



**Evaluación de la susceptibilidad y fragilidad física ante movimientos en masa de las viviendas asentadas en la ladera ubicada en el kilómetro 14+200 de la vía Las Palmas, sector La Borrascosa, vereda Carrizales en El Retiro, Antioquia.**

Cristian Gilberto Correa Ocampo

Trabajo de grado presentado para optar al título de Ingeniero Civil

Tutor

Juan Carlos Guzmán Martínez, Magíster (MSc) en Ingeniería con énfasis en geotecnia.

Lady Johana Sánchez Castañeda, Especialista (Esp) en Interventoría de obras.

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Civil

Medellín, Antioquia, Colombia

2021

<b>Cita</b>	(Correa Ocampo, 2021)
<b>Referencia</b>	Correa Ocampo, C.G. (2021). <i>Evaluación de la susceptibilidad y fragilidad física ante movimientos en masa de las viviendas asentadas en la ladera ubicada en el kilómetro 14+200 de la vía Las Palmas, sector La Borrascosa, vereda Carrizales en El Retiro, Antioquia.</i> [Trabajo de grado profesional.] Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
<b>Estilo APA 7 (2020)</b>	



Biblioteca Carlos Gaviria Díaz

**Repositorio Institucional:** <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - [www.udea.edu.co](http://www.udea.edu.co)

**Rector:** John Jairo Arboleda Céspedes.

**Decano:** Jesús Francisco Vargas Bonilla.

**Jefe departamento:** Diana Catalina Rodríguez Loaiza.

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

## Tabla de Contenido

Resumen .....	8
Introducción .....	9
1 Objetivos .....	10
1.1 Objetivo general .....	10
1.2 Objetivos específicos.....	10
2 Marco teórico .....	10
2.1 Evaluación de susceptibilidad ante movimientos en masa mediante el modelo SHALSTAB .....	11
2.1.1 Zonas Incondicionalmente inestables. ....	12
2.1.2 Zonas Incondicionalmente estables. ....	12
2.1.3 Zonas Estables. ....	13
2.1.4 Zonas Inestables.....	13
2.2 Evaluación de la fragilidad física ante movimientos en masa.....	13
3 Metodología .....	16
3.1 Revisión bibliográfica. ....	16
3.2 Elaboración de la propuesta de investigación. ....	16
3.3 Investigación aplicada y conceptual.....	17
3.4 Visitas de campo. ....	17
3.5 Procesamiento de datos. ....	17
3.6 Elaboración del informe final y sustentación.....	17
4 Resultados y análisis .....	18
4.1 Reconocimiento del tipo de suelo. ....	18
4.1.1 Suelo residual de depósito de vertiente (0,90 m – 4,50 m).....	18
4.1.2 Depósito de vertiente saprolitizado (4,50 m – 8,20 m).....	18

4.2 Zonificación de amenaza ante movimiento en masa.....	19
4.3 Condiciones de frontera.....	22
4.3.1 Cantera La Borrascosa.....	23
4.3.2 Quebrada La Borrascosa.....	24
4.3.3 Vía Medellín – El Retiro.....	25
4.3.4 Deslizamiento ocurrido en la parte posterior de las viviendas. ....	27
4.4 Evaluación de susceptibilidad mediante el modelo SHALSTAB.....	28
4.5 Evaluación de la fragilidad física.....	31
4.5.1 Tipología de las estructuras.....	33
4.5.2 Altura de las estructuras.....	34
4.5.3 Estado de conservación de las estructuras.....	36
4.5.4 Edad de las estructuras.....	36
5 Conclusiones .....	39
Referencias .....	42

## Lista de tablas

<b>Tabla 1</b> Factores de fragilidad por tipología de edificaciones.....	14
<b>Tabla 2</b> Factores de fragilidad por altura de las edificaciones. ....	14
<b>Tabla 3</b> Factores de fragilidad por estado de conservación de las edificaciones. ....	15
<b>Tabla 4</b> Factores de fragilidad por edad de las edificaciones. ....	15
<b>Tabla 5</b> Vida útil en función del tipo de edificación. ....	16
<b>Tabla 6</b> Parámetros geotécnicos. ....	19
<b>Tabla 7</b> Insumos necesarios para correr el modelo SHALSTAB. ....	28

## Lista de figuras

<b>Figura 1</b> Mapa de pendientes de la zona La Borrascosa. ....	20
<b>Figura 2</b> Mapa de amenaza por movimiento en masa de la zona La Borrascosa.....	21
<b>Figura 3</b> Deslizamiento ocurrido en el mes de abril del presente año.....	21
<b>Figura 4</b> (Izquierda) Deslizamiento ocurrido a 770 metros del punto de interés. (Derecha) Deslizamiento ocurrido a 730 metros del punto de interés. ....	22
<b>Figura 5</b> Fotografía aérea de la zona de estudio La Borrascosa. ....	23
<b>Figura 6</b> Tramo de la quebrada La Borrascosa perteneciente a la cantera. ....	24
<b>Figura 7</b> (Izquierda) Quebrada socavada al borde de las viviendas. (Derecha) Material de la cantera arrastrado aguas abajo.....	25
<b>Figura 8</b> Retiro de eje de vía de la carretera a las viviendas. ....	26
<b>Figura 9</b> Mapa de retiros a fuente hídrica y a eje de vía. ....	27
<b>Figura 10</b> Deslizamiento ocurrido en la parte posterior de las viviendas. ....	28
<b>Figura 11</b> Modelo de Elevación Digital (DEM) de la cuenca de estudio. ....	29
<b>Figura 12</b> Mapa de susceptibilidad ante movimientos en masa empleando el modelo SHALSTAB. ....	30
<b>Figura 13</b> Ortofoto antes y después de realizar la georreferenciación con la foto aérea.....	31
<b>Figura 14</b> Fotografía aérea de la parte posterior del asentamiento para caracterización. ....	32
<b>Figura 15</b> Fotografía aérea de la parte frontal del asentamiento para caracterización. ....	32
<b>Figura 16</b> Fotografía de la parte posterior del asentamiento para caracterización. ....	33
<b>Figura 17</b> Diagrama circular 3D de la tipología de las estructuras. ....	34
<b>Figura 18</b> Altura considerada a la hora de establecer la Altura de las edificaciones. ....	35
<b>Figura 19</b> Diagrama circular 3D de la altura de las edificaciones. ....	35
<b>Figura 20</b> Diagrama circular 3D del estado de conservación de las edificaciones. ....	36
<b>Figura 21</b> Diagrama circular 3D de la edad de las edificaciones. ....	37

