

PRÁCTICA EMPRESARIAL  
ESTUDIO DE LA SUSCEPTIBILIDAD GEOLÓGICA Y GEOMORFOLÓGICA  
MEDIANTE INTERPRETACIÓN DE FOTOGRAFÍAS AÉREAS CON DRONE A  
ESCALA 1:2000 DE LAS VEREDAS PARAMITO Y SOPOTÁ DEL MUNICIPIO DE  
TOLEDO NORTE DE SANTANDER

LIZETH PAOLA LIÉVANO GALVIS



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO QUÍMICAS  
ESCUELA DE GEOLOGÍA  
BUCARAMANGA  
2016

PRÁCTICA EMPRESARIAL  
ESTUDIO DE LA SUSCEPTIBILIDAD GEOLÓGICA Y GEOMORFOLÓGICA  
MEDIANTE INTERPRETACIÓN DE FOTOGRAFÍAS AÉREAS CON DRONE A  
ESCALA 1:2000 DE LAS VEREDAS PARAMITO Y SOPOTÁ DEL MUNICIPIO DE  
TOLEDO NORTE DE SANTANDER

LIZETH PAOLA LIÉVANO GALVIS  
TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
GEÓLOGA

DIRECTOR  
EDWIN FERNANDO MENDOZA BELTRÁN  
GEÓLOGO

CODIRECTOR  
CARLOS ANDRÉS BUENAHORA BALLESTEROS  
INGENIERO CIVIL MSc



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO QUÍMICAS  
ESCUELA DE GEOLOGÍA  
BUCARAMANGA

2016

## **Dedicatoria**

***A mí querida madre Elena Antonia, quien con su esfuerzo, dedicación y amor forjó junto conmigo este gran triunfo.***

## **Agradecimientos**

En primer lugar a Dios que está conmigo en cada paso de mi vida, a John por su apoyo durante mi etapa en la universidad, a mis hermanos por ser mi ejemplo a seguir y a mi familia quien siempre creyó en mí.

Al Ingeniero Carlos Andrés Buenahora quien se convirtió en mi maestro y confió en mí como profesional, a las Ingenieras Stella Bravo y Luz Adriana Buenahora por abrirme las puertas de la empresa E.D INGEOTECNIA S.A.S y permitirme trabajar junto a ellas.

Y especialmente un agradecimiento infinito a los Ingenieros Anderson, Julián, Fabián y Martha quienes me apoyaron durante mi práctica empresarial dedicando su tiempo y aportando sus conocimientos al desarrollo de este trabajo, a quienes siempre estuvieron ahí con palabras amables Dianita, Omar, Carolina, Elizabeth y los señores de campo.

Porque nada de esto hubiese sido posible sin ustedes, gracias por permítame celebrar hoy la culminación de esta meta.

## CONTENIDO DEL ESTUDIO

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>13</b>
<b>CAPÍTULO 1. GENERALIDADES .....</b>	<b>14</b>
1.1 OBJETIVOS.....	14
1.1.1 GENERAL.....	14
1.1.2 ESPECÍFICOS .....	14
1.1.3 LOCALIZACIÓN REGIONAL .....	14
1.2 ALCANCE DEL ESTUDIO.....	16
<b>CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA .....</b>	<b>17</b>
<b>CAPÍTULO 3. INSUMOS .....</b>	<b>20</b>
3.1 FOTOGRAFÍAS AÉREAS .....	20
3.2 GEOLOGÍA.....	22
3.3 CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA .....	23
3.3.1 Rocas Sedimentarias.....	23
3.3.2 Depósitos Cuaternarios .....	24
3.3.3 Columnas estratigráficas generalizadas:.....	26
3.3.4 Tectónica .....	27
3.3.5 REGISTRO FOTOGRÁFICO DE CAMPO.....	29
3.4 GEOMORFOLOGÍA .....	33
3.4.1 MORFOGÉNESIS .....	34
3.4.2 MORFODINÁMICA .....	47
3.4.3 MORFOMETRÍA .....	52
<b>CAPÍTULO 4. SUSCEPTIBILIDAD .....</b>	<b>54</b>
4.1 GEOLOGÍA.....	54
4.1.1 Resistencia.....	56
4.1.2 Densidad de fracturamiento .....	58
4.1.3 Susceptibilidad geológica.....	60
4.2 GEOMORFOLOGÍA .....	60
4.2.1 MORFOGÉNESIS .....	61
4.2.2 MORFODINÁMICA .....	62
4.2.3 MORFOMETRÍA .....	68
<b>CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES.....</b>	<b>76</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>77</b>

## LISTADO DE IMÁGENES

Imagen 1 Ubicación geográfica del área de estudio .....	15
Imagen 2 Uso de SIG para análisis heurístico de susceptibilidad. ....	17
Imagen 3 Diagrama metodológico para la zonificación de amenaza. ....	19
Imagen 4 Fotografía aérea tomada con Drone eBee .....	20
Imagen 5 Fotografía aérea de monitoreo tomada con Drone eBee .....	21
Imagen 6 Fotografía aérea 3D de monitoreo tomada con Drone eBee .....	21
Imagen 7 Fotografía aérea 3D de monitoreo tomada con Drone eBee .....	22
Imagen 8 Mapa Geológico General.....	23
Imagen 9 Vista general de la geología del área de estudio refinada. ....	26
Imagen 10 Columna estratigráfica generalizada Cuenca del Catatumbo .....	27
Imagen 11 Intercalaciones de Areniscas blancas-amarillentas y lodolitas grises, pertenecientes a la Formación Mirador .....	29
Imagen 12 Arenisca amarillenta de matriz lodosa, y lodolitas fisiles, perteneciente a la Formación Mirador.....	30
Imagen 13 Deslizamiento traslacional, sobre roca pertenecientes a la Formación Mirador .....	30
Imagen 14 Paquetes de areniscas pertenecientes a la Formación Carbonera.....	31
Imagen 15 Lodolitas grises-amarillentas pertenecientes a la Formación Carbonera .....	31
Imagen 16 Depósito Coluvión, generado sobre rocas de la Formación Mirador al Sur del área en estudio .....	32
Imagen 17 Depósito coluviones provenientes del escarpe y asociados a rocas de la Formación Carbonera .....	33
Imagen 18 Descripción de los ambientes Morfogenéticos por porcentaje .....	35
Imagen 19 Mapa de ambientes Morfogenéticos .....	36
Imagen 20 Terracetas en la zona Sur del lugar de estudio .....	37
Imagen 21 Vista de una zona de explanación para vivienda .....	38
Imagen 22 Zona de terrazas agrícolas para el cultivo de Plátano y Yuca.....	38
Imagen 23 Depósito coluvial por origen Hidrogravitacional.....	39
Imagen 24 Deslizamiento Rotacional presente en la zona central de la variante .....	40
Imagen 25 Deslizamiento traslacional, tomado de la corona de deslizamiento .....	41
Imagen 26 Deslizamiento traslacional, tomado de la base .....	41
Imagen 27 Cono flujos de detritos registrado en la zona de estudio .....	42
Imagen 28 Ladera ondulada presente en la zona de estudio .....	43
Imagen 29 Montículos y ondulaciones presentes en la zona de estudio .....	44
Imagen 30 Reptaciones presentes en los montículos .....	44
Imagen 31 Ladera en contra pendiente de la formación Carbonera .....	46
Imagen 32 Ladera a favor de la pendiente de la formación Carbonera.....	46
Imagen 33 Flujo de detritos característico de la zona de estudio .....	50

Imagen 34 flujo de lodo y detritos conectados entre sí característicos de la zona de estudio. ....	51
Imagen 35 Flujo de lodo y tierra .....	52
Imagen 36 Diagrama gerarquico de suceptibilidad.....	54
Imagen 37 Implementación de los depósitos en las unidades geológicas restituidas .....	55
Imagen 38 Diagrama susceptibilidad geológica .....	56
Imagen 39 Categorías de resistencia a la compresión simple de las rocas, según Hoek 1997. ....	57
Imagen 40 Mapa de calificación por resistencia en el área de estudio. ....	58
Imagen 41 Mapa de calificación por densidad de fracturamiento en el área de estudio. .	60
Imagen 42 Diagrama susceptibilidad geomorfológica .....	61
Imagen 43 Mapa de unidades morfogenéticas calificadas.....	62
Imagen 44 Diagrama susceptibilidad morfométrica .....	68
Imagen 45 Mapa de calificación por pendientes en el área de estudio. ....	69
Imagen 46 Mapa de calificación por rugosidad en el área de estudio.....	71
Imagen 47 Diagrama de flujo para el cálculo de la variable acuenca. ....	72
Imagen 48 Mapa de calificación por acuenca en el área de estudio. ....	73
Imagen 49 Monitoreo a sitios de inestabilidad más representativos del área de estudio .	74
Imagen 50 Monitoreo a sitios de inestabilidad más representativos del área de estudio .	75

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Calificación de la amenaza.....	19
Tabla 2 Total de área cubierta por Ambiente Morfogenético .....	35
Tabla 3 Calificación del atributo de Relieve Relativo .....	48
Tabla 4 Calificación del atributo de inclinación de la Ladera .....	48
Tabla 5 Propuesta de calificación de las rocas según su resistencia. ....	57
Tabla 6. Calificación del atributo de Relieve Relativo.....	63
Tabla 7. Calificación del atributo de inclinación de la Ladera.....	63
Tabla 8 Calificación y descripción de los movimientos cartografiados. ....	64
Tabla 9 Calificación de variable pendiente .....	68
Tabla 11 Calificación de variable acuenca .....	72

## Resumen

**TÍTULO:** ESTUDIO GEOLÓGICO Y GEOMORFOLÓGICO MEDIANTE INTERPRETACIÓN DE FOTOGRAFÍAS AÉREAS A ESCALA 1:2000 DE LAS VEREDAS PARAMITO Y SOPOTÁ DEL MUNICIPIO DE TOLEDO – NORTE DE SANTANDER\*

**AUTOR:** LIZETH PAOLA LIÉVANO GALVIS\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Geomorfología, Morfometría, Morfogénesis, Morfodinámica.

La topografía característica del municipio de Toledo, presenta pendientes de más del 30% aproximadamente en un 69,6% de su territorio, generando alta susceptibilidad a sufrir procesos de remoción en masa y posibles avalanchas que atentan contra la población, el ecosistema, los recursos hídricos y algunas líneas transportadoras de energía que pasan por el sector.

En la actualidad, el municipio cuenta con estudios geológicos a escalas regionales, los cuales no detallan características geológicas, geomorfológicas y estructurales necesarias para zonificar con exactitud los lugares afectados por los deslizamientos, no se tienen inventariadas dichas zonas con alto riesgo, ni se hacen seguimientos que determinen la situación actual del terreno. Este documento presenta la descripción del trabajo realizado en la empresa E.D. Ingeotecnia S.A.S, el cual consistió en el estudio de la susceptibilidad por fenómenos de remoción en masa que actualmente afectan la infraestructura de un ducto transportador de gas que pasa por los sectores de las veredas Paramito y Sopotá pertenecientes a dicho municipio, se analizaron las condiciones del terreno mediante levantamientos planimétricos con DRONE eBee Ag (aviones no tripulados) y como resultado se obtuvo un inventario geomorfológico (morfometría, morfogénesis y morfodinámica) que permitió definir las condiciones actuales del terreno de estudio y realizar el respectivo análisis de estabilidad tomando como referencia La Metodología para la Zonificación de la Susceptibilidad y la Amenaza Relativa por Movimientos en Masa, elaborada por el Servicio Geológico Colombiano (SGC).

---

\*Proyecto de Grado. Modalidad Práctica Empresarial.

\*\*Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. UIS. Director: Edwin Fernando Mendoza Beltrán. Codirector: Carlos Andrés Buenahora Ballesteros

## ABSTRACT

**TITLE:** STUDY GEOLOGICAL AND GEOMORPHOLOGICAL INTERPRETATION OF AERIAL PHOTOGRAPHS BY SCALE 1: 2000 OF THE PATHS SOPOTÁ PARAMITO AND THE MUNICIPALITY OF TOLEDO - NORTE DE SANTANDER \*

**AUTOR:** LIZETH PAOLA LIÉVANO GALVIS\*\*

**KEYWORDS:** GEOMORPHOLOGY, GEOLOGY, MORPHOMETRY, MORPHOGENESIS, MORPHODYNAMICS, LANDSLIDES.

The characteristic topography of the city of Toledo, has outstanding approximately more than 30% in 69.6% of its territory, generating high susceptibility to landslide processes and possible avalanches that threaten the population, ecosystem, resources water and some conveyor power lines that pass through the sector. Currently, the municipality has geological studies at regional scales, which are not detailed geological, geomorphological and structural need for zoning exactly the places affected by landslides, they not have inventoried those areas at high risk, and monitoring are made to determine the current status of the land.

This paper presents the description of the work done in the company ED Ingeotecnia SAS, which was to study the susceptibility of landslide phenomena currently affecting the infrastructure of a conveyor gas duct passing through the areas of Paramito and Sopotá paths belonging to the municipality, where conditions were analyzed current ground by planimetric surveys with dRONE eBee Ag (drones); resulted in a geomorphological inventory (morphometry, morphogenesis and morphodynamics) allowing current conditions define the field study and thus make the respective analysis of stability by reference methodology for susceptibility and Zoning Threat Relative Movements was obtained mass prepared by the Colombian Geological Service (QMS).

\*Proyecto de Grado. Modalidad Práctica Empresarial.

\*\*Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. UIS. Director: Edwin Fernando Mendoza Beltrán. Codirector: Carlos Andrés Buenahora Ballesteros

## 1. INTRODUCCIÓN

El presente informe contiene los resultados del estudio geológico y geomorfológico realizado en las veredas de Sopotá y Paramito como objeto de saber las condiciones de inestabilidad actuales del terreno

La topografía característica del municipio de Toledo, presenta pendientes de más del 30% aproximadamente en un 69,6% de su territorio, generando alta susceptibilidad a sufrir procesos de remoción en masa y posibles avalanchas que atentan contra la población, el ecosistema y los recursos hídricos. En la actualidad, este sector cuenta con estudios geológicos a escalas regionales, los cuales no detallan características geológicas, geomorfológicas y estructurales necesarias para zonificar con exactitud los lugares afectados por los deslizamientos, no se tienen inventariadas dichas zonas con alto riesgo, ni se hacen seguimientos que determinen la situación actual del terreno

La iniciativa de este estudio en el sector de Paramito, surge debido a los eventos de fenómenos de remoción en masa (FRM) que se presentan actualmente evidenciados en deslizamientos tipo flujos que atentan contra la población, el ecosistema, los recursos hídricos y la una línea transportadora de gas que actualmente pasa por este sector, dada la necesidad de establecer la viabilidad técnica para la construcción de la nueva línea de dicho ducto, fue necesario el estudio de suelos que incluye la totalidad de las actividades tendientes a definir la viabilidad para la construcción del proyecto.

Con el fin de analizar, proyectar y mitigar los eventos de fenómenos de remoción en masa (FRM), se define el siguiente estudio mediante la aplicación de Metodología para la Zonificación de la Susceptibilidad y la Amenaza Relativa por Movimientos en Masa, elaborada por el Servicio Geológico Colombiano (SGC), procesadas a través de un SIG, a una escala 1:2.000 y usando principalmente software ArcGIS 10.2.

## **CAPÍTULO 1. GENERALIDADES**

### **1.1 OBJETIVOS**

#### **1.1.1 GENERAL**

Avanzar en el conocimiento geológico y geomorfológico a detalle en la Vereda Paramito del Municipio de Toledo Norte de Santander, mediante el uso de imágenes suministradas por E.D INGEOTECNIA.SAS tomadas con un Drone eBee.

#### **1.1.2 ESPECÍFICOS**

- ❖ Refinar el mapa geológico incorporando unidades superficiales identificadas en campo.
- ❖ Interpretación y digitalización de todos los movimientos en masa y procesos erosivos que se registran con base en las fotografías aéreas suministradas por la empresa.
- ❖ Elaboración de la variable Morfogenética teniendo en cuenta los insumos como: Fotografías aéreas, Google Earth y procesamientos del DEM.
- ❖ Elaboración de la variable morfodinámica teniendo en cuenta los insumos como: movimientos en masa y procesos erosivos fotointerpretados, Cálculo del relieve relativo y la inclinación de laderas y los depósitos Cuaternario extraídos de la geología.
- ❖ Determinar y elaborar la susceptibilidad geomorfológica a escala 1:2000 digitalizado con el software ArcGIS 10.2.
- ❖ Elaborar el mapa de susceptibilidad geológica a escala local a detalle de la vereda Paramito digitalizado con el software ArcGIS 10.2.

#### **1.1.3 LOCALIZACIÓN REGIONAL**

El sitio en estudio se localiza en el Municipio Toledo, al sur de Cúcuta capital del departamento de Norte de Santander, en las veredas de Sopotá, Paramito. Estos municipios se encuentran aproximadamente a 113 Km al sur de Cúcuta.

Se sitúa en las estribaciones de la cordillera Oriental Colombiana en la subregión sur oriental del departamento, con una superficie 1617km<sup>2</sup>. Norte: municipios de Chinacota, Herrán, República Bolivariana de Venezuela. Oriente: República Bolivariana de Venezuela y el municipio de Herrán. Sur: municipio de Cubara departamento de Boyacá. Occidente: Municipio de la Bateca, Chinacota,

Pamplonita y Chitagá, Ubicado en la zona andina colombiana cordillera oriental región sur oriental del departamento Norte de Santander. 07° 19»N 72°29»O.

**Imagen 1 Ubicación geográfica del área de estudio**



Fuente: Google Earth.

En el municipio los pisos térmicos varían desde el páramo con temperaturas hasta 8°C, a frío con temperaturas que van desde 8°C hasta 14°C y templado con temperaturas que van desde 14°C hasta 20°C. El piso térmico templado con temperaturas de 14°C a 20°C, es el piso térmico predominante cubriendo un 50.5% de la superficie municipal, siguiéndole el piso térmico frío con el 47.5% del área total municipal.

La precipitación media del municipio es de 994 mm variando desde los 700 mm hasta los 1.400 mm, es de carácter bimodal, presentándose las máximas en abril, junio, septiembre, diciembre y las mínimas en enero, marzo, julio y agosto.

El municipio de Toledo posee variedad de climas que la hacen tener un gran potencial agrícola y ganadero, pero el mal estado de las vías de acceso, mal manejo de los suelos, tala indiscriminada de la vegetación natural y escasos créditos, no han permitido que el municipio tenga un gran desarrollo, acorde a las potencialidades allí existentes.

## **1.2 ALCANCE DEL ESTUDIO**

El alcance del siguiente estudio es realizar la susceptibilidad geológica y geomorfológica de un sector de las veredas Pramito y sopatá a sufrir fenómenos de remoción en masa (FRM) ya que dichos sectores son atravesados por un ducto de gas de que abastece a la población el cual se ve afectado constantemente por la inestabilidad propia del terreno y procesos de remoción en masa que cuasan daños de considerables pérdidas económicas sobre la infraestructura de la línea de gas, dichos procesos se evidencian en deslizamientos tipo flujos, grandes cárcavas y caídas de roca.

