrografica*. Bucaramanga. <http://hdl.handle.net/20.500.11762/32596>
- CDMB. (2020). *Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica (POMCA), río alto Lebrija*. <http://hdl.handle.net/20.500.11762/32596>
- CRCIS. (2018). *Proyectos Estratégicos: Regulación del Río Tona - Embalse de Bucaramanga*. <https://www.santandercompetitivo.org/proyectos-estrategicos/en-ejecucion/regulacion-del-rio-tona-embalse-de-bucaramanga/>
- CMGRD. (2013) *Plan Municipal para la Gestión del Riesgo de Desastre, Municipio de Tona, Santander*. <https://1library.co/document/zwv7807q-plan-municipal-gestion-riesgo-municipio-tona-santander.html>
- Cruden, D. (1991). A simple definition of a landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 43, 27-29. doi:<https://doi.org/10.1007/BF02590167>

Decreto 1807 de 2014. Por el cual se reglamenta el artículo 189 del Decreto-ley 019 de 2012 en lo relativo a la incorporación de la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial y se dictan otras disposiciones. 19 de septiembre de 2014. Diario Oficial No. 49279. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=59488>

Decreto 1077 de 2015. Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio. 26 de mayo de 2015. Diario Oficial No. 49523. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=77216>

Departamento Administrativo Nacional de Estadística - DANE. (2018) *Censo nacional de población y vivienda 2018*. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/censo-nacional-de-poblacion-y-vivenda-2018>

García, C., & Ríos, C. (1999). Metamorfismo y metalogenia asociada del Macizo de Santander, cordillera Oriental, Colombia. *Boletín de Geología*.

García, C., Ríos, C., & Castellanos, O. M. (2005). Medium - Pressure Metamorphism in the Central Santander Massif, Easter Cordillera, Colombian Andes. *Boletín de Geología*.

Hincapié, G., & Veloza, J. (2009). Informe hidrogeológico del Macizo de Santander. Bogotá: INGEOMINAS.

IGAC. *Bases de datos vectoriales por hojas cartográficas*. (2005) <https://www.colombiaenmapas.gov.co/#>

Jimenez, C. (2016). *Caracterización petrológica y geoquímica de la unidad Ortoneis, Macizo de Santander, Colombia*. Bucaramanga.

Ley 1523 de 2012. Por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones. 24 de abril de 2012. Diario Oficial No. 48411. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=47141>

Nieto Loza, K. y Díaz Díaz, X. (2016) Diagnóstico de la falla presentada en el talud localizado en el km22 sobre la vía Bucaramanga-Tona, sector vereda Caragua Bajo Finca del Porvenir,

- Departamento de Santander. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.  
<http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2016/164644.pdf>
- Osorio, L., & Salazar, O. (2006). Cartografía geológica y caracterización estructural de la subcuenca del río Tona, Macizo de Santander, con fines hidrogeológicos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Prada Chavez, O. y Serrano Plata, E. (2009) Análisis y determinación de la Amenaza de inestabilidad de los taludes, generado por su saturación y desembalse, en el proyecto de regulación del Río Tona- Embalse De Bucaramanga. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2009/130024.pdf>
- Proyecto Multinacional Andino (PMA) (2007). Geociencias para las Comunidades Andinas (GCA). Movimientos en Masa de la Región Andina: Una Guía para la Evaluación de Amenazas. <https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/Geral-96.pdf>
- Royero, J., & Clavijo, J. (2001). Mapa Geológico generalizado de Santander. Escala 1:400.000. Memoria Explicativa. Ingeominas, Bogotá.
- SGC. (2017). Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:25.000. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.  
[https://www2.sgc.gov.co/Archivos/GM\(2017\).pdf](https://www2.sgc.gov.co/Archivos/GM(2017).pdf)
- SGC. (2015) Mapa Nacional de Amenaza por Movimientos en Masa, escala 1:100.000.  
[http://geoportal.sgc.gov.co/Flexviewer/Amenaza\\_Movimiento\\_Remocion\\_Masa/](http://geoportal.sgc.gov.co/Flexviewer/Amenaza_Movimiento_Remocion_Masa/)
- SGC. (2022). Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA).  
<http://simma.sgc.gov.co/#/public/results/>
- Terzaghi, Karl. (1950). Mechanism of Landslides. Application of geology to engineering practice.  
<https://doi.org/10.1130/Berkey.1950.83>
- Ulloa Alexandra y Gómez Sully (2007): Memoria explicativa de la investigación geológica e hidrogeológica en el macizo de Santander. Instituto Colombiano de Geología y Minería y Universidad Industrial de Santander:

UNGRD. (19 de Agosto de 2020). Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres. Recuperado el 25 de Febrero de 2021, de Unidad Nacional para La Gestión del Riesgo de Desastres.

Urueña, C., & Zuluaga, C. (2011). Petrografía del Neis de Bucaramanga en cercanías a Cepitá, Berlín y Vetas - Santander. *Geología Colombiana*, 36(1).

Varnes, David. (1958). Landslide Types and Processes. En Committee on Landslide Investigations,

Landslides and Engineering Practice (pp. 20-47). Editorial Staff. <https://doi.org/10.1130/Berkey.1950>

Varnes, David. (1978). Slope Movement Types and Processes. <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/sr/sr176/176-002.pdf>

Van Westen, C. (2013). Guidelines for the generation of 1:50.000 scale landslide inventory, susceptibility maps, and qualitative risk maps, illustrated with case studies of the provinces Thanh Hoa and Nghe An. University of Twente

Ward, D., Goldsmith, R., Cruz, J., & Restrepo, H. (1973). Geología de los cuadrangulos H-12 Bucaramanga y H-13 Pamplona. *Boletín Geologico* .