**Figura 22** Mapa de fragilidad física de las viviendas asentadas en La Borrascosa.....38

**Figura 23** Diagrama circular 3D del factor de fragilidad de las edificaciones.....38

## Resumen

En los últimos años, se ha presentado un acelerado incremento de la población a nivel mundial, en donde se incluye el crecimiento poblacional que padece el municipio de El Retiro, ubicado en la región oriente del departamento de Antioquia. Este incremento, es una de las razones por la cual, las personas han optado por asentarse de manera permanente, tal es el caso del sector conocido como La Borrascosa ubicado en el kilómetro 14+200 de la vía que comunica a la ciudad de Medellín con el municipio de El Retiro, el cual, según el último Plan Básico de Ordenamiento Territorial (PBOT) en el artículo 167, se encuentra en una zona de riesgo medio por movimiento en masa. Al tener en cuenta factores naturales como topografía, parámetros del suelo, fuentes hídricas, y de factores no naturales como tipo de edificaciones y sobrecargas de tráfico, se procede a cuantificar la susceptibilidad y fragilidad física ante movimientos en masa. Para la susceptibilidad se emplea el modelo SHALSTAB (Shallow Landslide Stability Model), arrojando que la zona de estudio está rodeada por un terreno con condiciones inestables y susceptibles ante movimientos en masa. Por otro lado, el valor de fragilidad física se determina como un valor de daño a la estructura oscilando entre valores de 0.00 a 1.00, siendo 1.00 el valor más crítico. De esta manera se determina que todas las viviendas asentadas en el punto de interés se ubican por un valor superior a 0.80, concluyendo así que poseen una fragilidad alta ante un movimiento en masa.

*Palabras clave:* movimiento en masa, fragilidad, susceptibilidad, estabilidad de laderas, SHALSTAB.



## Introducción

El departamento de Antioquia, se considera un territorio con una topografía básicamente montañosa, con tendencia al escarpe y con unas pendientes máximas del 85% (Gonzales I., Humberto, 2001). Dentro de los municipios que lo conforman, se encuentra El Retiro, localizado en la cordillera central en la subregión oriente a los 06°03'31" de latitud y a los 75°30'16" de longitud Greenwich, con un clima generalmente frío, húmedo y tropical, donde la temperatura media es de 16°C y el régimen de precipitación anual varía entre 1000 mm y 4000 mm, siendo los meses de marzo y abril los de mayor intensidad (CORNARE, 2012). Todas estas características, hacen que el municipio sea una zona con alto riesgo de ocurrencia de fenómenos naturales como avenidas torrenciales, inundaciones o movimientos en masa, siendo este último uno de los fenómenos que genera mayores impactos socioeconómicos alrededor del mundo, causando pérdidas de vidas humanas y económicas (García-Aristizábal et al. 2019).

Además de todo lo anterior, se suma la problemática social del alto y acelerado crecimiento poblacional que se viene presentando en los últimos años, en los que una de las causas principales de movimientos en masa en las últimas décadas, ha estado íntimamente ligada al crecimiento de la población mundial y consecuente expansión urbana o asentamiento no legalizado sobre laderas susceptibles a este tipo de procesos. En Colombia, se han reportado en el último siglo treinta y seis desastres generados por movimientos en masa, siendo el ocurrido en Villatina en la ciudad de Medellín en el año 1987, el que más víctimas mortales deja, con un saldo estimado de seiscientos cuarenta personas muertas (Aristizábal et al., 2010). Además de esto, para un gran número de personas; en un país como Colombia donde predomina la desigualdad, la carencia de recursos para acceder a una vivienda digna o asequible en un lugar donde el riesgo sea mínimo, no les deja otra opción que la instalación de viviendas o lo que se conoce vulgarmente como invasiones ilegales. en zonas peligrosas de ladera.

El presente trabajo se propone con el fin de realizar una evaluación de la susceptibilidad y fragilidad física ante movimientos en masa que se pueda presentar en el sitio de interés, enfocado en las viviendas asentadas en la ladera localizada a la altura de La Borrascosa, vereda Carrizales en la zona rural del municipio de El Retiro, en la cual se evidencia tanto la problemática geomorfológica de las altas pendientes comunes en el territorio Antioqueño, así como la problemática social existente en la comunidad que reside en este sector, la cual se ve reflejada en

el tipo de estructuras construidas a lo largo de dicha ladera. De esta manera, se puede lograr establecer medidas con las que se pretende mitigar y evitar posibles daños que puedan ser ocasionados tanto en lo que respecta a vidas humanas, como a daños económicos y bienes inmuebles.

## **1 Objetivos**

### **1.1 Objetivo general**

Evaluar la susceptibilidad y fragilidad física ante movimientos en masa de las viviendas asentadas en la ladera ubicada en el sector La Borrascosa, vereda Carrizales en El Retiro, Antioquia.