Se contrató los servicios de la empresa E.D. Ingeotecnia S.A.S para el análisis de las emergencias que se presentan diariamente y que deben ser atendidas, por lo cual se decide realizar el estudio de susceptibilidad. La práctica empresarial para la compañía anteriormente presentada solo contempla dos variables de análisis de susceptibilidad, por tal razón la susceptibilidad del estudio va enfocada a procesos geológicos y geomorfológicos y no a la amenaza total por fenómenos de remoción en masa, por lo que queda abierta la primera fase del estudio para posteriormente ser completada la evaluación de la amenaza a fenómenos de remoción en masa.

La escala de trabajo es a 1:2.000 en un área de estudio que está representada por un polígono que comprende 6,7 Km<sup>2</sup> abarcando jurisdicciones del departamento de Norte de Santanderen el municipio de toledo.

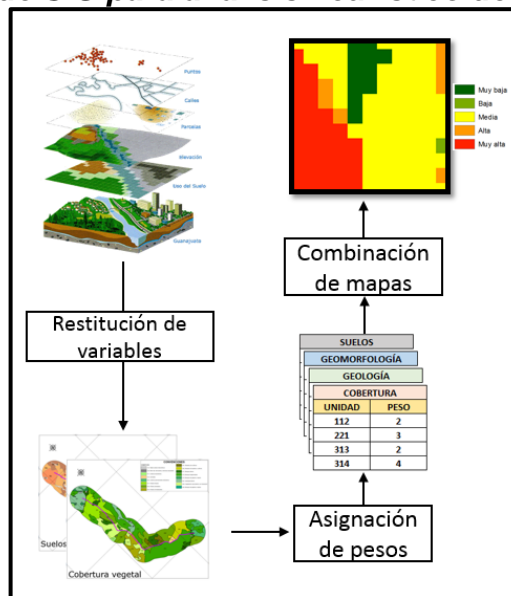
La evaluación de la susceptibilidad, se realizará con base en la metodología propuesta por el SGC, por autores Mora y Vahrson y conceptos propios de la consultoría. La susceptibilidad a fenómenos de remoción en masa se analizará teniendo en cuenta los insumos de Geología y Geomorfolología. Finalmente se analizarán la amenaza a FRM, estableciendo 5 categorías de clasificación (Muy baja, baja, media, alta y muy alta).

Toda la información resultado de los análisis anteriores será procesada por medio de la herramienta de software ArcGis 10.2 y se entregará compilada en una data base para su posterior uso.

## CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA

El análisis de la susceptibilidad y la amenaza por FRM, se estableció a partir de un proceso de ponderación de las variables cualitativas y cuantitativas necesarias para el procesamiento y determinación de susceptibilidad. Se realizó siguiendo la metodología propuesta para la Zonificación de Susceptibilidad y Amenaza por movimientos en masa Escala 1:100.000 Versión 2, desarrollada por el SGC en agosto de 2013, en donde se aplica un enfoque heurístico a los datos interpretados, asignando pesos según el grado de afectación sobre los movimientos en masa, para luego combinarlos mediante un cálculo de mapas utilizando herramientas SIG, como se muestra en la Imagen 2.

**Imagen 2 Uso de SIG para análisis heurístico de susceptibilidad.**



Fuente: E.D. Ingeotecnia S.A.S.

Las variables contempladas para el análisis de la susceptibilidad por FRM fueron: geología (Resistencia, densidad de Fracturamiento y textura) y geomorfología (Morfometría, Morfogénesis y Morfodinámica).

La adquisición de la información para el análisis de la susceptibilidad se obtuvo de la siguiente manera:

- ❖ Información secundaria obtenida en estudios anteriores del IGAC para la cartografía básica.
- ❖ Datos de unidades y estructuras geológicas a partir de planchas desarrolladas por el Ingeominas.

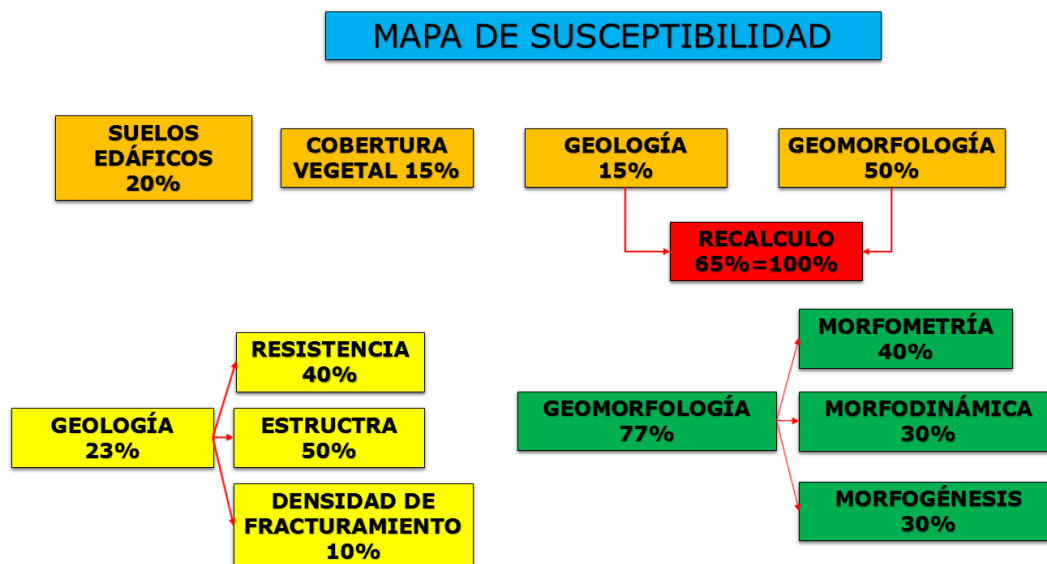
- ❖ Modelo de elevación digital de terreno de 30 m por pixel desarrollado por el IGAC, para los análisis correspondientes a datos de relieve.
- ❖ Fotointerpretación de ortomosaicos de alta resolución obtenidos a partir de fotografías aéreas tomadas con avión no tripulado (Drone) Ebee 03-04326 de propiedad de E.D. INGEOTENCIA S.A.S., para los datos de geomorfología, refinamiento de las capas de geología, además de la interpretación de los movimientos existentes.

El cálculo de la susceptibilidad y la amenaza por FRM se evaluó a partir de la aplicación metodológica contemplada por Mora y Varhson<sup>1</sup>, teniendo en cuenta los insumos de la susceptibilidad por FRM con los pesos correspondientes como se muestra en la Imagen 3. Los parámetros se dividen en cuatro principales temas pero para este estudio de susceptibilidad solo tendremos en cuenta dos parámetros la geología y la geomorfología generando un recalcado en el valor de la ponderación de cada una de estas variables. Como insumo Inicial la geología, la cual tiene en cuenta las unidades y fallas presentes en la zona, tomadas a partir de restitución de las planchas del Ingeominas y refinada mediante la inclusión de fotointerpretación. La geología permite conocer el valor de resistencia a la compresión de la roca y el grado de afectación de las fallas que atraviesan el lugar de estudio, en segunda medida la geomorfología ofrece un atributo que se muestra a partir de la combinación entre el relieve del terreno y los ambientes morfogenéticos la condición actual de los procesos existentes sobre cada estructura geomorfológica, estos insumos geomorfológicos se obtuvieron a partir de fotointerpretación y procesos analíticos usando herramientas de ArcMap.

---

<sup>1</sup> MORA, R., MORA, S. & VAHRSON, W.G., 1994: Mapa de Amenaza de Deslizamientos, Valle Central, Costa Rica. – Escala 1:250.000. – Centro de Coordinación para la Prevención de Desastres Naturales de América Central (CEPREDENAC), San José.

**Imagen 3 Diagrama metodológico para la zonificación de amenaza.**



Fuente: E.D. Ingeotecnia S.A.S.

La clasificación de los rangos de amenaza por FRM, se definió a partir una distribución de 5 rangos o categorías para la visualización de los mapas de amenaza por FRM como se muestra en la Tabla 1.

**Tabla 1 Calificación de la amenaza**

	Calificación	Amenaza
	1	Muy baja
	2	Baja
	3	Media
	4	Alta
	5	Muy alta

Fuente: E.D. Ingeotecnia S.A.S.

Toda la información se procesó, interpretó, analizó y almacenó mediante un SIG.

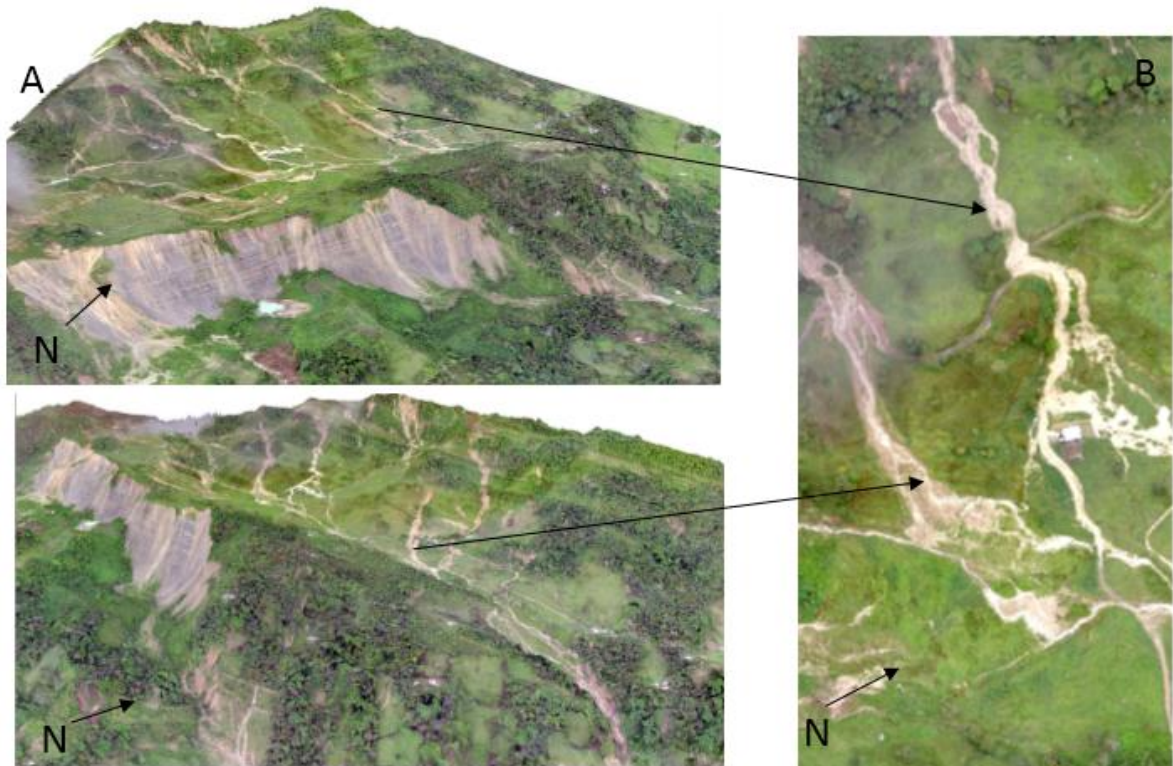
## CAPÍTULO 3. INSUMOS

### 3.1 FOTOGRAFÍAS AÉREAS

Un plus de la metodología utilizada, consistió en aprovechar el detalle que ofrecen las fotografías aéreas con DRONE eBee, pues las escalas admisibles permiten identificar las zonas de mayor afectación por deslizamientos.

El proceso de fotointerpretación geomorfológica básica preliminar a escala 1:2.000, se realizó mediante la digitalización en formato shapefile software ArcGIS 10.2. la digitalización, estructuración vectorial y topológica, así como la asignación de atributos, se ha realizado de acuerdo con la nueva jerarquización morfogénica actualizada del SGC 2013 se mapearon zonas de interés para llevar a cabo nuestro estudio y se dieron clasificaciones a los tipos de deslizamientos.

*Imagen 4 Fotografía aérea tomada con Drone eBee*



Fuente: E.D Ingeoeotecnia S.A.S **A)** Detalle de la fotografía en 3D tomada con Drone eBee, Paramito – Norte de Santander. **B)** Detalle de la fotografía vista en planta tomada con un DRONE eBee. Movimiento tipo flujo visto a escala 1:2.000.

**Imagen 5 Fotografía aérea de monitoreo tomada con Drone eBee**

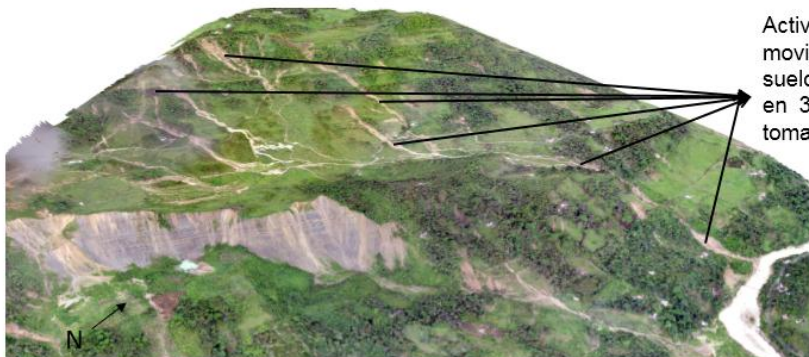


Fuente: E.D Ingeoeotecnia S.A.S **A)** Detalle de la fotografía con Drone eBee vista en planta flujos Paramito y Sopotá escala 1:2.000, Marzo de 2015. **B)** Detalle de la fotografía con Drone eBee vista en planta flujos Paramito y Sopotá escala 1:2.000, Junio de 2015.

**Imagen 6 Fotografía aérea 3D de monitoreo tomada con Drone eBee**



Flujos de suelo y detritos representativos de la zona de estudio. Fotografía Drone eBee en 3D tomada en de Marzo de 2015.



Activación de nuevos movimientos tipo flujos de suelo, fotografía Drone eBee en 3D de la zona de estudio tomada en de Junio de 2015

Fuente: E.D Ingeoeotecnia S.A.S

**Imagen 7 Fotografía aérea 3D de monitoreo tomada con Drone eBee**



Fuente: E.D Ingeoeotecnia S.A.S

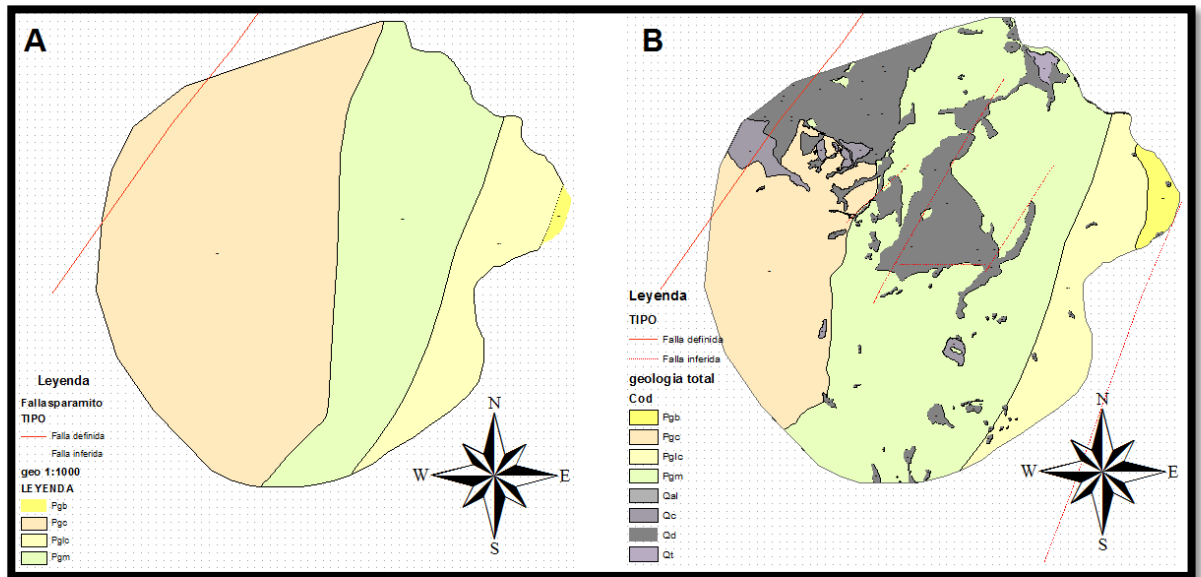
### **3.2 GEOLOGÍA**

Para la elaboración del mapa geológico del área de estudio se tuvo como punto de partida la plancha 111-Toledo a escala 1:100.000 (Ingeominas, 1999). Este fue refinado a partir de fotointerpretación, mediante fotografías aéreas suministradas por la empresa Ingeotecnia S.A.S y el uso de imágenes Landsat de Google Earth, con el fin de identificar cambios en la textura, color y vegetación que puede significar cambios en la litología. Los polígonos de la geología generada se digitalizaron en el Software ArcMap 10.2.

Posterior a la fase de fotointerpretación de unidades geológicas, se realizó un trabajo de campo para corroborar la presencia de las unidades geológicas y poder definir los contactos entre unidades.

La calificación de las unidades geológicas según su resistencia y textura se realizó teniendo en cuenta la tabla de calificaciones del Servicio Geológico Colombiano sintetizada en el documento metodológico de la Zonificación de Susceptibilidad y Amenaza Relativa por movimientos en masa, escala 1:100.000 (2013).

### Imagen 8 Mapa Geológico General



Fuente: A) Ingeominas Plancha 111 del municipio de Toledo. B) Propia. Mapa geológico refinado

### 3.3 CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA

La plancha 111-Toledo cubre un área menor de 1800 Km<sup>2</sup> aproximadamente en el departamento de Norte de Santander, sobre la Cordillera Oriental del sistema orogénico de Los Andes. El área de estudio se encuentra ubicada al Sur de los Municipios de Toledo y Labateca, donde afloran rocas sedimentarias Paleógenas pertenecientes a las formaciones Mirador, Carbonera, Los Cuervos y Barco

#### 3.3.1 Rocas Sedimentarias

##### ❖ Formación Barco (Tpb-Pgb):

Unidad aflorante al oriente de la Falla de Labateca; está constituida por areniscas cuarcíticas y delgadas intercalaciones de lodolitas. En general consta de areniscas de cuarzo, grises a grises amarillentas, bien calibradas, localmente micáceas y feldespáticas de grano medio, grueso a ligeramente conglomeráticas en capas planas entre 0.5 y 5 m de espesor, con estratificación cruzada. Hacia el techo se presentan areniscas arcillosas, de grano fino a medio, en capas de 15 a 30 cm de espesor, con delgadas intercalaciones de lodolitas grises a negras, con laminación plana paralela, subparalela e inclinada; localmente se encuentran en capas con laminación flaser con abundantes restos carbonosos. Hacia la base de la unidad, la estratificación se hace más delgada y el grano es más fino. En el tope también

las capas son menos espesas y las intercalaciones de lodolitas y de areniscas de grano fino son más abundantes.

❖ **Formación Los Cuervos (Pglc):**

Corresponde a una alternancia de arcillolitas y lodolitas, algunas capas de areniscas y de carbón. Aflora al oriente de la Falla de Labateca en franjas de dirección Norte-Sur. En su parte inferior aparece una sucesión de lodolitas grises muy carbonosas, con delgadas intercalaciones de areniscas grises a grises claras, localmente lodosas. La parte media está compuesta por areniscas lodosas grises, amarillas, cuarzosas, localmente feldespáticas, de grano fino, con intercalaciones de lodolitas carbonosas y capas de carbón entre 0,2 Y 1,5 m de espesor. En la parte superior aparecen lodolitas grises, ligeramente calcáreas, con fragmentos carbonosos y óxidos de hierro.

❖ **Formación Mirador (Pgm):**

Esta unidad se encuentra constituida predominantemente por areniscas con intercalaciones de lutitas carbonosas. La parte inferior la conforman areniscas de cuarzo blancas, grises claras a blanco amarillentas, de grano medio, grueso y en partes conglomeráticas, separadas por niveles de lodolitas grises, carbonosas. En la parte media alta se presenta un nivel de lodolitas grises, localmente ferruginosas y carbonosas, con algunas intercalaciones de areniscas cuarzosas de grano fino. La parte superior está conformada por areniscas blancas, de grano medio a ligeramente conglomeráticas, feldespáticas y ferruginosas.

❖ **Formación Carbonera (Pgc):**

Se referencia una secuencia de lodolitas grises a grises verdosas, con intercalaciones de areniscas arcillosas; se presentan capas de carbón en las partes inferior y superior. Se reconocen en los alrededores de la zona de estudio lodolitas grises, grises amarillentas a grises rojizas, localmente ferruginosas, micáceas, con nódulos ferruginosos aplanados, paralelos a la estratificación, en capas generalmente gruesas. Las intercalaciones son de areniscas cuarzosas, blancas y grises, de grano fino, ligeramente lodosas, micáceas, localmente feldespáticas, con óxidos de hierro, restos carbonosos e intraclastos de lodolitas. En la parte inferior presenta capas de carbón con espesores entre 40 y 80 cm.

### **3.3.2 Depósitos Cuaternarios**

Adicionalmente a la información secundaria que referencia estos depósitos se incluyen unidades cartografiadas en este estudio mediante la fotointerpretación detallada llevada a cabo a una mejor escala que correlaciona unidades morfogénicas.

❖ **Depósitos Aluviales (Qal):**

Se referencian en esta unidad los cauces de los principales ríos y quebradas presentes a lo largo de toda la franja en estudio, los depósitos de llanura aluvial, paudales, lagunares y de abanicos aluviales. Estos están distribuidos a lo largo de los valles de las principales corrientes en los alrededores de la zona de influencia. Están constituidos por los materiales provenientes del arrastre y depositación de material de carga fluvial predominantemente.

❖ **Depósitos Coluviales (Qc):**

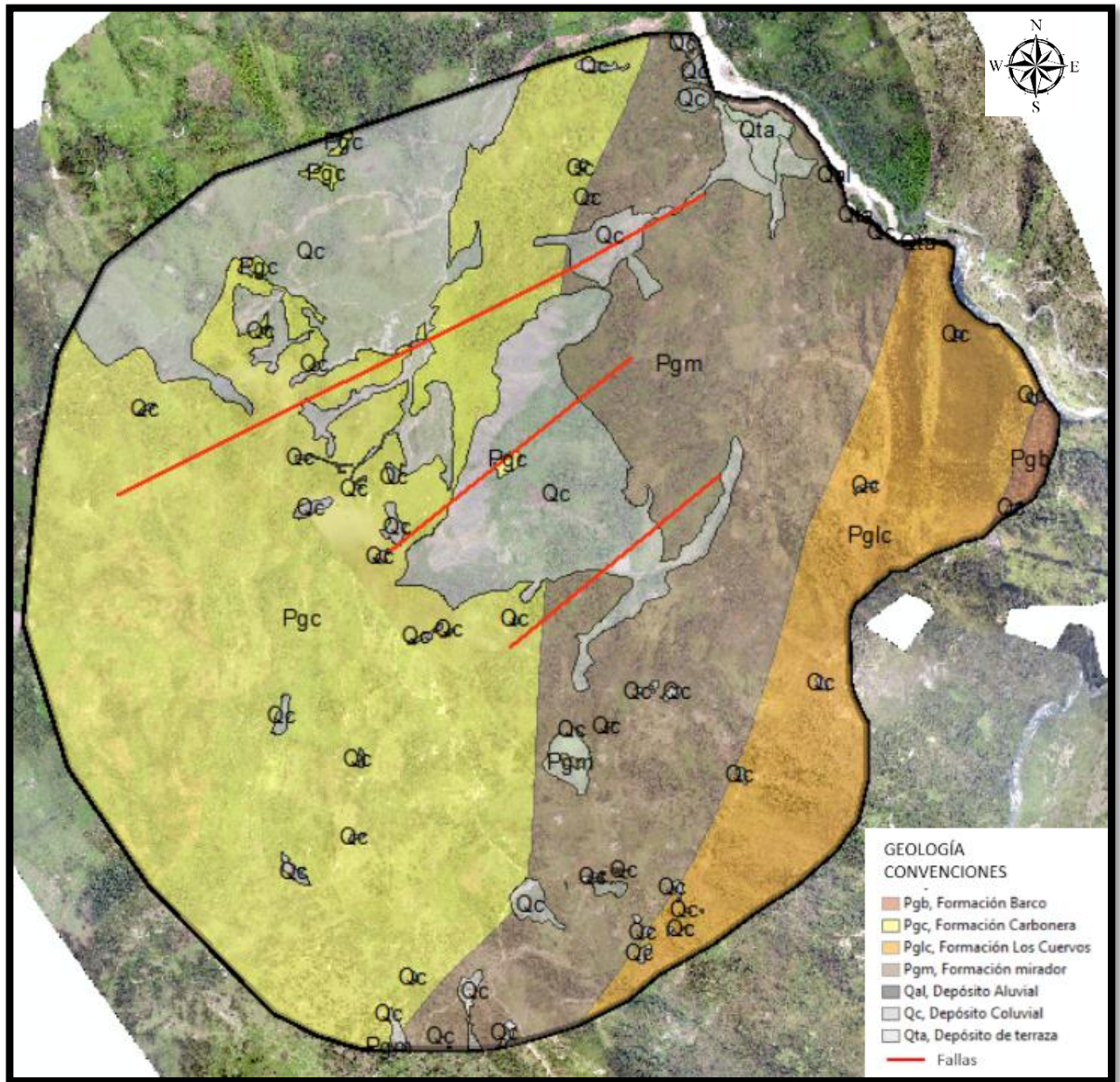
En diferentes sectores de la franja en estudio se reconocen depósitos coluviales generados por eventos erosivos y movimientos en masa. Los depósitos coluviales son originados por procesos de meteorización y degradación de las rocas que constituyen el suelo y el subsuelo generándose a través de la erosión de fragmentos rocosos y movimiento de material superficial de las unidades topográficamente más altas que consecuentemente son transportados por un agente natural, en la mayoría de los casos el agua; generalmente se localizan en los flancos de laderas denudacionales. Este tipo de depósitos se reconocen a lo largo de todo los sectores de Toledo en Norte de Santander, algunos con grandes extensiones y susceptibles a continuo movimiento; se agrupan en esta unidad los coluviones, depósitos de detritos, de tierras, de terrazas sobre-elevadas y de lodos.

❖ **Terrazas Aluviales (Qt):**

Se han reconocido zonas de baja pendiente y depósitos amplios en forma de terrazas, estos últimos asociados a acumulaciones de origen fluvial con niveles alcanzados por la actividad de las aguas en anteriores períodos de tiempo.

En la imagen 9 se puede observar el mapa geológico general del área de estudio; este mapa se podrá ver con mejor detalle en el SIG anexo a este estudio.

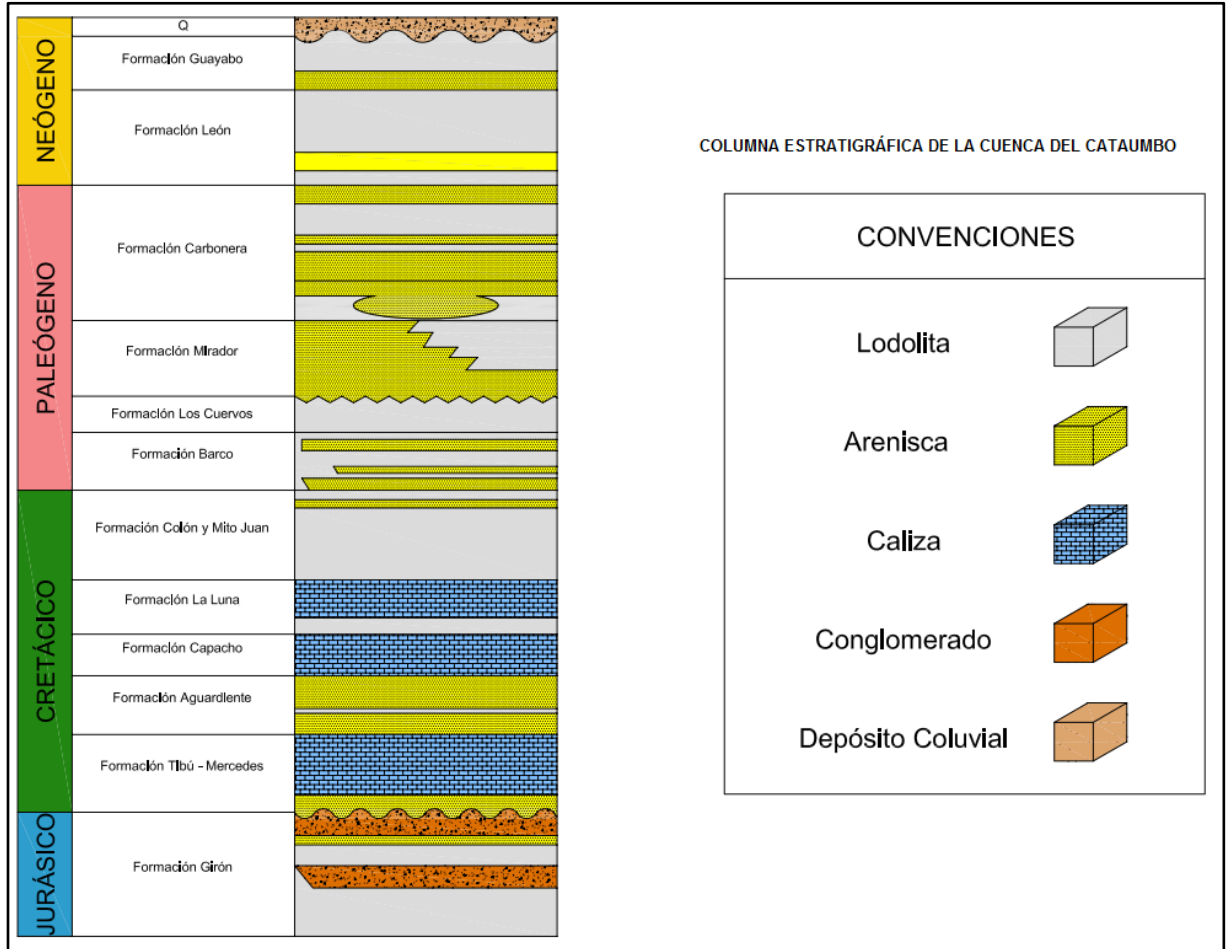
**Imagen 9 Vista general de la geología del área de estudio refinada.**



### 3.3.3 Columnas estratigráficas generalizadas:

Como guía práctica para reconocer la secuencia cronológica de diferentes unidades litoestratigráficas y sus diferencias composicionales en área, se incluye la columna estratigráfica generalizada, correspondiente a la Cuenca del Catatumbo; esta se anexa a continuación (Imagen 10).

**Imagen 10 Columna estratigráfica generalizada Cuenca del Catatumbo**



Fuente: ANH, COLOMBIAN SEDIMENTARY BASINS.

### 3.3.4 Tectónica

Regionalmente la zona oriental del tramo en estudio que hace parte de la Cordillera Oriental de Colombia muestra un cambio de dirección nororiental a noroccidental dando lugar al denominado Macizo de Santander representando un área tectónicamente compleja caracterizada por un estilo estructural de fallamiento inverso y plegamiento con estructuras amplias. Las estructuras regionales relevantes se describen a continuación:

#### 3.3.4.1 Fallas

##### ❖ Falla Labateca:

Es un rasgo tectónico de importancia en esta región oriental correspondiente a una falla regional inversa con una dirección NS a NW-SE, la cual enfrenta rocas paleozóicas, jurásicas y cretácicas al occidente con rocas terciarias al oriente. Un

trayecto de esta falla coincide paralelamente con el lineamiento regional de Labateca de dirección NW-SE. Según Boinet et al (1982) los rasgos geológicos de la Falla de Labateca están relacionados con una fase tectónica de compresión; se interpreta inicialmente como una falla normal reactivada posteriormente como inversa, con inclinación hacia el occidente.

❖ Falla el Ají-Pozo Bravo:

Corresponde al ramal noroccidental de la Falla de Labateca. La falla presenta inicialmente una dirección noroeste para luego tomar un rumbo Norte-Sur; corresponde a una falla inversa, con buzamiento al occidente y su ángulo de inclinación parece aumentar de sur a norte. Esta falla enfrenta rocas de la Formación Silgará al occidente con rocas de las Formaciones Floresta, Diamante, Girón y Río Negro al oriente.

❖ Falla Tincalá-Lirgua:

Esta falla se presenta como un ramal de la Falla El Ají-Pozo Bravo y conserva con esta una dirección subparalela. Entre estas dos fallas se presenta una estructura sinclinal, donde afloran rocas de las formaciones Silgará, Diamante, Girón y Río Negro. Es una falla inversa, con buzamiento al occidente, pero además de su desplazamiento vertical presenta aproximadamente 500 m de desplazamiento horizontal.

❖ Falla Loma Buenavista:

Esta falla se localiza al Este de Toledo presentando una dirección SW-NE, desplazando las Formaciones Mirador y Barco. Hacia el sur es truncada por la Falla del Río Culagá.

❖ Falla Valegrá:

Es una falla sub-paralela a la Falla de Labateca. Se extiende por una longitud de aproximadamente 30 Km, siendo desplazada por varias fallas. Su trazo tiene una dirección de NE-SW a NS. El movimiento de sus bloques la define como una falla inversa, con buzamiento hacia el oeste, afectando rocas cretácicas y terciarias.

### **3.3.4.2 Pliegues**

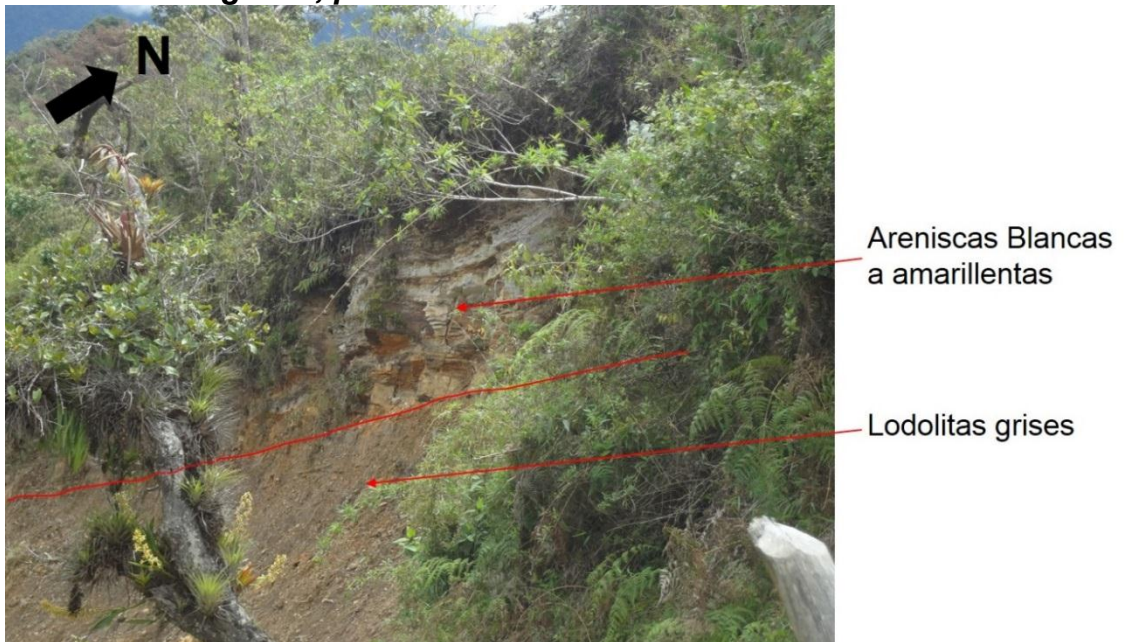
❖ Sinclinal de Culagá:

Esta estructura presenta una dirección predominante Norte-Sur, cuyo eje está afectado por la falla que lleva el mismo nombre; es una estructura alargada de aproximadamente 27 Km de longitud y 6 Km de ancho, asimétrica. Está limitado en sus flancos orientales por las fallas Valegrá, El Trapiche, Loma Buenavista y los estratos de sus flancos occidentales están invertidos por efectos de la Falla Labateca.

### 3.3.5 REGISTRO FOTOGRÁFICO DE CAMPO

Las fotografías incluidas a continuación fueron obtenidas partir de la vista realizada en campo y muestran características de algunas de las rocas y materiales de depósitos aflorantes a lo largo y ancho de la zona de estudio.

***Imagen 11 Intercalaciones de Areniscas blancas-amarillentas y lodolitas grises, pertenecientes a la Formación Mirador***



Fuente: E.D. Ingeotecnia S.A.S.

**Imagen 12 Arenisca amarillenta de matriz lodosa, y lodolitas fisiles, perteneciente a la Formación Mirador**



Fuente: E.D. Ingeotecnia S.A.S.

**Imagen 13 Deslizamiento traslacional, sobre roca pertenecientes a la Formación Mirador**



Fuente: E.D. Ingeotecnia S.A.S.

**Imagen 14 Paquetes de areniscas pertenecientes a la Formación Carbonera**



Paquete de areniscas de la Formación Carbonera

Fuente: E.D. Ingeotecnia S.A.S.

**Imagen 15 Lodolitas grises-amarillentas pertenecientes a la Formación Carbonera**



Lodolitas fisiles amarillentas

Fuente: E.D. Ingeotecnia S.A.S.