### **1.2 Objetivos específicos**

- Caracterizar las propiedades geológicas y topográficas del suelo que abarcan la zona.
- Determinar las características de la precipitación existente en la zona.
- Estimar la susceptibilidad ante movimientos en masa.
- Describir los tipos de estructura presentes en el asentamiento.
- Identificar condiciones de frontera que tengan influencia sobre la ladera y que puedan potenciar el evento amenazante.
- Determinar la fragilidad estructural de las viviendas.
- Formular recomendaciones de control o mitigación de la fragilidad estructural y susceptibilidad evaluada.

## **2 Marco teórico**

Los movimientos en masa son producto del debilitamiento progresivo de las propiedades mecánicas de los materiales de las vertientes dadas por procesos naturales y por actividades humanas que activan movimientos lentos, generalmente imperceptibles (Aristizábal et al., 2010). Entre sus mayores causas, se encuentran los que son superficiales (0,3 m – 2 m) provocados por

intensas lluvias, donde la superficie de falla es plana y paralela a la superficie del terreno, con un escarpe de área pequeña, encontrados principalmente en ambientes tropicales y terrenos montañosos (Aristizábal et al., 2016) siendo este el escenario geomorfológico del municipio de El Retiro, donde según datos proporcionados por la administración municipal, en el último mes de marzo de 2021, ocurrieron cerca de diez movimientos en masa donde uno de ellos deja una víctima fatal y otro ubicándose a una proximidad considerable del punto de interés. Se encuentran también, según Aristizábal et al., (2020), los que son detonados por sismo, siendo solo el 0,7% de los movimientos en masa registrados en Colombia entre los años 1900 y 2016 a causa de este suceso. Según los autores, se ha generado el 5% de las víctimas fatales en todo el país producto de los movimientos en masa.

## 2.1 Evaluación de susceptibilidad ante movimientos en masa mediante el modelo SHALSTAB

Para el caso de la evaluación de la susceptibilidad ante movimientos en masa, se recurre al modelo SHALSTAB desarrollado en la Universidad de California en Berkley liderado por Dietrich y Montgomery en el año 1994 en el que se propone una relación entre la lámina de agua y el espesor del estrato de suelo, los cuales sufren variaciones según las condiciones topográficas (Vélez Upegui et al., 2004). Dicho modelo es ampliamente utilizado puesto que es un método que permite una excelente, rápida y precisa evaluación de la estabilidad por deslizamientos superficiales planares detonados por agua lluvia en suelo (Aristizábal E. & Jiménez, 2018). Al integrar modelos de estabilidad por taludes infinitos que incluyen el criterio de falla de suelo de Mohr-Coulomb relacionando el soporte y la desestabilización del material, y el modelo hidrológico propuesto por O' Loughlin (1986) que hace una relación entre la concentración y la transmisividad del agua en el suelo (Martins et al., 2017). Bajo estas condiciones, la columna de suelo saturado en inestabilidad está definida bajo la **ecuación 1** (Bartelletti et al., 2015).

$$W = \frac{h}{z} = \frac{q}{T} * \frac{a}{b * \text{sen}\theta} \quad (1)$$

Donde  $h$  es la profundidad vertical del flujo de la subsuperficie saturada,  $z$  es la profundidad del plano de falla,  $q$  es la intensidad de la lluvia;  $T = k * z * \text{cos}\theta$  es la transmisividad hidráulica

saturada donde  $k$  es la conductividad hidráulica;  $a$  es el área de drenaje,  $b$  es el ancho unitario,  $\theta$  es el ángulo de la superficie y  $W$  es la columna de suelo saturado en inestabilidad.

Por otro lado, para las condiciones topográficas se da una serie de valores para el factor de seguridad FS, calculada con la **ecuación 2** (Bartelletti et al., 2015).

$$FS = \frac{c' + (\gamma - W * \gamma_w) * z * \cos^2\theta * \tan\phi'}{\gamma * z * \sin\theta * \cos\theta} \quad (2)$$

Donde  $c'$  es la cohesión efectiva,  $\gamma$  es el peso unitario húmedo del suelo,  $\gamma_w$  es el peso unitario saturado y  $\phi'$  es el ángulo de fricción del suelo.

Así, combinando el modelo hidrológico con el modelo geotécnico se arroja como resultado un mapa de valores de susceptibilidad de deslizamientos (Malagón J. & Vanegas, 2020) y la ecuación básica del modelo SHALSTAB es obtenida y mostrada en la **ecuación 3**.

$$\frac{a}{b} = \left( \frac{c'}{\gamma_w * z * \cos^2\theta * \tan\phi'} + \frac{\gamma}{\gamma_w} * \left( 1 - \frac{\tan\theta}{\tan\phi'} \right) \right) * \frac{T}{q} * \sin\theta \quad (3)$$

De acuerdo con los resultados de la **ecuación 3**, el territorio puede ser dividido en cuatro clases de estabilidad mostrados en las siguientes ecuaciones (Bartelletti et al., 2015).