**Imagen 16 Depósito Coluvión, generado sobre rocas de la Formación Mirador al Sur del área en estudio**



Fuente: E.D. Ingeotecnia S.A.S.

**Imagen 17 Depósito coluviones provenientes del escarpe y asociados a rocas de la Formación Carbonera**



Fuente: E.D. Ingeotecnia S.A.S.

### **3.4 GEOMORFOLOGÍA**

La geomorfología es la ciencia que estudia las formas de la Tierra y se basa principalmente en los resultados de la interacción de los procesos endógenos y exógenos asociados con el relieve, generando grandes formaciones morfológicas, que pueden subdividirse en cordilleras, llanuras continentales, llanuras abisales, dorsales submarinos y fosas submarinas (IDEAM, 2013).

Estas macro-formaciones se ven afectadas por efectos naturales, tales como lluvia, sismicidad, fallas geológicas, meteorización, erosión, entre otros, que sumados a la actividad antropogénica, la cual involucra deforestación, explotación de recursos del subsuelo, sobrepastoreo y otros usos inadecuados del suelo, han modificado el paisaje drásticamente y en algunos casos se ha generado el alto grado de alteración de las propiedades naturales del subsuelo, dando lugar a condiciones de inestabilidad y en consecuencia, produciéndose movimientos en masa de diferentes tipos y magnitudes.

Por tal razón, se hace necesario llevar a cabo estudios de zonificación de amenaza para determinar cuáles son las áreas que presentan esta problemática y así facilitar la toma de decisiones en cuanto a acciones de prevención, mitigación y corrección.

La interpretación de las unidades Morfogenéticas se realizó tomando como insumos principales las fotografías aéreas suministradas por Ingeotecnia S.A.S, así como también el mapa de sombras, el mapa de pendientes, la cartografía geológica oficial de Ingeominas y Google Earth. Los polígonos de cada geoforma se digitalizaron en el Software ArcMap 10.1. La nomenclatura utilizada para el mapa morfogenético se basó en el glosario de unidades geomorfológicas propuesto por el Servicio Geológico Colombiano (2012).

La calificación de cada una de las geoformas con respecto a su grado de susceptibilidad por movimientos en masa, se realizó con base en la tabla de calificaciones del Servicio Geológico Colombiano sintetizada en la Propuesta Metodológica para la elaboración de la geomorfología aplicada en la Zonificación de la susceptibilidad y Amenaza Relativa por movimientos en masa (2012).

### **3.4.1 MORFOGÉNESIS**

El territorio colombiano se caracteriza por presentar un relieve bastante diverso, el cual es producto de la acción de los procesos geológicos endógenos y exógenos que tienen lugar en los diferentes ambientes geomorfológicos presentes. Uno de los principales elementos que favorecen la riqueza geológica y geomorfológica de Colombia, es la diversidad climática, que se traduce en la existencia de los denominados pisos térmicos, pues cada uno de estos presentan mecanismos y procesos diferentes que modelan el paisaje de forma particular en cada región.

Como ya se mencionó anteriormente, la zona de estudio abarca parte de la jurisdicción del Norte de Santander, el cual se ubica geomorfológicamente dentro de la Provincia Litosférica Mesoproterozoica Greinvilliana y comprende parte del Cinturón Orogénico de la Cordillera Oriental.

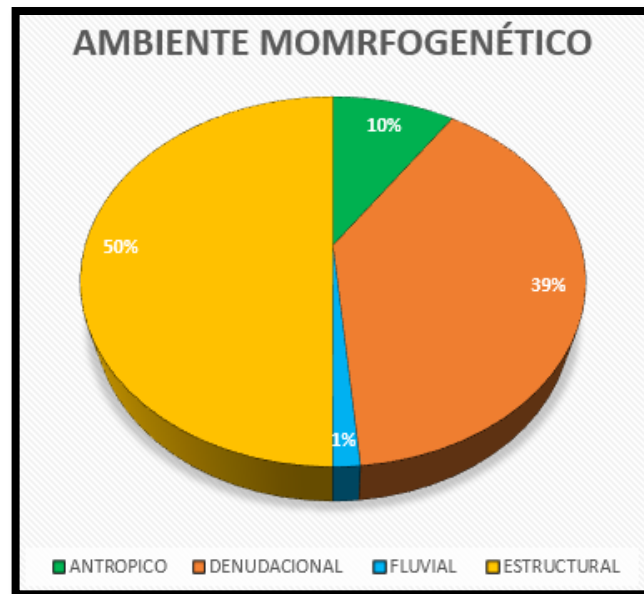
En la zona se describen ambientes morfogenéticos que esencialmente están influenciados por un control estructural que se desarrolla sobre la región, este desarrollo se demarca por la influencia de una falla de tipo Normal la cual se ubica en dirección NNE –SSW, esta presenta un alto grado de densidad de fracturamiento, también, se describe con la información obtenida en la fase de campo, la influencia de otra falla que no fue posible caracterizar su tipo, dadas las condiciones del terreno, pero que presenta una fuerte influencia de deformación sobre las rocas presentes, esta se ubica en la parte media del recorrido de la variante con una dirección NNE –SSW. Se encuentra también el Sinclinal de Caluga el cual ubica al Oeste de la variante, aproximadamente a unos 500m sobre el margen Este del ducto de gas que atraviesa la zona de estudio y principal razón por la que se realiza este análisis, el cual afecta la disposición de las laderas generando planos de contra y a favor de tipo estructural.

Realizando una descripción más detallada de las unidades Morfogénicas cartografiadas sobre la variante, se observan 4 diferentes tipos de ambientes, Antropogénicos, Denudaciones, Fluviales y Estructurales. Estos ambientes tienen una representación en área que se muestra a continuación y un porcentaje sobre la zona de estudio que se observa en la siguiente figura, además de la distribución de estas unidades interpretadas por las fotografías suministradas y con control de campo.

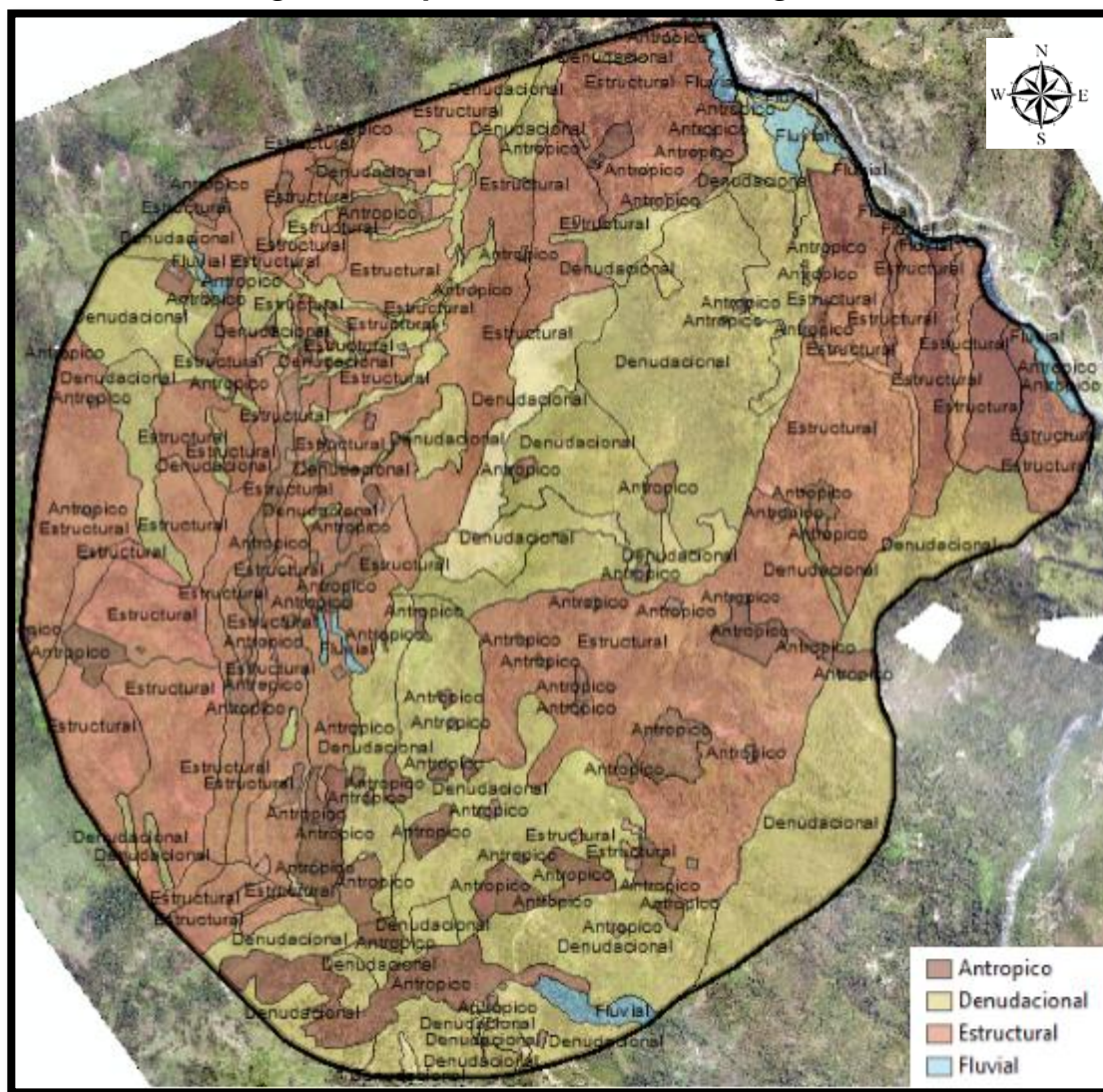
**Tabla 2 Total de área cubierta por Ambiente Morfogénico**

Ambiente	Área
Antrópico	637357
Denudacional	2637670
Estructural	3370004
Fluvial	97376
<b>Total</b>	<b>67422407</b>

**Imagen 18 Descripción de los ambientes Morfogénicos por porcentaje**



**Imagen 19 Mapa de ambientes Morfogénéticos**



### 3.4.1.1 Análisis de la morfogénesis por ambiente

#### ❖ Ambiente Antropogénico:

Incluye las geformas originadas como resultado de la intervención del hombre sobre el terreno, en la mayoría de los casos con el objetivo de realizar construcción de vivienda, obras de ingeniería, disposición de desechos o escombros y adecuación de nuevas vías, que modifica la morfología natural del terreno. Para la variante se describieron las siguientes unidades:

❖ **Sendero de ganado (Terracetos) (Asg):**

Formas de microrrelieve con aspecto de terrazas estrechas dispuestas en forma escalonada en las laderas boscosas o de pastizales no prominentes. Generalmente, la formación de los S.g. se debe al paso continuó de bovinos, y se forma por un deslizamiento lento de sedimentos de la ladera, bajo la influencia de la gravedad o por solifluxión. También llamadas Terracillas, pata de vaca o de cabra. Se encuentran sobre todo el recorrido de la variable y en algunos sectores como en la zona Sur se demarcan muy bien los trazos de los caminos de los animales, generando socavaciones de forma transversal a la ladera, estas socavaciones son semiparalelas y pueden llegar a presentar separaciones entre 30 a 50 cm en laderas de media pendiente.

***Imagen 20 Terracetos en la zona Sur del lugar de estudio***



Fuente: E.D. Ingeotecnia S.A.S.

❖ **Superficies de explanación (Asp):**

Planos de allanamiento hecho en las laderas sobre suelos residuales de las formaciones Carbonera y Mirador, con el fin de adecuar el terreno para la construcción, mediante la explanación o terraceos que disminuyen la pendiente del terreno. Estas generan inestabilidad del terreno en las zonas aledaña a la explanación, se puede presentar pequeños surcos y erosión de tipo laminar. Para la zona se presentan especialmente sobre las construcciones para vivienda y establos.

**Imagen 21 Vista de una zona de explanación para vivienda**



Fuente: E.D. Ingeotecnia S.A.S.

❖ **Terrazas agrícolas (Ata):**

Son escalones muy anchos, contruidos por el hombre usando los suelos del lugar, para actividades agrícolas como el cultivo de la Caña de Azúcar, pero se observa que gran parte de esta área está destinada para el cultivo de Plátano y Yuca. Las terrazas son hechas con el objeto de que suelos inclinados puedan usarse con cultivos agrícolas o plantaciones forestales, sin que la tierra sea arrastrada por el agua.

**Imagen 22 Zona de terrazas agrícolas para el cultivo de Plátano y Yuca**



Fuente: E.D. Ingeotecnia S.A.S.

❖ **Ambiente Denudacional**

Incluye las geofomas cuya expresión morfológica está definida por la acción combinada de procesos moderados a intensos de meteorización, erosión y transporte de origen gravitacional y pluvial que remodelan y dejan remanentes de las unidades preexistentes y de igual manera, crean nuevas por la acumulación de sedimentos. Para la variante se describieron las siguientes unidades:

❖ **Cono y lóbulo coluvial y de solifluxión (Dco):**

Estructuras en forma de lóbulo con morfología alomada baja. Su origen es relacionado a procesos de transporte y depositación de materiales sobre las laderas y por efecto de procesos hidrogravitacionales en suelos saturados y no saturados. Su depósito está constituido por bloques y fragmentos heterométricos de la formación Carbonera, embebidos en una matriz arcillosa a areno limo arcillosa. Su origen está relacionado al fracturamiento de la roca por efecto de las fallas locales en laderas de muy alta pendiente donde aflora esta formación.

***Imagen 23 Depósito coluvial por origen Hidrogravitacional***



Fuente: E.D. Ingeotecnia S.A.S.

❖ **Cono o lóbulo de deslizamiento rotacional (Ddrt):**

Estructura en forma de cono con morfología alomada baja, de longitud aproximada a los 50 cm en la corona del desprendimiento y 50 m de ancho, se presenta de forma irregular localmente escalonada, muy inclinada a abrupta y lobulada en su parte distal. Su origen es relacionado a un plano de debilidad expuesto sobre la formación carbonera en la región central de la variante, más exactamente en el flanco Suroeste de este tramo.

**Imagen 24 Deslizamiento Rotacional presente en la zona central de la variante**



Fuente: E.D. Ingeotecnia S.A.S.

❖ **Cono o lóbulo de deslizamiento traslacional (Ddtr):**

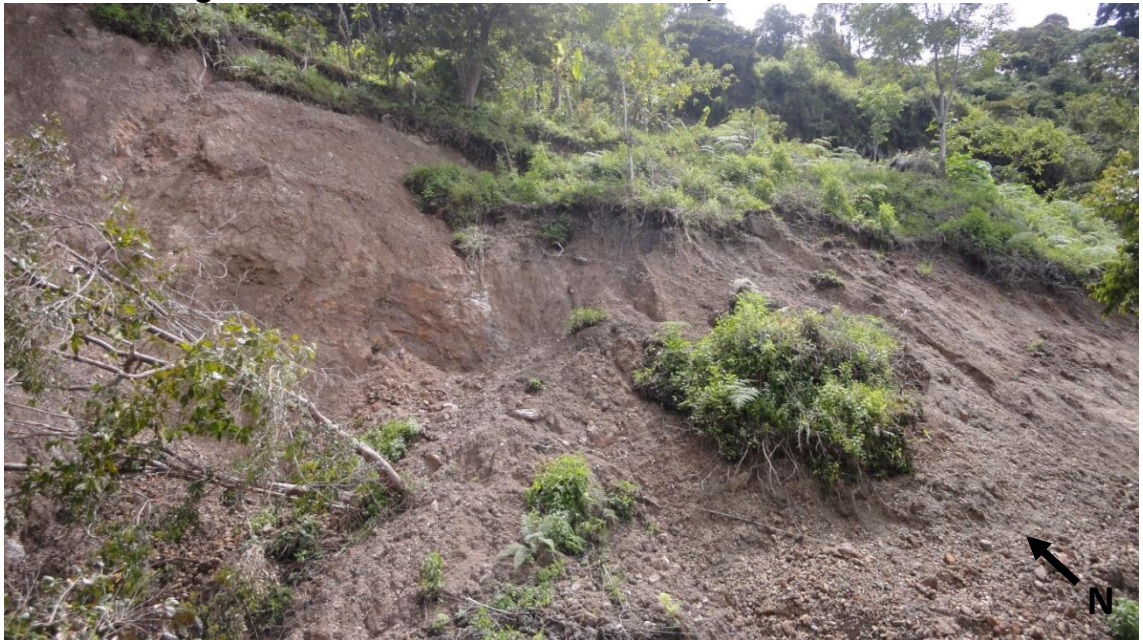
Estructura en forma de cono, con morfología plana a suavemente ondulada. Su origen es relacionado al movimiento de detritos por efecto de un plano de falla, para la región se describe que el detonante para este tipo de movimiento es la gran cantidad de agua lluvia infiltrada en el subsuelo. El movimiento es controlado por segmentos de debilidad asociados con planos de estratificación y zonas de alto Fracturamiento. Este tipo de movimiento es el más representativo y tiene la mayor cantidad de área sobre la zona, no presenta una sectorización especial y se desarrolla sobre las dos formaciones Carbonera y Mirador. Se identifican una cantidad de 19 deslizamientos de este tipo.

**Imagen 25 Deslizamiento traslacional, tomado de la corona de deslizamiento**



Fuente: E.D. Ingeotecnia S.A.S.

**Imagen 26 Deslizamiento traslacional, tomado de la base**



Fuente: E.D. Ingeotecnia S.A.S.

❖ **Escarpe de erosión mayor (Deem):**

Ladera abrupta variable que se forma por la abrasión producto de la erosión pluvial y por procesos gravitacionales, se presenta de longitud larga

aproximadamente de 20 m, de forma convexa y recta, con pendiente escarpada. En algunos sectores desarrolla surcos con una profundidad de hasta 5 cm y espaciamiento entre surco y surco hasta de 20 cm. Su desarrollo se presenta sobre la zona Sur de la variante en rocas de la Formación Mirador.

❖ **Escarpe de erosión menor (Deeme):**

Ladera abrupta o a desplome de longitud entre los 15 a 25 m, de forma cóncavo, con pendiente escarpada, originado por procesos de erosión y movimientos en masa remontantes a lo largo de un drenaje. Se pueden apreciar algunos surcos no muy prominentes, se encuentran en dos sectores específicamente sobre la carretera que dirige la vereda de paramito a la altura de la variante en su zona Sur y sobre un afluente (Quebrada) que se ubica en la zona central de la variante, región Oeste.

❖ **Cono flujos de detritos (Dfe) y Cono o lóbulo de flujo de detritos (Dlfd):**

Estructura en forma de lóbulo, con laderas convexas de longitud larga y pendientes que varían entre inclinadas a abruptas. Su depósito tiene rasgos característicos de canales en forma de U, trenes de bloques y sectores con gran cantidad de elementos arbustivos transportados por el flujo. Su origen es relacionado al transporte torrencial de sedimentos clastosoportados y material vegetal. Se encuentran 6 flujos ubicados especialmente sobre la zona Sur de la variante, sus dimensiones pueden variar entre los 15 a 30m de ancho y 20 a 80 m de largo. Se puede apreciar una relación entre la Formación Mirador y la densidad de flujos registrada sobre esta zona la cual indica que esta formación es susceptible a este tipo de movimientos.

***Imagen 27 Cono flujos de detritos registrado en la zona de estudio***



Fuente: E.D. Ingeotecnia S.A.S.

❖ **Ladera erosiva (Del):**

Corresponde a superficies del terreno de pendientes inclinadas, de longitudes moderadas, de formas planas, cóncavas y convexas, patrón de drenaje típico dendrítico. Presenta procesos erosivos como surcos no muy prominentes, sobre materiales de suelo residual y roca de las formaciones Mirador y Carbonera. Se presentan en toda la región de la variante y no están estrictamente relacionadas con las fallas o pliegue de la zona.

❖ **Ladera ondulada (Dlo):**

Superficie en declive de morfología alomada y ondulada, pendiente inclinada moderada de longitud larga. El patrón de drenaje es subdendrítico. Estas laderas se pueden formar en suelos residuales de la formación Carbonera, Mirador y en depósitos Coluviales.

***Imagen 28 Ladera ondulada presente en la zona de estudio***



Fuente: E.D. Ingeotecnia S.A.S.

❖ **Montículo y ondulaciones denudacionales (Dmo):**

Elevación del terreno con altura que oscila entre 5 a 10 m sobre su nivel de base local, con una morfología colinada, cóncava y convexa, suavemente inclinada y con drenaje divergente. Su origen es relacionado a procesos de meteorización y erosión intensa sobre rocas de la formación Carbonera en sedimentos no muy consolidados, dispuestos de manera horizontal a ligeramente inclinados, presenta procesos de reptación.

***Imagen 29 Montículos y ondulaciones presentes en la zona de estudio***



Fuente: E.D. Ingeotecnia S.A.S.

***Imagen 30 Reptaciones presentes en los montículos***



Fuente: E.D. Ingeotecnia S.A.S.

❖ **Ambiente fluvial y lagunar**

Incluye las geoformas que se originan por procesos de erosión de las corrientes de los ríos y por la acumulación o sedimentación de materiales en las áreas aledañas a dichas corrientes, tanto en épocas de grandes avenidas e inundación, como en la dinámica normal de las corrientes perennes, durante la época seca. De esta manera, es posible encontrar unidades aledañas a ríos, quebradas y en el fondo de los cauces, cuyos depósitos son transportados y acumulados cuando

éstas pierden su capacidad de arrastre. Para la variante se describieron las siguientes unidades:

❖ **Plano o llanura de inundación (Fpi):**

Superficie de morfología plana, baja a ondulada, eventualmente inundable. Se localiza bordeando los cauces fluviales. Incluye los planos fluviales en formas de "U". Su depósito está constituido por sedimentos finos, originados durante eventos de inundación fluvial.

❖ **Ambiente Estructural**

Incluye las geoformas que se originan por procesos relacionados con la dinámica interna de la tierra, asociados principalmente al plegamiento y el fallamiento de las rocas, cuya expresión morfológica es definida por la tendencia y la variación en la resistencia de las unidades. Para la variante se describieron las siguientes unidades:

❖ **Cornisa estructural (Scor):**

Saliente estructural u hombrera rocosa, tabular de morfología alomada suavemente inclinada. Se presenta a manera de repisa en laderas de contrapendiente. Su origen se debe a la acción conjunta de procesos estructurales y erosión diferencial en unidades duras y blandas.

❖ **Escarpe de Contra pendiente (Secp):**

Plano vertical corto de unos 3 a 6 m, convexo de pendiente abrupta. Su origen se relaciona a las superficies de cambio abrupto definidas en las partes altas de la ladera de contrapendiente. Se ubica especialmente sobre la formación Carbonera.

❖ **Ladera contrapendiente (Slcp):**

Superficie en declive, de morfología irregular, definida por planos estratificados de las dos formaciones dispuestos en sentido contrario a la inclinación del terreno. Puede presentarse con longitud larga con pendientes suavemente inclinadas a muy escarpadas. En esta geoforma no está asociada a ninguna estructura local.

***Imagen 31 Ladera en contra pendiente de la formación Carbonera***



Fuente: E.D. Ingeotecnia S.A.S.

***Imagen 32 Ladera a favor de la pendiente de la formación Carbonera***



Fuente: E.D. Ingeotecnia S.A.S.

### 3.4.2 MORFODINÁMICA

Los procesos morfodinámicos corresponden a una serie de acciones sucesivas y/o simultáneas y sinérgicas a través de las cuales los agentes morfogenéticos, principalmente los externos, son capaces de alterar la estabilidad de las formas de la superficie terrestre. Los procesos morfodinámicos están asociados a una secuencia conformada por la meteorización y erosión de un macizo rocoso, el desplazamiento y/o movimiento que se traduce en transporte de los materiales removidos y su posterior depositación. En consecuencia, los procesos morfodinámicos dependen de una serie de factores externos relacionados con la energía del agente morfogenético y la posición geomorfológica como son es la denudación, la cual se define como un proceso morfodinámico externo, es el modelador de la superficie terrestre y el generador de las geoformas. El proceso comienza con la meteorización o erosión in situ de las rocas a través de la intemperización o influencia de los elementos del clima tales como los cambios de temperatura y las precipitaciones. Esta meteorización prepara las rocas para ser erosionadas.

Por otro lado la erosión a la cual se le atribuye la remoción de las partículas de la roca a través de procesos como la abrasión hidráulica o la deflación eólica, o simplemente la erosión de la energía cinética de ambos elementos, agua y viento. Simplemente se le da una connotación al proceso erosivo como el principal responsable del rebajamiento del relieve transformándolo en relieve destructivo, además, sumado a estos procesos se debe de tener en cuenta factores internos tales como la composición mineralógica de los materiales involucrados así como sus propiedades geomecánicas.

#### 3.4.2.1 Descripción de la variable morfodinámica para el área de estudio:

La generación del variable morfodinámica se realiza a partir de la guía del Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000 hecho por el Servicio Geológico Colombiano donde se realiza a través de un proceso de agrupamiento el cual se construye a partir de la representación cartográfica de los suelos transportados vistos como geoforma, la descripción de procesos derivados de la fotointerpretación, del inventario de campo y las variables geométricas derivadas del modelo DEM. Es a través de este agrupamiento que se obtiene una distribución espacial de los movimientos y el comportamiento del relieve asociado a las características del material.

#### a) Variables Geométrica Derivadas del DEM

**Índice de relieve relativo (RR):** El índice de relieve relativo se define como la diferencia entre la mayor elevación y la menor elevación por unidad de área y se expresa como la máxima diferencia de altura del terreno por Km<sup>2</sup>. Este atributo se califica según su variación de altura, ver la siguiente tabla.

**Tabla 3 Calificación del atributo de Relieve Relativo**

Descripción del relieve	Resistencia relativa del material	Cal. relieve
Muy bajo	Materiales muy blandos y erosionables	1
Bajo	Blando erosionable	2
Moderado	Moderadamente blando y erosión alta	3
Alto	Resistente y erosión moderada	4
Muy alto	Muy resistente y erosión baja	5

Fuente: E.D. Ingeotecnia S.A.S.

**Inclinación de la ladera (IL):** Se hace referencia a la inclinación de la ladera porque generalmente está relacionada con el tipo de material que conforma la unidad morfológica y con la susceptibilidad de dicha unidad a la formación de los movimientos en masa. En general se puede afirmar que existe una relación directa y proporcional. Aunque si es un factor dinámico importante, esta relación no siempre es correlacionable y depende principalmente del tipo de material. Este atributo se califica según su grado de inclinación.

**Tabla 4 Calificación del atributo de inclinación de la Ladera**

Descripción	Características del Material	Cal. Inclinación
Plana a suavemente	Muy blanda y Muy baja susceptibilidad a MM.	1
Inclinada.	Blanda y baja MM.	2
Muy Inclinada.	Moderadamente Blanda y Moderada susceptibilidad a MM.	3
Abrupta.	Moderadamente Resistente y Moderada susceptibilidad a MM.	4
Muy abrupta.	Resistente y Alta susceptibilidad a MM.	5

Fuente: E.D. Ingeotecnia S.A.S.

**Combinación del relieve relativo y la inclinación de la ladera (RelaIncli):** La combinación de los elementos fisiográficos, relieve relativo e inclinación de la ladera mediante el modelo RelaIncli, permite la agrupación en un mismo escenario de los elementos geomorfológicos con mayor tendencia a los movimientos en masa que a su vez son calificados de menor a mayor grado de inestabilidad, a partir del cálculo de los dos atributos.

$$\text{RelaIncli} = 0.60 * \text{RR} + 0.40 \text{ IL}$$

#### **b) Depósitos asociados a geoformas**

Son materiales resultantes de la acción dinámica de los procesos geomorfológicos y de agentes naturales, cuyo medio de transporte puede ser el agua, el hielo y el

viento, con contribución de la gravedad como fuerza direccional selectiva, los cuales son depositados o llevados a los sitios que ocupan actualmente. Estos materiales son de carácter granular heterogéneo, no cohesivo, inconsolidados, compuesto de partículas sólidas y pueden tener materia orgánica. Así, la clasificación de los materiales, granulometría, forma y tamaño, dependen del medio de transporte. Estos depósitos son refinados a partir de la interpretación de las unidades morfológicas descritas para la región y posteriormente calificados según metodología para susceptibilidad a movimientos en Masa generada por el Servicio Geológico Colombiano.

### **c) Procesos generados a partir de la Fotointerpretación**

Se genera a partir de las fotografías aéreas tomadas sobre la zona de estudio, en donde se describen y se generan polígonos con atributos específicos de acuerdo a sus características de procesos de movimientos en masa como deslizamientos, flujos y caídas, además de los procesos superficiales erosivos como la erosión laminar, surcos y cárcavas. Estos procesos se clasifican para generar una tabla de calificación en la cual se establece cada uno de estos aspectos, a su vez se establece un icono para la identificación de cada uno de ellos en la leyenda del mapa.

**Imagen 33 Flujo de detritos característico de la zona de estudio**



Fuente: E.D. Ingeotecnia S.A.S

**Imagen 34 flujo de lodo y detritos conectados entre sí característicos de la zona de estudio.**



Fuente: E.D. Ingeotecnia S.A.S

**Imagen 35 Flujo de lodo y tierra**



Fuente: E.D. Ingeotecnia S.A.S

### **3.4.3 MORFOMETRÍA**

La morfometría es la medida de la forma o geometría de cualquier cuerpo natural (Strahler, 1974). Según Gilsanz (1996), la morfometría es el conjunto de técnicas, procedimientos y métodos utilizados para determinar atributos configuracionales del relieve y, en base a ellos, conocer el sistema de relaciones espaciales que caracterizan a las formas del terreno. La morfometría contempla tres aspectos necesarios para su interpretación, pendiente, rugosidad y acuenca.

#### **3.4.3.1 Mapa de Pendientes**

Corresponde al valor del ángulo existente entre la superficie del terreno y el eje horizontal. Se puede expresar en grados o porcentaje y representa uno de los factores más importantes en los procesos morfométricos (SGC, 2012).

La determinación de rangos de clasificación del atributo pendiente se realizó asignando valores en función de la susceptibilidad establecidos en grados de la siguiente manera, 0-7 plana o suavemente inclinada con calificación 1 ó muy baja, 7-11 inclinada con calificación 2 ó baja, 11-19 muy inclinada con calificación 3 ó moderada, 19-40 abrupta con calificación 5 ó muy alta y >40 escarpada (presenta mejor estabilidad) con calificación 3 ó moderada.

### **3.4.3.2 Rugosidad**

La rugosidad del terreno se define como la variación de la pendiente en un área y representa la desviación del vector normal a la superficie en cada celda. El valor 0 corresponde a rugosidad nula y los valores se hacen mayores al aumentarla dispersión de los vectores (alta rugosidad). La rugosidad define bien las formas como los límites de taludes y laderas tanto en los valles como en las crestas (Felicísimo, 1992).

Los intervalos de susceptibilidad establecidos para la calificación de la variable rugosidad están dados de la siguiente forma: 0-0.985 calificación 1 o rugosidad muy baja, 0.985-0.99 calificación 2 o rugosidad baja, 0.99-0.995 calificación 3 o rugosidad moderada, 0.995-0.997 calificación 4 o rugosidad alta y 0.9975-1 calificación 5 o muy alta.

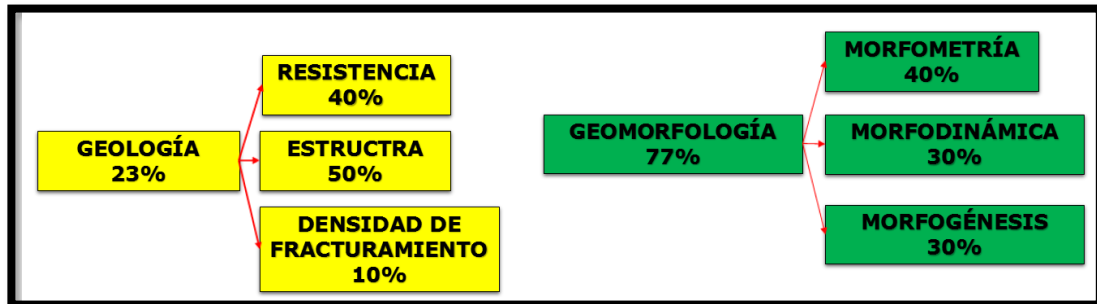
### **3.4.3.3 Acuenca**

La variable acuenca se relaciona con la cantidad de agua que es capaz de recoger e infiltrar en un terreno, a mayor superficie más agua infiltrada y más posibilidades de desarrollar inestabilidad en el terreno (Neuland, 1976, Hatano 1976, Okimura 1983, Oyagi 1984).

## CAPÍTULO 4. SUSCEPTIBILIDAD

El análisis de susceptibilidad permite definir las áreas que pueden llegar a estar propensas a algún evento, en este caso, un fenómeno de remoción en masa (FRM), clasificando desde zonas poco a muy susceptibles.

**Imagen 36 Diagrama gerarqico de suceptibilidad**



$$Geología = (densidad\ de\ feactura * 0,1) + (resistencia * 0,4) + (estructura * 0,5)$$

*Geomorfología*

$$= (Morfometría * 0,4) + (morfogénesis * 0,3) + (morfodinámica * 0,3)$$

$$Susceptibilidad\ 100\% = (Geología * 0,23) + (Geomorfología * 0,77)$$

A continuación se mostrará la susceptibilidad para cada una de las variables, su método de cálculo y finalmente el resultado total de la susceptibilidad presente.

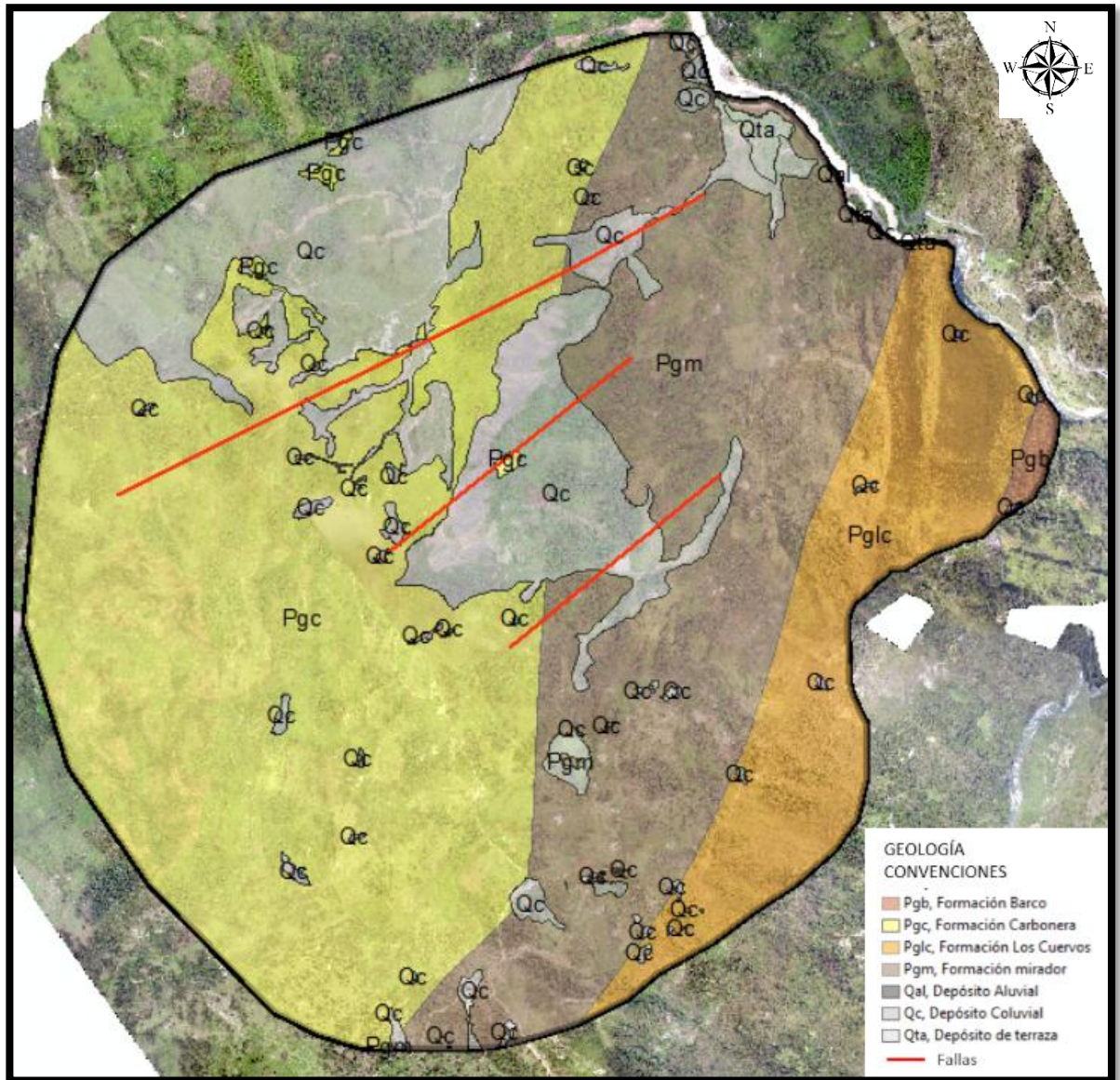
### 4.1 GEOLOGÍA

Inicialmente se realizó una restitución de las unidades y estructuras geológicas presentes en el área de estudio, usando como guía las planchas a escala 1:100.000 del Ingeominas y a través de ArcGIS 10.2.