**2.1.1 Zonas Incondicionalmente inestables.** Hace referencia a los lugares que son inestables incluso si el sitio está seco ( $W=0$ ).

$$\tan\theta \geq \frac{c'}{\gamma * z * \cos^2\theta} + \tan\phi' \quad (4)$$

**2.1.2 Zonas Incondicionalmente estables.** Se refiere a los lugares que son estables incluso si el suelo se encuentra saturado ( $W=1$ ).

$$\tan\theta < \frac{c'}{\gamma * z * \cos^2\theta} + \tan\phi' * \left( 1 - \frac{\gamma_w}{\gamma} \right) \quad (5)$$

### 2.1.3 Zonas Estables.

$$\frac{a}{b} < \left( \frac{c'}{\gamma_w * z * \cos^2\theta * \tan\phi'} * \frac{\gamma}{\gamma_w} * \left( \frac{1 - \tan\theta}{\tan\phi'} \right) \right) * \frac{T * \text{sen}\theta}{q} \quad (6)$$

### 2.1.4 Zonas Inestables.

$$\frac{a}{b} > \left( \frac{c'}{\gamma_w * z * \cos^2\theta * \tan\phi'} * \frac{\gamma}{\gamma_w} * \left( \frac{1 - \tan\theta}{\tan\phi'} \right) \right) * \frac{T * \text{sen}\theta}{q} \quad (7)$$

Para este modelo se utilizan los parámetros que caracterizan el comportamiento geotécnico de los materiales que componen el suelo, más específicamente la cohesión, fricción, peso unitario, permeabilidad, profundidad del suelo y datos de precipitación de acuerdo con una curva IDF (Aristizábal E. & Jiménez, 2018).

## 2.2 Evaluación de la fragilidad física ante movimientos en masa.

Por otro lado, a partir de la expedición de la ley de gestión del riesgo de desastres (Ley 1523 de 2012), nace la obligación de todos los municipios del país, de realizar estudios de riesgos naturales encaminados a la planificación del desarrollo seguro y a la gestión ambiental territorial sostenible, con la llamada “Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa” (SGC, 2015). Con esta guía, se hace fundamental la evaluación de la amenaza por movimientos en masa para la correcta planeación y distribución del territorio, como parte de los elementos estructurales en la formulación de los Planes de Ordenamiento Territorial (POT) de los municipios (García-Aristizábal et al., 2019). De esta manera, definir las categorías de vulnerabilidad física, estimando los niveles de daño que pueden sufrir las edificaciones, relacionando el grado de fragilidad ante el evento amenazante, con la intensidad de las masas que se pueden desplazar en cuanto a energía, volumen o deformación.

Según Rojas y Uribe (2020), se debe evaluar la fragilidad de edificaciones con el fin de poder dar un diagnóstico en cuanto a vulnerabilidad, siendo la fragilidad la respuesta de los elementos expuestos frente a la interacción de los movimientos en masa con dichos elementos. Para la evaluación de la fragilidad, se consideran cuatro parámetros, relativos al tipo de estructura ( $S_{tip}$ ), altura de la edificación ( $S_{alt}$ ), su conservación ( $S_{con}$ ) y a su edad de construcción ( $S_{ed}$ ), con los cuales se calcula la fragilidad de la estructura ( $S_e$ ) mediante el modelo propuesto por Du et al.

(2013) y definido en la **ecuación 8**, tal como lo menciona la Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa (SGC, 2015):

$$S_e = 1 - (1 - S_{tip})(1 - S_{alt})(1 - S_{con})(1 - S_{ed}) \quad (8)$$

Dichos parámetros, se calculan de acuerdo con las siguientes tablas, proporcionadas por la Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa.

**Tabla 1**

*Factores de fragilidad por tipología de edificaciones.*

Tipología	Fragilidad	Stip
F – Construcciones simples	Muy alta	1.00
E – Estructuras ligeras	Alta	0.90
D – Estructuras con confinamiento deficiente	Media	0.70
C – Mampostería reforzada	Baja	0.50
B – Edificaciones reforzadas	Muy baja	0.30
A – Edificaciones con reforzamiento especial	Extremadamente baja	0.10

Adaptado de SCG (2015), [Tabla 4-10].

**Tabla 2**

*Factores de fragilidad por altura de las edificaciones.*

Tipología	Número de pisos	Salt
E, F	$\geq 2$	0.90
D	$\geq 4$	0.90
D	2 y 3	0.60
Demás tipologías y alturas	--	0.05

Adaptado de SCG (2015), [Tabla 4-11].

**Tabla 3***Factores de fragilidad por estado de conservación de las edificaciones.*

Estado de conservación	Descripción	Separación grietas (mm)	Scon
Muy bueno	No se observan deformaciones, agrietamiento o envejecimiento	0	0.00
Bueno	Solo se observan daños superficiales leves en los acabados	0 – 0.5	0.05
Deformaciones leves	Fisuras en juntas horizontales en los extremos superior e inferior de elementos verticales	0.5 – 1.0	0.25
Deformaciones medias	Desplazamiento relativo o movimiento en el plano fuera de él (pandeo)	1.0 – 5.0	0.50
Deformaciones graves	Inclinaciones del elemento fuera de su plano vertical	5.0 – 10.0	0.75
Deformaciones muy graves	Unidades de mampostería y concreto con fallas por aplastamiento	>10.0	1.00

Adaptado de SCG (2015), [Tabla 4-12].

**Tabla 4***Factores de fragilidad por edad de las edificaciones.*

Relación de Años de servicio/Vida útil	Stip
≤0.1	0.05
0.1 – 0.4	0.10
0.4 – 0.6	0.30
0.6 – 0.8	0.50
0.8 – 1.0	0.70
1.0 – 1.2	0.80
>1.2	1.00

Adaptado de SCG (2015), [Tabla 4-13].

En caso de que la estructura sea de diseño informal, el profesional debe estimar su vida útil de acuerdo con información debidamente soportada y en base a la **tabla 5**.

**Tabla 5**  
*Vida útil en función del tipo de edificación.*

Tipología	Vida útil
A y B	50 años
C y D	30 años
E	15 años
F	1 – 2 años

Adaptado de SCG (2015), [Tabla 4-14].