Como el análisis del presente estudio es más detallado (1:2.000), se realizaron algunas mejoras en las unidades como, inclusión de los depósitos existentes en el área de estudio resultado de la fotointerpretación realizada sobre las fotografías aéreas capturadas mediante Drone. Estos depósitos se correlacionaron como unidades geológicas cuaternarias.

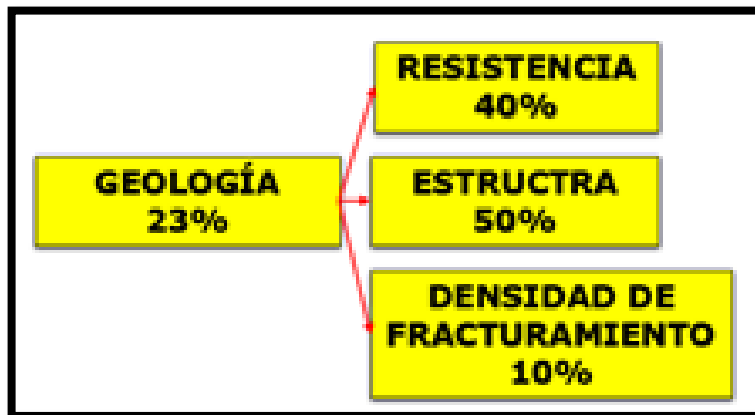
Generando el shape final de geología, tal como se muestra en la Imagen 37, para la misma zona anterior.

**Imagen 37 Implementación de los depósitos en las unidades geológicas restituidas**



Una vez generadas las unidades, se procede a asignar un peso a cada una según la variable a analizar. El SGC contempla en su metodología 3 variables Estructura/Fabrica, Resistencia y Densidad de Fracturamiento, distribuyendo el peso correspondiente a cada variable como se observa en la Imagen 38.

**Imagen 38 Diagrama susceptibilidad geológica**



Fuente: E.D. Ingeotecnia S.A.S.

#### **4.1.1 Resistencia**

Para el cálculo de resistencia se tuvieron en cuenta los diferentes tipos de rocas que afloran en el área de estudio y se clasificaron según la resistencia a la compresión simple propuesta por Hoek en 1999, en la Imagen 39 y Tabla 1 se muestra el grado de resistencia, el esfuerzo y un ejemplo del tipo de material que se puede encontrar, igualmente se definen los valores de calificación según dicha clasificación.

**Imagen 39 Categorías de resistencia a la compresión simple de las rocas, según Hoek 1997.**

Grade*	Term	Uniaxial Comp. Strength (MPa)	Point Load Index (MPa)	Field estimate of strength	Examples
R6	Extremely Strong	> 250	>10	Specimen can only be chipped with a geological hammer	Fresh basalt, chert, diabase, gneiss, granite, quartzite
R5	Very strong	100 - 250	4 - 10	Specimen requires many blows of a geological hammer to fracture it	Amphibolite, sandstone, basalt, gabbro, gneiss, granodiorite, limestone, marble, rhyolite, tuff
R4	Strong	50 - 100	2 - 4	Specimen requires more than one blow of a geological hammer to fracture it	Limestone, marble, phyllite, sandstone, schist, shale
R3	Medium strong	25 - 50	1 - 2	Cannot be scraped or peeled with a pocket knife, specimen can be fractured with a single blow from a geological hammer	Claystone, coal, concrete, schist, shale, siltstone
R2	Weak	5 - 25	**	Can be peeled with a pocket knife with difficulty, shallow indentation made by firm blow with point of a geological hammer	Chalk, rocksalt, potash
R1	Very weak	1 - 5	**	Crumbles under firm blows with point of a geological hammer, can be peeled by a pocket knife	Highly weathered or altered rock
R0	Extremely weak	0.25 - 1	**	Indented by thumbnail	Stiff fault gouge

\* Grade according to Brown (1981).  
 \*\* Point load tests on rocks with a uniaxial compressive strength below 25 MPa are likely to yield high ambiguous results.

Fuente: Hoek (1997)

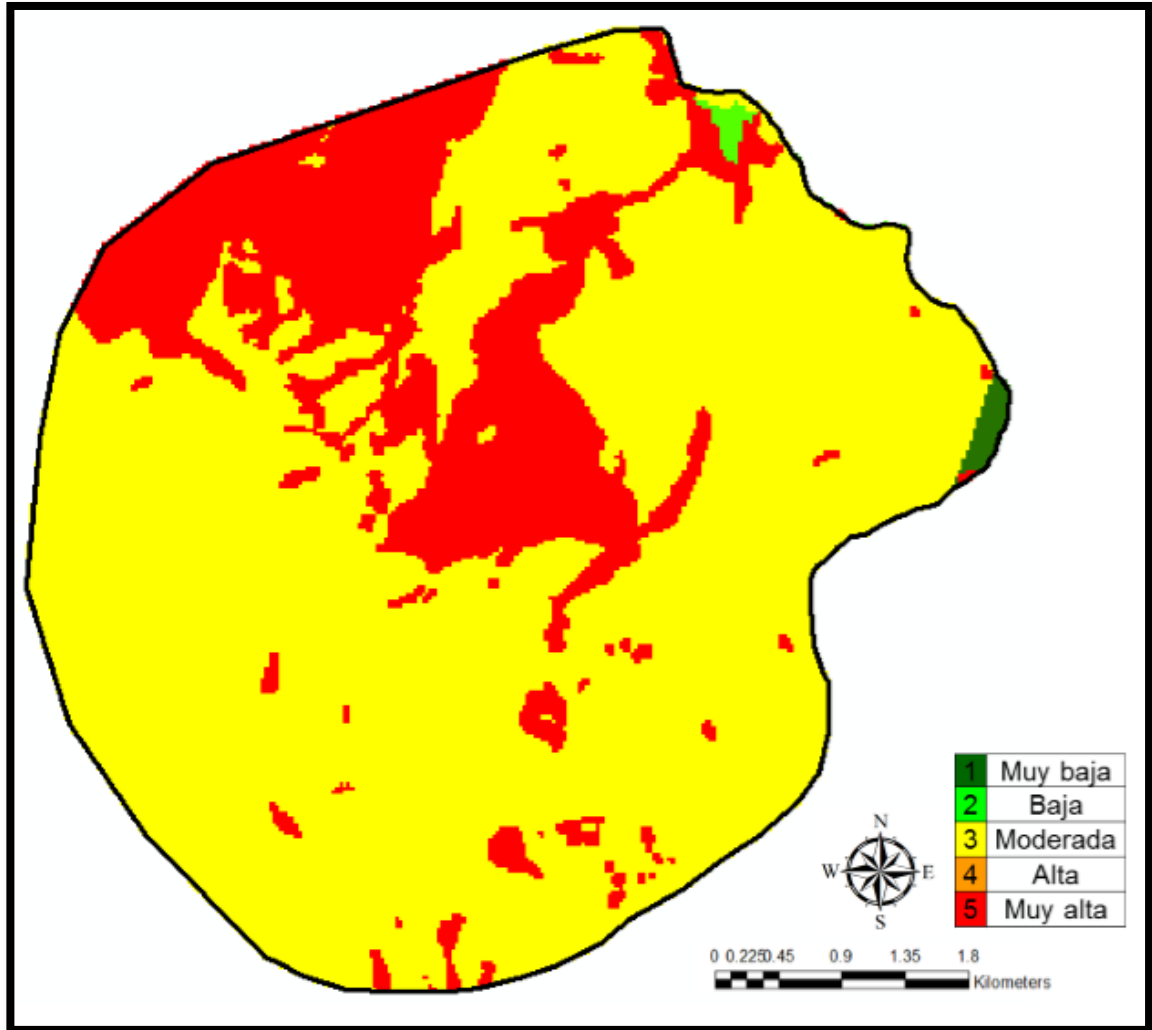
**Tabla 5 Propuesta de calificación de las rocas según su resistencia.**

Grado	Termino	Propuesta de Calificación
R6	Extremadamente dura	1
R5	Muy dura	1
R4	Dura	2
R3	Moderadamente dura	3
R2	Blanda	4
R1	Muy blanda	5
R0	Extremadamente blanda	5

Fuente: SGC – Metodologías FRM 1:100.000, 2013.

Una vez asignados los valores en la tabla de atributos, se clasifica la resistencia de 1 a 5, obteniendo como resultado la Imagen 40

**Imagen 40** Mapa de calificación por resistencia en el área de estudio.



#### 4.1.2 Densidad de frcturamiento

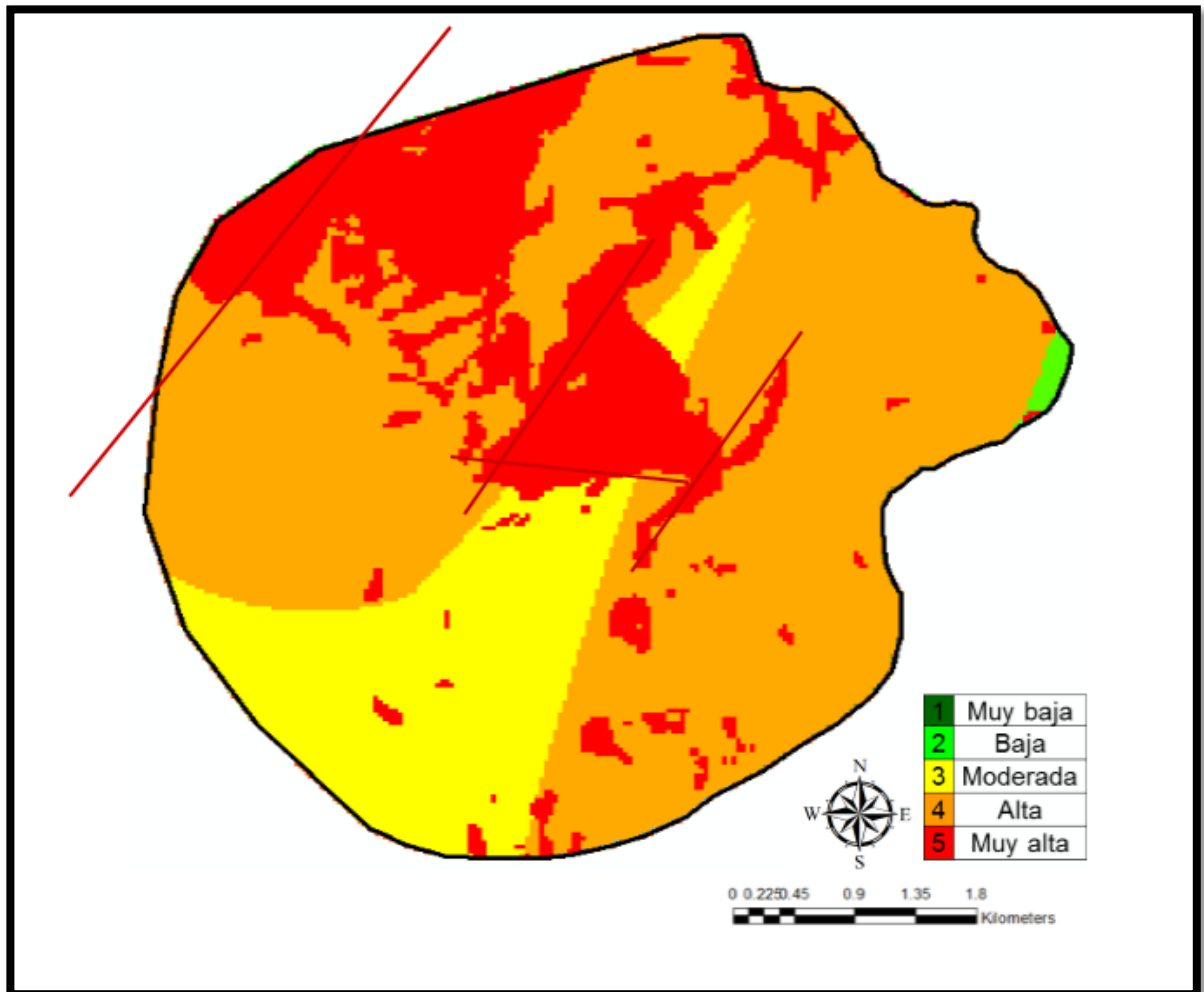
Esta variable se evalúa teniendo en cuenta las fallas y lineamientos estructurales, así como los ejes de los pliegues mayores más persistentes que afectan las rocas. Adicionalmente a la información secundaria sobre el trazado de las fallas, estructuras y lineamientos se llevó a cabo el trazado fotogeológico de nuevos lineamientos inferidos mediante el análisis y aplicación de métodos guías que involucran rasgos geomorfológicos; es de anotar que fue de gran valor el detalle de las fotografías aéreas tomadas directamente para este estudio.

Dentro de las actividades llevadas a cabo para esta valoración se tuvo en cuenta el análisis de fallas, pliegues y lineamientos cuyo método para calcular la densidad de fracturamiento es el algoritmo line Density de Arcinfo; este método se referencia en el Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y el cual es expresado en metros por kilómetro cuadrado, cuya finalidad es calcular la densidad de líneas en la vecindad de cada pixel definida por un radio de búsqueda; se dibuja en el centro un círculo de radio R, se toma la longitud de la línea de falla que cae dentro de éste círculo y se multiplica por el peso de la actividad, donde la suma total se divide entre el área del círculo.

El cálculo de la variable se obtuvo por medio de la herramienta de ArcGIS, usando la extensión de Density, teniendo en cuenta la longitud de falla y un radio de afectación de 1250 metros; los valores se clasificaron en 5 rangos, así: el valor mínimo de densidad más cercano a 0 (cero) fue de 0.07507 m/Km<sup>2</sup> caracterizando la menor afectación (amenaza muy baja) y el valor máximo más distante fue de 19.1428 m/Km<sup>2</sup> para la zona de mayor afectación (amenaza muy alta).

El resultado cartográfico de la amenaza por densidad de fracturamiento se muestra en la Imagen 41 de manera generalizada.

**Imagen 41 Mapa de calificación por densidad de fracturamiento en el área de estudio.**



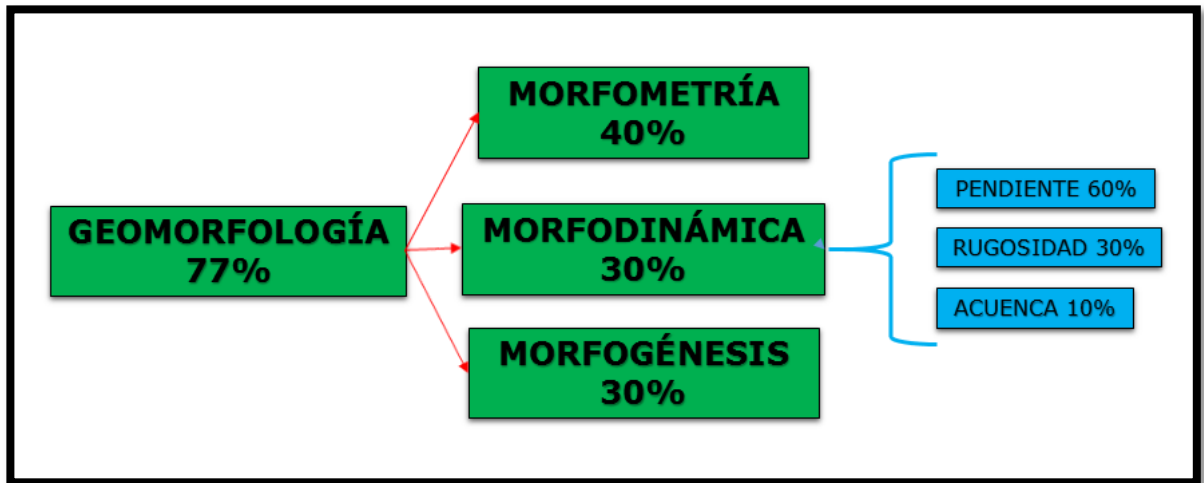
#### **4.1.3 Susceptibilidad geológica**

El mapa de susceptibilidad geológica, teniendo en cuenta las variables de resistencia y densidad de fracturamiento evaluadas para geología se obtuvo sumando las variables de acuerdo al peso correspondiente, cuyo resultado se puede observar en el anexo 1

#### **4.2 GEOMORFOLOGÍA**

Para el análisis geomorfológico se tuvieron en cuenta las tres (3) variables mencionadas por el SGC, en su metodología de movimientos en masa, modificando los porcentajes de peso respectivos. A su vez cada una de las variables contempladas tiene en cuenta la combinación de otros parámetros, obteniendo así el diagrama flujo de cálculo que se muestra en la Imagen 42.

**Imagen 42 Diagrama susceptibilidad geomorfológica**



Fuente: E.D. Ingeotecnia S.A.S.

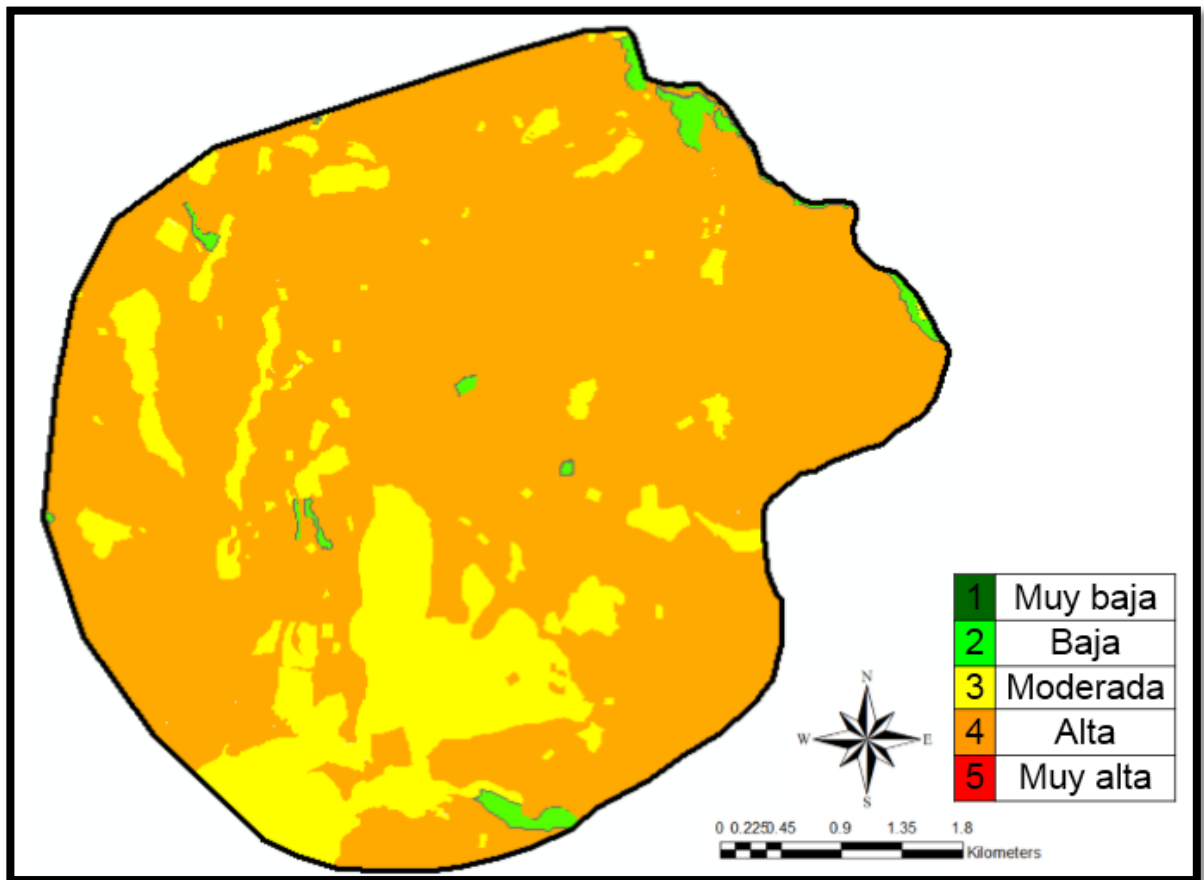
#### **4.2.1 MORFOGÉNESIS**

La elaboración del mapa de ambientes y unidades morfogénicas siguió dos etapas básicas: Interpretación y digitalización de unidades Morfogénicas y calificación de las unidades para generar el mapa de susceptibilidad por morfogénesis.