### **3 Metodología**

Con el fin de lograr evaluar la susceptibilidad y fragilidad física ante movimientos en masa de las edificaciones asentadas en el sector anteriormente mencionado, se estableció un orden lógico de procedimiento que permitiera estimar valores cualitativos y cuantitativos, con los cuales se establecieron medidas de control y mitigación para la fragilidad estructural evaluada.

#### **3.1 Revisión bibliográfica.**

Luego de indagar sobre los conceptos a tratar en el proyecto, se recurrió a bases de datos almacenadas de forma electrónica, las cuales están suscritas a la Universidad de Antioquia, lo que permite tener más fácil acceso a la información, y poder sistematizar, almacenar y estudiar posibles metodologías y variables que ayuden en la elaboración de la propuesta de investigación.

#### **3.2 Elaboración de la propuesta de investigación.**

Con la información recolectada en la revisión bibliográfica, se procedió a elaborar una propuesta de investigación en la que se evidenciaron elementos que pudieron ayudar a realizar la misma de forma correcta, donde se dejó claro la justificación y viabilidad de la investigación, así como los vacíos en el conocimiento.



### **3.3 Investigación aplicada y conceptual.**

Junto con la revisión bibliográfica descrita en el primer ítem de la metodología, se realizó un reconocimiento de la información del Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres (PMGRD) y el Plan Básico de Ordenamiento Territorial (PBOT) que se pudo consultar como base normativa de la administración municipal, así como información de estudios, intervenciones, cartografía, antecedentes y delimitaciones que pudieron facilitar la correcta elaboración del proyecto.

### **3.4 Visitas de campo.**

Se realizaron visitas a la vereda Carrizales sector La Borrascosa, lugar donde se encuentra el punto de interés, en el cual se llevó a cabo un reconocimiento general de la zona, identificando tipología, altura, edad y estado de conservación de las estructuras, factores que pueden ser potenciales detonantes de un movimiento en masa y condiciones de frontera como tipo de suelo, afluentes, entre otros que puedan generar afectaciones en las viviendas que están siendo evaluadas.

### **3.5 Procesamiento de datos.**

Con la información recolectada en campo, en la fase de investigación y luego de haber hecho un registro fotográfico, se establecieron las variables más significativas que pueden influir en la estabilidad de la ladera, la capacidad de respuesta de las estructuras ante un posible movimiento en masa y los parámetros necesarios a incluir en la modelación de la susceptibilidad mediante el modelo SHALSTAB. Además, se realizó también la estimación de los parámetros solicitados por la Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa y de esta manera se pudo calcular los valores de fragilidad física que puede experimentar el asentamiento ante movimientos en masa.

### **3.6 Elaboración del informe final y sustentación.**

Con la información bibliográfica y datos obtenidos en las visitas de campo, se realizó el informe final donde se muestra el mapa y evaluación de susceptibilidad con sus respectivas categorías y se deja claro el cálculo de la fragilidad física de las viviendas, análisis de resultados, observaciones y recomendaciones para el sitio de interés.

## 4 Resultados y análisis

Existen diversos factores que se deben considerar al realizar el análisis de susceptibilidad y fragilidad física ante la amenaza de un movimiento en masa, además de los mencionados en el marco teórico: tipología, altura, conservación y edad de las edificaciones. La geomorfología del terreno, afluentes, pendientes, condiciones externas al terreno natural y la estabilidad propia del punto donde existe el asentamiento, son algunos de los aspectos relevantes tenidos en cuenta para la correcta evaluación de la fragilidad.

Inicialmente, se cuenta con una ortofoto datada del año 2012 en formato “. ecw” de las zonas rurales y casco urbano del municipio de El Retiro, proporcionada por la Secretaria de Hábitat y Desarrollo Territorial de la administración municipal, la cual es una herramienta utilizada en el análisis espacial de toda la extensión territorial del municipio. Con esta, se facilita la ubicación y localización del punto de estudio, además de que permite plantear una idea de qué tan poblado estaba dicho punto en el 2012 y de que, al culminar este trabajo, sirve como soporte para futuras intervenciones que se vayan a realizar en el lugar.

### 4.1 Reconocimiento del tipo de suelo.

Debido a que la zona en donde está ubicado el punto de interés registra poca información referente a los parámetros del suelo, la administración municipal facilita un estudio realizado a doscientos sesenta y cinco metros de allí, en el que se tiene como objetivo general el análisis de estabilidad de un talud. En este, se encuentra que la zona está compuesta mayormente por un suelo residual de depósito de vertiente en su estrato superior y depósito de vertiente saprolitizado en el estrato inferior, con las siguientes características geotécnicas:

**4.1.1 Suelo residual de depósito de vertiente (0,90 m – 4,50 m).** Material compuesto por una granulometría fina, con humedad media y plasticidad de media a alta. Cuenta con presencia de limos de baja compresibilidad (ML), y una resistencia promedio al ensayo de penetración estándar de 5 golpes/pie, lo que podría indicar una resistencia baja.

**4.1.2 Depósito de vertiente saprolitizado (4,50 m – 8,20 m).** Suelo de color café amarillento con motas grisáceas con una matriz que envuelve gravas de diferente grado de meteorización de hasta 4” de diámetro. Posee una humedad media hasta una profundidad de 7,20 m, punto a partir del

cual, a más profundidad, se presenta un incremento significativo en la cantidad de agua, lo que indica la posible presencia del nivel freático.

El estudio adoptado, en el cual se describen todas las características anteriormente mencionadas, proporciona también la **tabla 6** mostrada a continuación, en la que se evidencian los valores del peso unitario, cohesión y ángulo de fricción del suelo.

**Tabla 6**

*Parámetros geotécnicos.*

Material	$\gamma$ (KN/m)	$c$ (KPa)	$\phi$ (°)
Suelo residual de depósito de vertiente	17	10	24
Depósito de vertiente saprolitizado	18	11	27

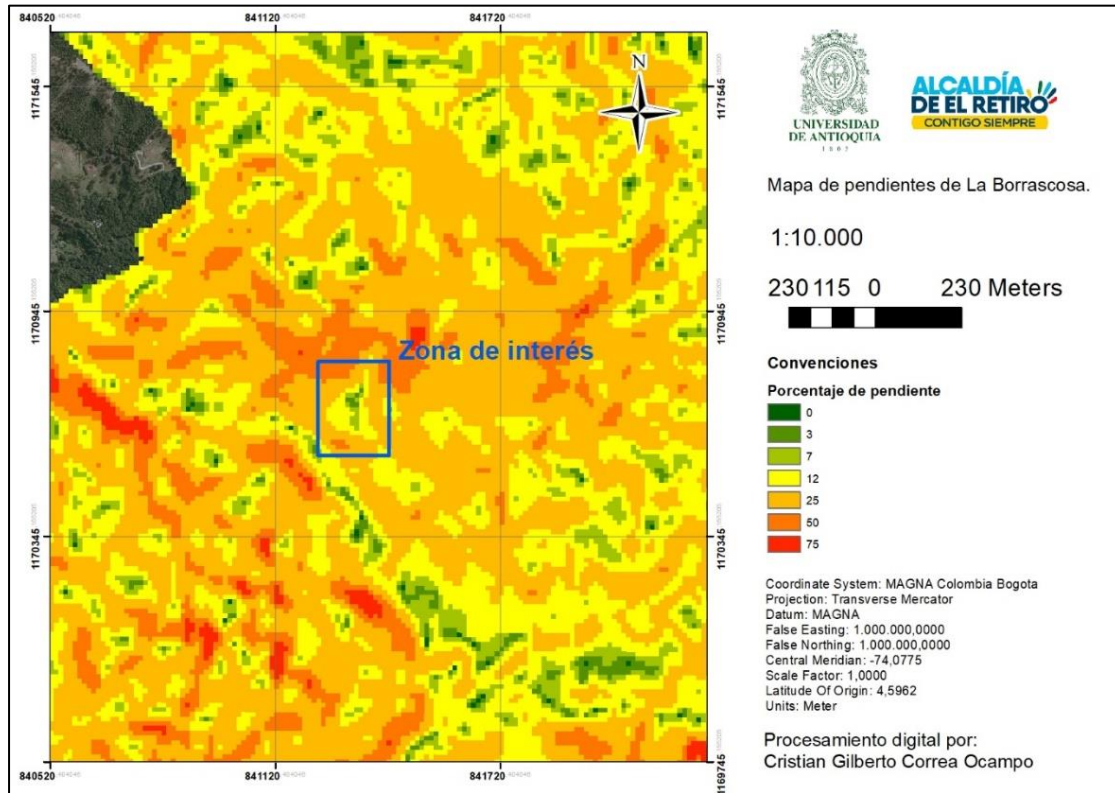
*Fuente.* Análisis de estabilidad talud vía de acceso finca La Cascada, Administración Municipal de El Retiro.

#### **4.2 Zonificación de amenaza ante movimiento en masa.**

Para tener una idea clara de las pendientes de las laderas presentes en la zona de estudio, se procede a elaborar un mapa de pendientes con base en un Modelo de Elevación Digital (DEM) de una porción de la región oriente de Antioquia, sacado de la plataforma EarthData – ASF Data Search. Este permite tener una apreciación de las pendientes presentes en el punto de interés, donde según la **figura 1**, predominan pendientes medias de entre el 12% y 25%.

## Figura 1

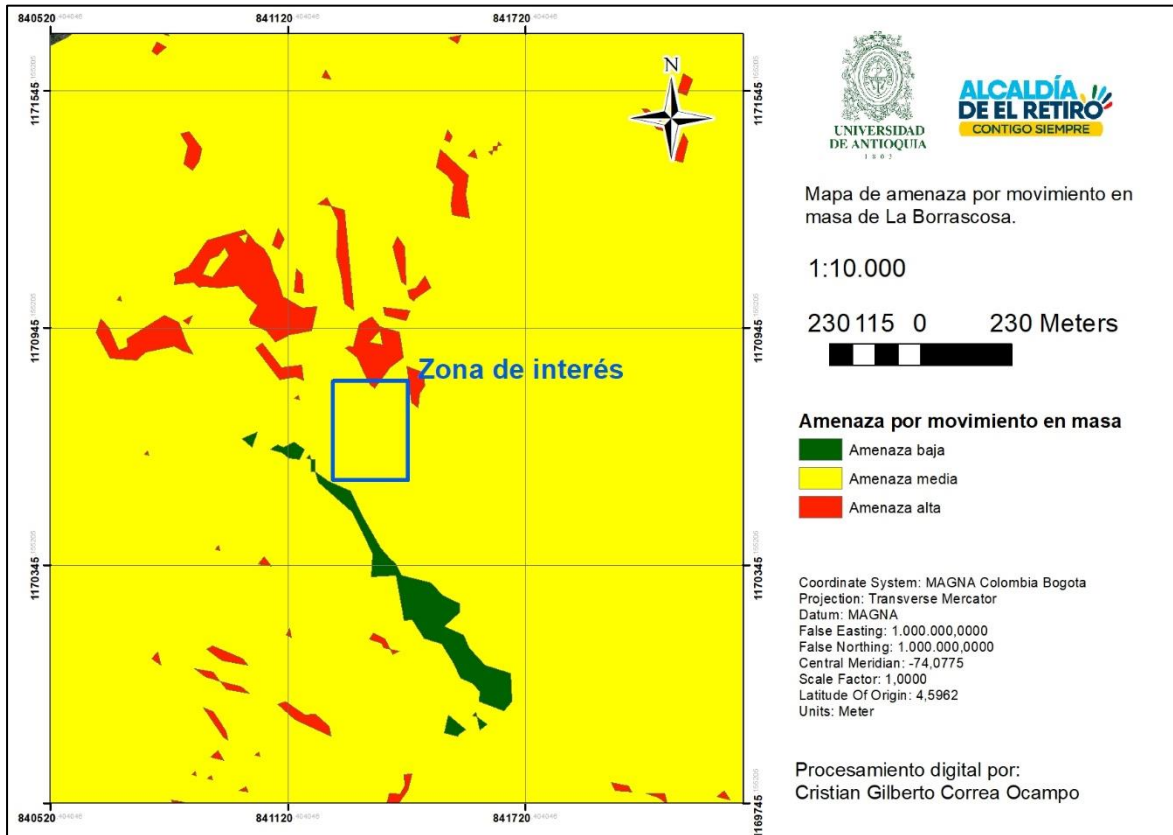
Mapa de pendientes de la zona La Borrascosa.