La interpretación de las unidades Morfogénicas se realizó tomando como insumos principales las fotografías aéreas suministradas por E.D. INGEOTECNIA S.A.S, así como también el mapa de sombras, el mapa de pendientes, la cartografía geológica oficial de Ingeominas y Google Earth. Los polígonos de cada geoforma se digitalizaron en el Software ArcMap 10.2.2. La nomenclatura utilizada para el mapa morfogenético se basó en el glosario de unidades geomorfológicas propuesto por el SGC (2012) ver anexo 2.

La calificación de cada una de las geoformas restituidas con respecto a su grado de susceptibilidad por movimientos en masa, se realizó con base en la tabla de calificaciones del SGC sintetizada en la Propuesta Metodológica para la elaboración de la geomorfología aplicada en la Zonificación de la susceptibilidad y Amenaza Relativa por movimientos en masa (2012). El resultado de la calificación morfogenética se muestra en la Imagen 43.

**Imagen 43 Mapa de unidades morfogenéticas calificadas**



#### **4.2.2 MORFODINÁMICA**

La generación de la variable morfodinámica se realiza a partir de la guía del documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000 hecho por el SGC, donde se realiza a través de un proceso de agrupamiento, el cual se construye a partir de la representación cartográfica de los suelos transportados vistos como geoforma, la descripción de procesos derivados de la fotointerpretación, del inventario de campo y las variables geométricas derivadas del modelo DEM. Es a través de este agrupamiento que se obtiene una distribución espacial de los movimientos y el comportamiento del relieve asociado a las características del material.

##### **4.2.2.1 Variables Geométrica Derivadas del DEM.**

- ❖ **Índice de relieve relativo (RR):** El índice de relieve relativo se define como la diferencia entre la mayor elevación y la menor elevación por unidad de área y se expresa como la máxima diferencia de altura del terreno por Km<sup>2</sup>. Este atributo se califica según su variación de altura (Tabla 6).

**Tabla 6. Calificación del atributo de Relieve Relativo.**

DESCRIPCION DEL RELIEVE	RESISTENCIA RELATIVA DEL MATERIAL	CALRELIE
Muy bajo.	Materiales muy blandos y erosionables.	1
Bajo.	Blando erosionable.	2
Moderado.	Moderadamente blando y erosión alta.	3
Alto.	Resistente y erosión moderada.	4
Muy alto.	Muy resistente y erosión baja.	5

Fuente: SGC, 2013.

- ❖ **Inclinación de la ladera (IL):** Se hace referencia a la inclinación de la ladera porque generalmente está relacionada con el tipo de material que conforma la unidad morfológica y con la susceptibilidad de dicha unidad a la formación de los movimientos en masa. En general se puede afirmar que existe una relación directa y proporcional. Aunque si es un factor dinámico importante, esta relación no siempre es correlacionable y depende principalmente del tipo de material. Este atributo se califica según su grado de inclinación (Tabla 7).

**Tabla 7. Calificación del atributo de inclinación de la Ladera.**

DESCRIPCION	CARACTERISTICAS DEL MATERIAL	CALINCLI
Plana a suavemente	Muy blanda y Muy baja susceptibilidad a MM.	1
Inclinada.	Blanda y baja MM.	2
Muy Inclinada.	Moderadamente Blanda y Moderada susceptibilidad a MM.	3
Abrupta.	Moderadamente Resistente y Moderada susceptibilidad a MM.	4
Muy abrupta.	Resistente y Alta susceptibilidad a MM.	5

Fuente: SGC, 2013.

- ❖ **Combinación del relieve relativo y la inclinación de la ladera (RelaIncli):** La combinación de los elementos fisiográficos, relieve relativo e inclinación de

la ladera mediante el modelo RelIncli, permite la agrupación en un mismo escenario de los elementos geomorfológicos con mayor tendencia a los movimientos en masa que a su vez son calificados de menor a mayor grado de inestabilidad, a partir del cálculo de los dos atributos.

$$\text{RelIncli} = 0.60 * \text{RR} + 0.40 \text{ IL}$$

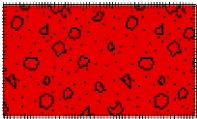
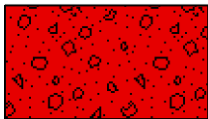
#### 4.2.2.2 Depósitos asociados a geoformas.

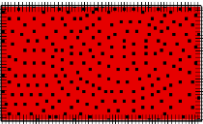
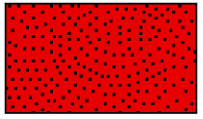
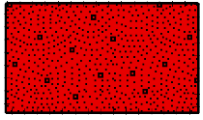
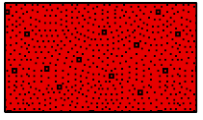


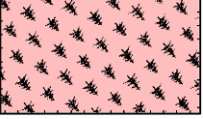

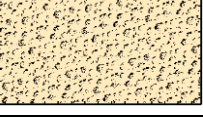
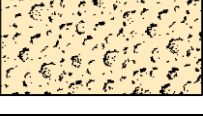
Son materiales resultantes de la acción dinámica de los procesos geomorfológicos y de agentes naturales, cuyo medio de transporte puede ser el agua, el hielo y el viento, con contribución de la gravedad como fuerza direccional selectiva, los cuales son depositados o llevados a los sitios que ocupan actualmente. Estos materiales son de carácter granular heterogéneo, no cohesivo, inconsolidados, compuesto de partículas sólidas y pueden tener materia orgánica. Así, la clasificación de los materiales, granulometría, forma y tamaño, dependen del medio de transporte. Estos depósitos son refinados a partir de la interpretación de las unidades morfológicas descritas para la región y posteriormente calificados según metodología para susceptibilidad a movimientos en Masa generada por el Servicio Geológico Colombiano.







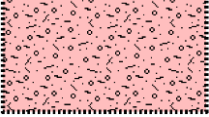
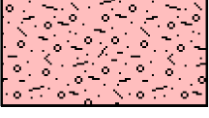
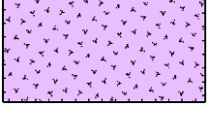
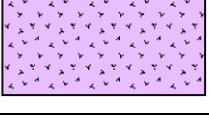
#### 4.2.2.3 Procesos generados a partir de la Fotointerpretación.



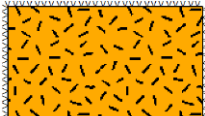

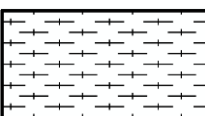
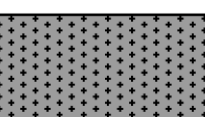
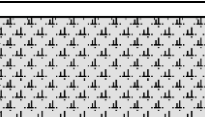
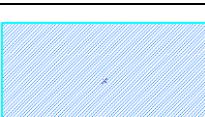
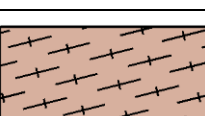
Se genera a partir de las fotografías aéreas tomadas sobre la zona de estudio, en donde se describen y poligonizan todos los procesos de movimientos en masa como deslizamientos, flujos y caídas, además de los procesos superficiales erosivos como la erosión laminar, surcos y cárcavas. Estos procesos se clasifican para generar una tabla de calificación en la cual se establece cada uno de estos aspectos, a su vez se establece un icono para la identificación de cada uno de ellos en la leyenda del mapa (Tabla 8, ver anexo 4)

**Tabla 8 Calificación y descripción de los movimientos cartografiados.**

COD	DESCRIPCIÓN	CALIFICACIÓN	ICONO
<b>Cra</b>	Caída de rocas activa	5	
<b>Cri</b>	Caída de rocas inactiva	4	

COD	DESCRIPCIÓN	CALIFICACIÓN	ICONO
<b>Csa</b>	Caída de suelos activa	5	
<b>Csi</b>	Caída de suelos inactiva	4	
<b>Cda</b>	Caída de detritos activa	5	
<b>Cdi</b>	Caída de detritos inactiva	4	
<b>Vra</b>	Volcamiento de rocas activo	5	
<b>Vri</b>	Volcamiento de rocas inactivo	4	
<b>Vfa</b>	Volcamiento flexural activo	5	
<b>Vfi</b>	Volcamiento flexural inactivo	4	
<b>Dta</b>	Deslizamiento traslacional activo	5	
<b>Dti</b>	Deslizamiento traslacional inactivo	4	

COD	DESCRIPCIÓN	CALIFICACIÓN	ICONO
<b>Dtca</b>	Deslizamiento traslacional en cuña activo	5	
<b>Dtci</b>	Deslizamiento traslacional en cuña inactivo	4	
<b>Dra</b>	Deslizamiento rotacional activo	5	
<b>Dri</b>	Deslizamiento rotacional inactivo	4	
<b>Pla</b>	Propagación lateral activa	5	
<b>Pli</b>	Propagación lateral inactiva	4	
<b>Fda</b>	Flujo de detritos activo	5	
<b>Fdi</b>	Flujo de detritos inactivo	4	
<b>Fla</b>	Flujo de lodos activo	5	
<b>Fli</b>	Flujo de lodos inactivo	4	

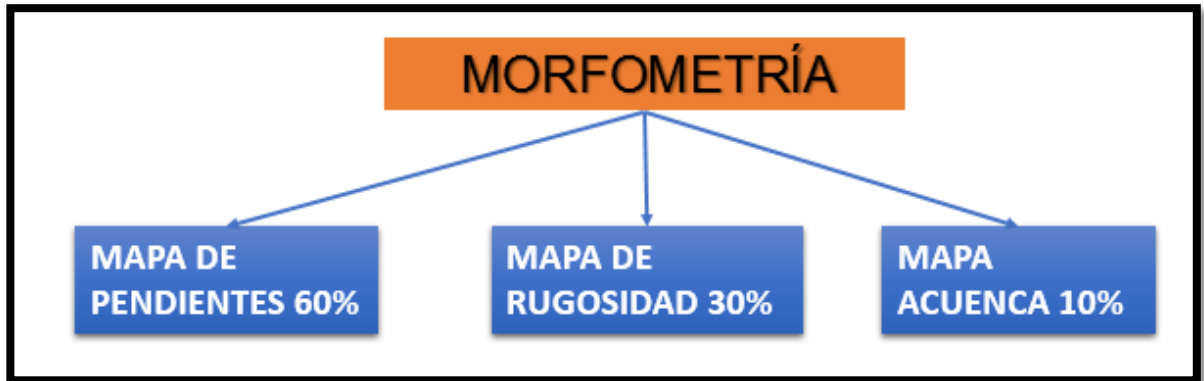
COD	DESCRIPCIÓN	CALIFICACIÓN	ICONO
<b>Ra</b>	Reptación activa	5	
<b>Ri</b>	Reptación inactiva	4	
<b>Gfa</b>	Gelifluxión activa	5	
<b>Gfi</b>	Gelifluxión inactiva	4	
<b>EI</b>	Erosión laminar	3	
<b>Es</b>	Erosión surcos	3	
<b>Ec</b>	Erosión cárcavas	4	
<b>Aca</b>	Asentamiento por cuerpos de agua	4	
<b>SI</b>	Socavación Lateral	5	

Fuente: E.D. Ingeotecnia S.A.S.

### 4.2.3 MORFOMETRÍA

Los análisis morfométricos partieron a partir del modelo de elevación (DEM) y mediante análisis usando las extensiones de ArcMap 10.2., la morfometría de la zona responde a la combinación de los factores de relieve, pendiente, rugosidad y acuenca, cada una con un peso respectivo, como se muestra en el diagrama de la Imagen 44.

*Imagen 44 Diagrama susceptibilidad morfométrica*



Fuente: E.D. Ingeotecnia S.A.S. – SGC.

#### 4.2.3.1 PENDIENTE

Esta variable se obtuvo usando el DEM de la zona y la herramienta “Slope” de ArcMap. La pendiente muestra la tasa de cambio máximo en el valor de altura de cada celda, teniendo en cuenta operaciones de vecindad (ventana de 3x3). La clasificación para esta variable corresponde a la relación entre la pendiente y el grado de estabilidad de los materiales, teniendo que la zona más inestable es aquella cuya pendiente oscila entre 19 a 40°, las zonas con pendientes mayores a 40° se intuye que poseen una mejor estabilidad (ver Tabla 9).

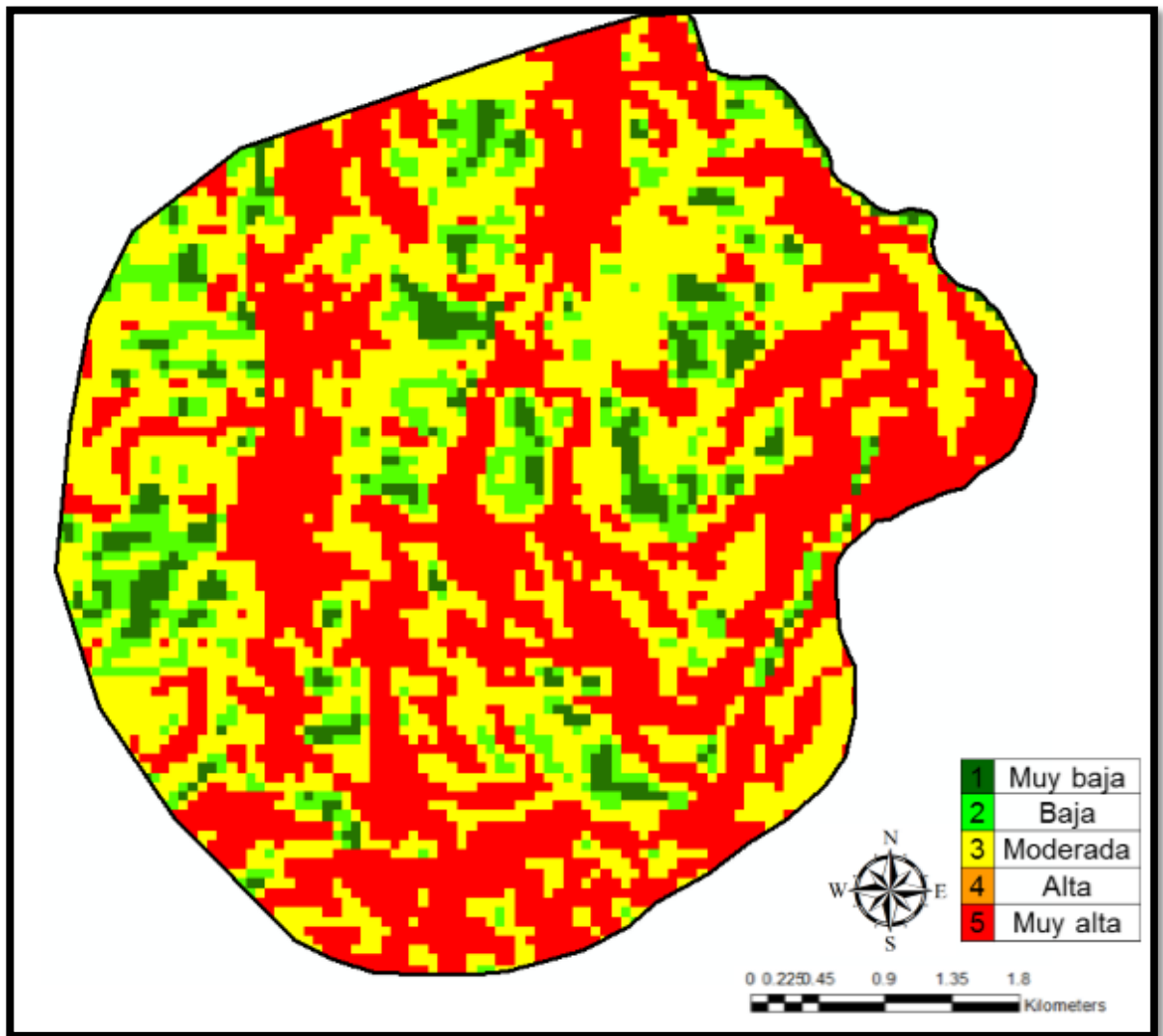
*Tabla 9 Calificación de variable pendiente*

Pendiente [°]	Susceptibilidad	Clasificación
0°-7°	Muy baja	1
7°-11°	Baja	2
11°-19°	Moderada	3
19°-40°	Muy alta	5
> 40°	Moderada	3

Fuente: E.D. Ingeotecnia S.A.S.

El resultado de la calificación y clasificación de la pendiente se muestra en la Imagen 45.

**Imagen 45** Mapa de calificación por pendientes en el área de estudio.



#### 4.2.3.2 RUGOSIDAD

El cálculo de la rugosidad corresponde a un análisis vectorial de la superficie y los puntos en su entorno (Felicísimo, 1994). La rugosidad muestra aquellas zonas donde la variación de la pendiente genera una infiltración de agua mayor en el suelo, y por tal razón mayor inestabilidad.

Utilizando las herramientas de ArcMap, se generan los análisis de pendiente y orientación (valores en radianes), implementando las expresiones dadas por Upton y Fingleton en 1989, se calculan las coordenadas circulares y el modulo vector suma. Igualmente el proceso deber ser afectado por operaciones de vecindad, en este caso una ventana de 9x9, con el fin de generar una relación de

los datos cercanos. Una vez obtenido el vector suma, se calcula la varianza esférica, según lo contemplado por Band en 1989.

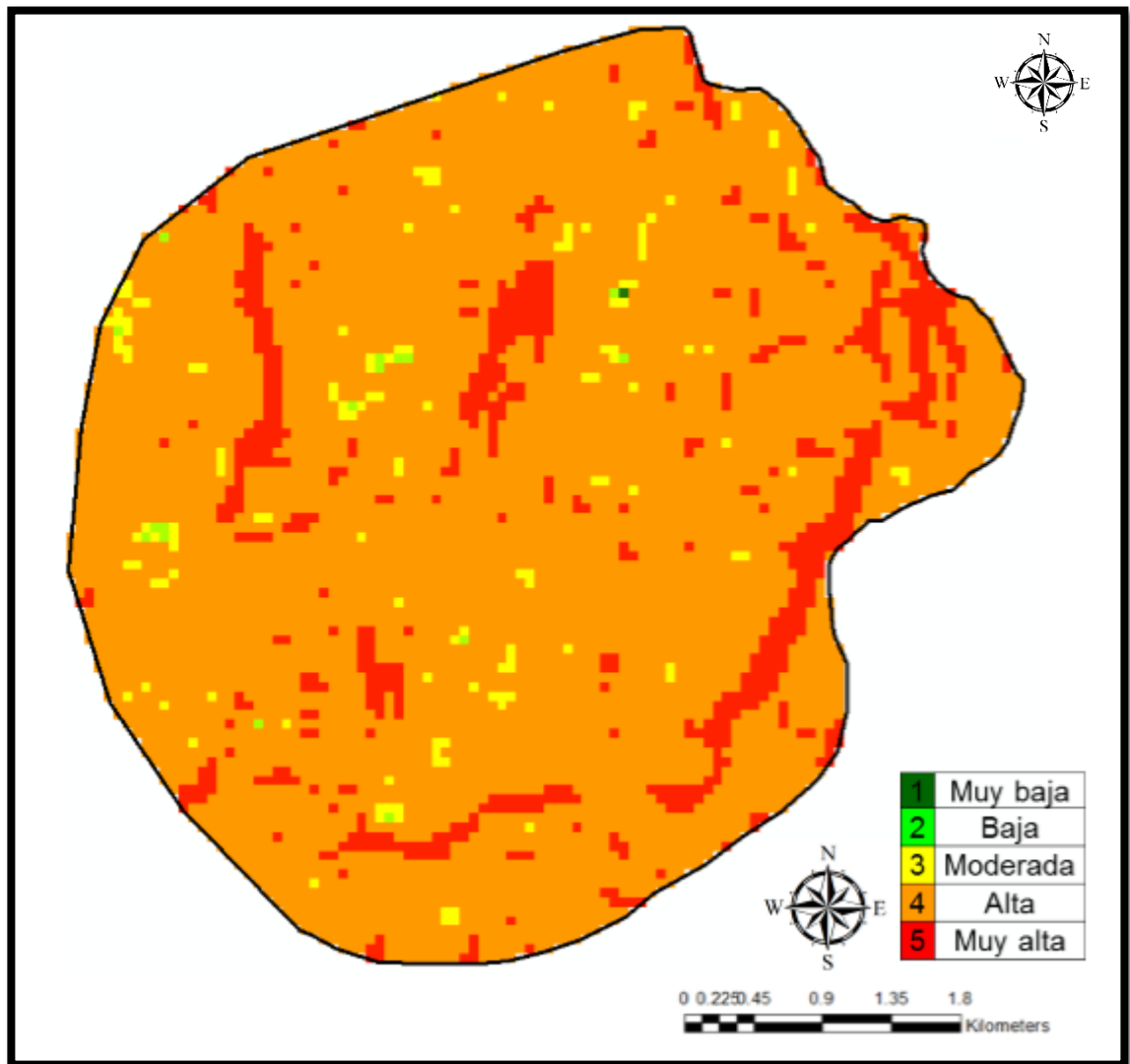
Según lo anterior, la rugosidad se puede expresar como:

$$\begin{aligned}X_i &= \text{sen}(\text{pendiente}) * \text{cos}(\text{orientación}) \\Y_i &= \text{sen}(\text{pendiente}) * \text{sen}(\text{orientación}) \\Z_i &= \text{cos}(\text{pendiente})\end{aligned}$$

$$R = \sqrt{\sum X_i^2 + \sum Y_i^2 + \sum Z_i^2}$$
$$V = 1 - \bar{R} = 1 - \frac{R}{n}$$

Los valores esperados en el análisis varían de 0 a 1, donde 1 representa el valor menos susceptible, es decir donde la rugosidad es casi nula, existe poca variación de pendiente y por ende más estabilidad. Según esto los valores de calificación se podrían definir como se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y los resultados se pueden ver en la Imagen 46.

**Imagen 46 Mapa de calificación por rugosidad en el área de estudio.**



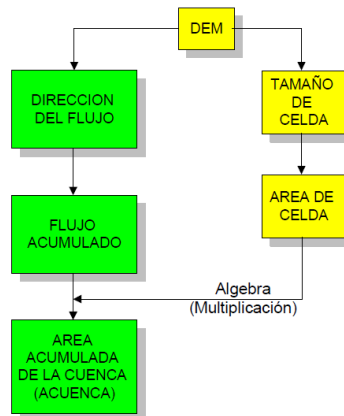
#### **4.2.3.3 ACUENCA**

La variable de acuenca muestra la acumulación de la cuenca en una celda determinada. Al igual que los parámetros anteriores, obedece a un cálculo determinado a partir del modelo de elevación y mediante herramientas de ArcMap, en este caso el análisis considera dos procesos de flujo, la dirección y acumulación.

La dirección de flujo permite definir cuáles son las celdas que por diferenciación de la pendiente fluyen hacia ella. Esto suponiendo que toda la cantidad de agua lluvia presenta escurrimiento superficial y que no existe infiltración en el suelo, evapotranspiración u otro tipo de pérdida.

Una vez definidas las celdas que representan la mayor cantidad de agua acumulada según la dirección del flujo, se multiplican por el área de cada una de ellas y se obtiene la cantidad de agua acumulada total. Las herramientas usadas son “Flow direction” y “Flow accumulation”. El diagrama que se muestra en la Imagen 47 sintetiza los procesos planteados.

**Imagen 47 Diagrama de flujo para el cálculo de la variable acuenca.**



Fuente: SGC, Metodología FRM escala 1:100.000, 2013.

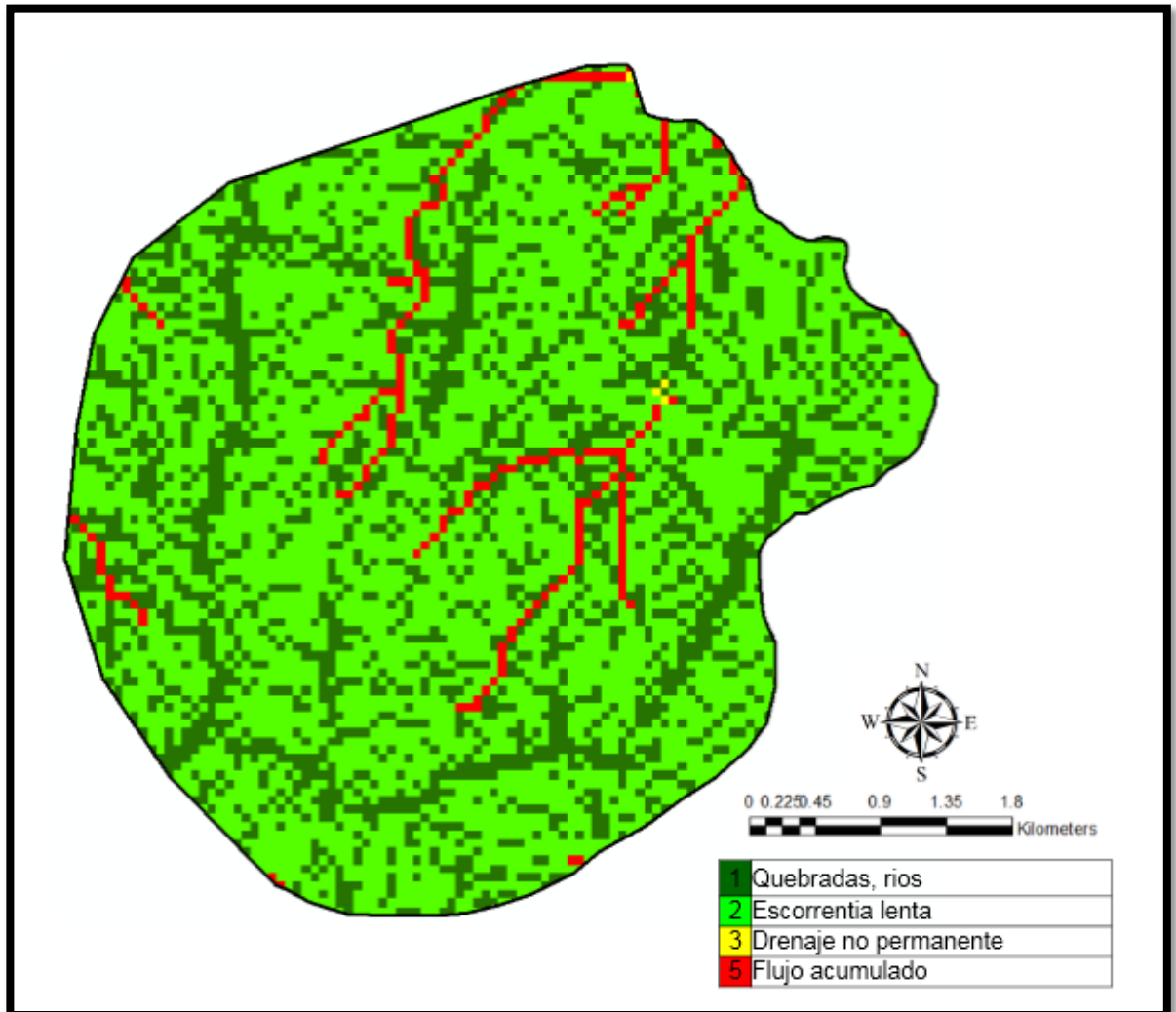
Una vez definidos tales valores, la variable acuenca se clasificó de acuerdo a la Tabla 10 y sus resultados se muestran en la Imagen 48.

**Tabla 10 Calificación de variable acuenca**

Descripción	Susceptibilidad	Clasificación
Divisoria de aguas	Muy baja	1
Escorrentia lenta	Baja	2
Flujo acumulado	Muy alta	5
Drenaje no permanente	Media	3
Quebradas, ríos	Muy baja	1

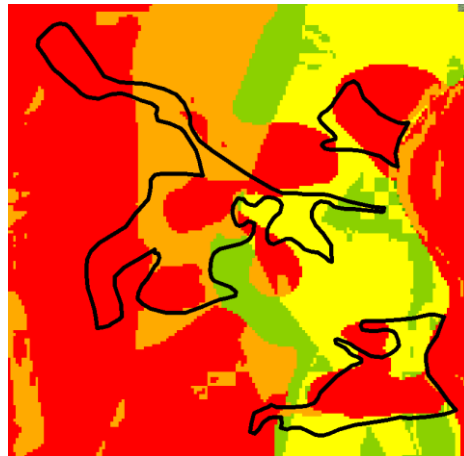
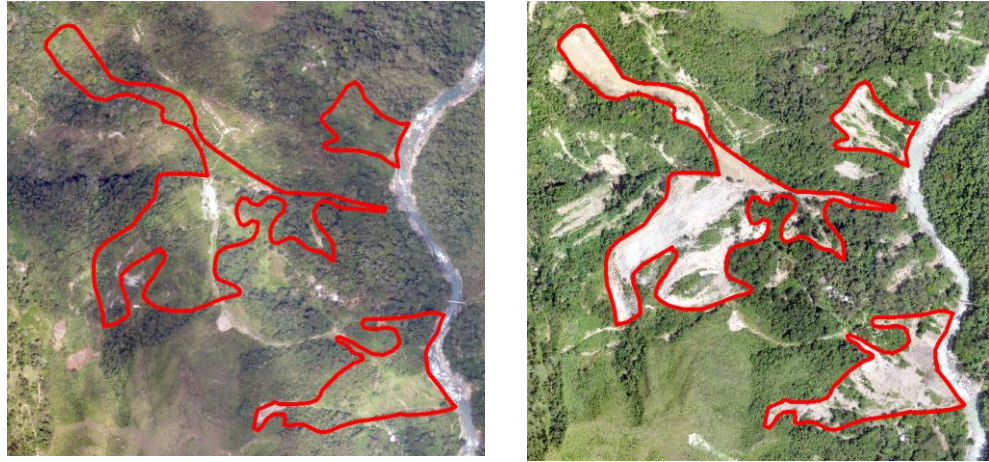
Fuente: E.D. Ingeotecnia S.A.S – SGC.

**Imagen 48 Mapa de calificación por cuenca en el área de estudio.**

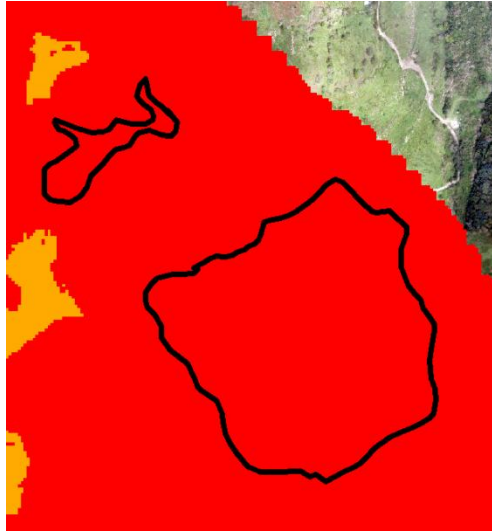


A continuación se muestra el monitoreo a partir de fotografías aéreas con Drone de algunos sectores que han sufrido cambios por eventos de FRM en diferentes meses, comparándolo con el resultado del análisis generado, el cual evidencia la precisión del modelo.

**Imagen 49** Monitoreo a sitios de inestabilidad más representativos del área de estudio



**Imagen 50 Monitoreo a sitios de inestabilidad más representativos del área de estudio**



## CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

Los estudios de susceptibilidad de amenaza por Fenómenos de Remoción en masa generan un insumo útil para la identificación de zonas potencialmente inestables en un área específica, permitiendo así proponer y diseñar obras de mitigación para evitar futuros daños en las obras o construcciones dentro del área de influencia del estudio.

En el área estudiada se pudo observar que las zonas que son más propensas a este tipo de eventos, son aquellas que posean un ambiente estructural o denudacional, dónde existan depósitos cuaternarios, por vegetación generada por efectos antrópicos (deforestación, cultivos), en los bosques en cercanías a fuentes hídricas o en aquellos suelos de origen aluvial, siendo más crítico cuando se presentan en conjunto.

Se observa una tendencia muy fuerte sobre unidades del ambiente estructural y denudacional los cuales presentan altos índices de susceptibilidad a movimientos en masa, según la calificación de las de todas las unidades morfológicas interpretadas sobre área de estudio.

Sobre las Formaciones Carbonera y Mirador se identificaron los principales flujos y la mayor afectación por movimientos en masa, asociados al control estructural presente en la zona, que se evidencia en el alto grado de fracturamiento y diaclasamiento, que junto a la acción de agua que se infiltra por estos espacios genera inestabilidad en las rocas.

Este sistema permitió definir con mayor precisión los depósitos, lineamientos y rasgos geomorfológicos claves para interpretar los fenómenos de inestabilidad de la zona estudiada, los cuales evidenciaron que el área en estudio se encuentra afectada por varios procesos de remoción en masa y se evidencian en la aparición de grandes grietas, desplazamientos del terreno de tipo flujos, cárcavas, reptaciones.

Aprovechar el detalle que ofrecen las fotografías aéreas con DRONE constituye una herramienta muy importante en la valoración de los aspectos que definen la susceptibilidad a fenómenos de remoción en masa, pues a escalas admisibles permiten identificar las zonas de mayor afectación por deslizamientos que bajo otras escalas presentan inconsistencias e incertidumbre en la interpretación.

## BIBLIOGRAFÍA

- Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH). (2007). *Colombian Sedimentary Basins: Nomenclature, Boundaries and Petroleum Geology, a New Proposal*. Bogotá D.C.
- ESRI. (2015). *ArcGIS Resources*. Obtenido de Ayuda de ArcGIS (10.2, 10.2.1 y 10.2.2):  
<http://resources.arcgis.com/es/help/main/10.2/index.html#/na/00qn0000001p000000/>
- Hoek, E., & Brown, E. T. (1997). *Practical estimates or rock mass strength*. Int. J. Rock Mech. & Mining Sci. & Geomechanics Abstracts.
- Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales (IDEAM). (Diciembre de 2013). *Guía metodológica para la elaboración de mapas geomorfológicos a escala 1:100000*. Bogotá D.C.
- Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales (IDEAM). (Junio de 2010). *Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia Escala 1:100000*. Bogotá D.C.: Scripto Ltda.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2002). *Mapa de Suelos de Colombia, Escala 1:500000 - Memoria explicativa*. Bogotá D.C.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2002). *Zonificación de los conflictos de uso de las tierras en Colombia*. Bogotá D.C.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2003). *Estudio General de Suelos y Zonificación de tierras de Norte de Santander*. Bogotá D.C. .
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2003). *Estudio General de Suelos y Zonificación de tierras de Santander*. Bogotá D.C.
- MORA, R., MORA, S., & VAHRSON, W. (1994). Mapa de amenaza de deslizamientos, Valle Central, Costa Rica - Escala 1:250000. *Centro de Coordinación para la prevención de desastres naturales de América Central (CEPRENAC)*.
- Rodríguez, J. G., Quintana, C. D., Rivera Alarcón, H. U., & Mosquera Tellez, J. (2013). Zonificación del peligro de remoción en masa en las zonas urbanas según método de análisis Mora y Vahrson: Estudio de Caso. *Revista Ambiental agua, aire y suelo*.

- Servicio Geológico Colombiano (SGC - antes Ingeominas). (Noviembre de 2014). *Sistema de información para el inventario, catalogación, valoración y administración de la información técnico-científica*. Obtenido de SICAT: <http://aplicaciones1.sgc.gov.co/sicat/html/ConsultaBasica.aspx>
- Servicio Geológico Colombiano (SGC) Y MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. (Agosto de 2013). *Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa, escala 1:100000*. Bogotá D.C.
- Suárez, J. (s.f.). *Deslizamientos Tomo I: Análisis geotécnico*. Bucaramanga.
- Suárez, J. (Julio de 1998). *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. Bucaramanga: Ingeniería de Suelos Ltda.
- Universidad Industrial de Santander. (2011). *Santander 2030, Diagnóstico dimensión biofísico ambiental territorial de Santander*. Bucaramanga.
- WARD, D., GOLDSMITH, R., CRUZ, J., & RESTREPO, H. (1973). *Geología de los cuadrángulos H12 Bucaramanga y H13 Pamplona, Departamento de Santander Ingeominas, Boletín Geológico, Vol. XXI*. Bogotá D.C.
- WARD, D., GOLDSMITH, R., JARAMILLO, L., & VARGAS, R. (1977). *Geología del cuadrángulo H13 Pamplona a escala 1:100000 Ingeominas*. Bogotá D.C.