Por otro lado, el terreno en donde están ubicadas las viviendas se clasifica de riesgo medio por movimiento en masa según el Plan Básico de Ordenamiento Territorial (PBOT) del municipio de El Retiro, año 2013, en su artículo 167. Como soporte, se recurre al mapa proporcionado por CORNARE mostrado en la **figura 2**, donde se dimensiona la amenaza por movimiento en masa realizado en el año 2012, con una convención de colores de riesgo alto a bajo. Efectivamente, el punto se encuentra en una zona de riesgo medio, donde de hecho, en el mes de abril del presente año, se presentó un deslizamiento, mostrado en la **figura 3**, que causó graves afectaciones al afluente que atraviesa la zona. Además, este punto se encuentra en cercanías a zonas en donde el riesgo se clasifica alto y en las cuales se tiene un historial reciente de deslizamientos ocurridos en la época invernal del presente año, como se evidencia en la **figura 4**.

## Figura 2

Mapa de amenaza por movimiento en masa de la zona La Borrascosa.



Nota. Fuente CORNARE.

## Figura 3

Deslizamiento ocurrido en el mes de abril del presente año



Nota. Fuente Registro fotográfico Secretaría de Hábitat y Desarrollo Territorial. Abril, 2021.

#### **Figura 4**

*(Izquierda) Deslizamiento ocurrido a 770 metros del punto de interés. (Derecha) Deslizamiento ocurrido a 730 metros del punto de interés.*



*Nota.* Fuente Registro fotográfico Secretaría de Hábitat y Desarrollo Territorial. Abril, 2021.

#### **4.3 Condiciones de frontera.**

Al tener una recolección de información suministrada por el archivo de la Administración Municipal, se procedió a realizar visitas de campo para llevar a cabo una caracterización de las condiciones o factores externos que puedan tener efecto en la estabilidad de la ladera de estudio, así como la caracterización de toda la variedad de edificaciones presentes en la zona, almacenando esta última, en una base de datos de Microsoft Excel para luego ser exportada con sus respectivos polígonos en un mapa elaborado en ArcGIS. En síntesis, las condiciones de frontera existentes se resumen en la **figura 5**.

## Figura 5

Fotografía aérea de la zona de estudio La Borrascosa.



Nota. Fuente Registro fotográfico Secretaría de Hábitat y Desarrollo Territorial. Abril, 2021.

En la fotografía de la **figura 5**, se evidencian cuatro principales factores que pueden incurrir en afectaciones a la ladera y, por ende, a las viviendas que allí se ubican. Tener más factores de los que de por sí ya lo son las propias estructuras y su proceso constructivo, son una clara alarma de riesgo que precede a las viviendas. Los cuatro principales factores se listan a continuación:

**4.3.1 Cantera La Borrascosa.** Es una cantera a cielo abierto que extrae material para construcción (arena, triturado), cuyo método de explotación es por voladura haciendo uso de dinamita, lo cual genera constantes vibraciones en la tierra que pueden ocasionar movimientos y asentamientos de alto riesgo para las viviendas cercanas a esta. Además, al estar ubicada justo por la zona que atraviesa la quebrada La Borrascosa, el material residual que resulta de la misma, así como los pequeños taludes que están al borde de la quebrada inestables por las vibraciones, son causantes de avenidas torrenciales en la parte baja del afluente, justo en donde están ubicadas las viviendas objeto de estudio. **Figura 6.**

## Figura 6

*Tramo de la quebrada La Borrascosa perteneciente a la cantera.*



*Nota.* Fuente Registro fotográfico de elaboración propia. Junio, 2021.

**4.3.2 Quebrada La Borrascosa.** Es una quebrada que nace a la altura de la jurisdicción de Envigado y, que atraviesa, además de la cantera mencionada anteriormente, la zona en que están asentadas las viviendas estudiadas. En la resolución 02033 expedida el 13 de noviembre de 2018 por la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) en la que se solicita el licenciamiento ambiental del proyecto vial denominado “*Doble calzada de Oriente – DCO*”, la cual atraviesa el punto de estudio, se menciona que en dicha quebrada se presenta un problema morfodinámico asociado a eventuales avenidas torrenciales, las cuales, podrían generar inundaciones, socavaciones, inestabilidad de orillas, migración y profundización de lechos. Además, se menciona también, que a lo largo de la quebrada existe una falla geológica que podría causar problemas de estabilidad. A todos estos factores, se le suma el hecho de que las viviendas que están al borde de



la quebrada y las cuales son el objeto de estudio, no cumplen el retiro de 30 metros a fuente hídrica, establecido en el Acuerdo 251 de agosto 10 del 2011, y realizan sus respectivas descargas de aguas residuales al cauce de la quebrada. En la **figura 7**, (izquierda) se alcanza a apreciar el grado de socavación en el que se encuentra la quebrada y (derecha) el material que es arrastrado desde aguas arriba hacia el lugar de las viviendas.

### **Figura 7**

*(Izquierda) Quebrada socavada al borde de las viviendas. (Derecha) Material de la cantera arrastrado aguas abajo.*



*Nota.* Fuente Registro fotográfico de elaboración propia. Junio, 2021.

**4.3.3 Vía Medellín – El Retiro.** Es una vía que comunica a la ciudad de Medellín con el municipio de El Retiro, y en general, con gran parte de los municipios del oriente de Antioquia, considerándose así como una vía nacional de primer orden con un alto flujo vehicular, presentando inconvenientes en el tráfico por la gran cantidad de vehículos que transitan por la misma; razón por la cual, se pueden presentar inconvenientes en la estabilidad de las viviendas a la hora del tránsito de camiones con carga pesada. Por su parte, en la ley 1228 del 16 de julio de 2008, expedida por el Ministerio de Transporte, en la que se determinan las fajas mínimas de retiro obligatorio para las carreteras del sistema vial nacional, se dicta que para el caso particular del tramo de vía involucrado en el estudio, se debe tener un retiro de sesenta metros (treinta hacia un lado y treinta hacia el otro),

por lo que el asentamiento de viviendas no lo cumple en absoluto debido a que el retiro existente es a lo mucho de cinco metros (5 m). Ver **figura 8**.

### **Figura 8**

*Retiro de eje de vía de la carretera a las viviendas.*

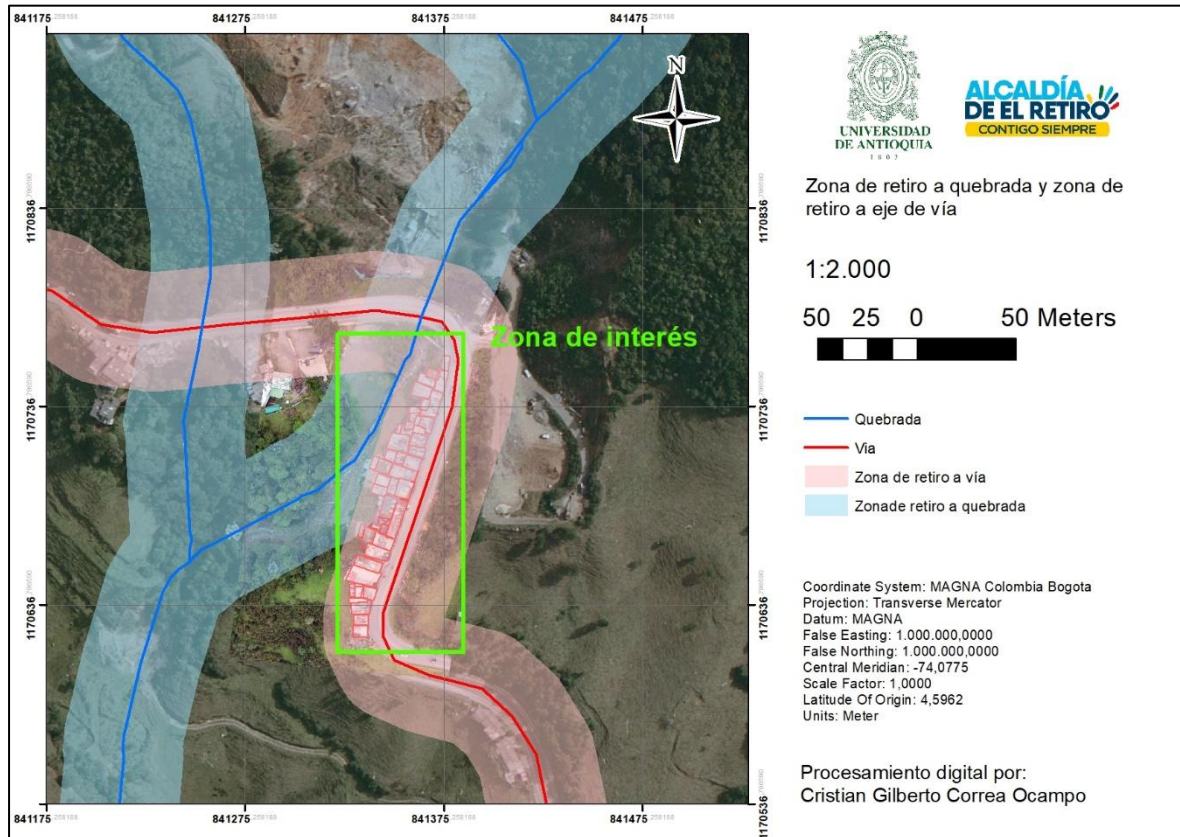


*Nota.* Fuente Registro fotográfico de elaboración propia. Junio, 2021.

En la **figura 9**, se ilustra la zona de influencia por medio de la herramienta Buffer en ArcGIS, del retiro a fuente hídrica y retiro a eje de vía mínimos exigidos por las leyes colombianas.

**Figura 9**

*Mapa de retiros a fuente hídrica y a eje de vía.*



**4.3.4 Deslizamiento ocurrido en la parte posterior de las viviendas.** La zona en la que se ubican las viviendas se caracteriza por estar ubicada justo sobre uno de los lados que conforman el valle de la quebrada La Borrascosa, siendo esta de una pendiente media compuesta por el tipo de suelo descrito en la **tabla 6**. A su vez, el otro lado del valle, conformado por una ladera de mayor pendiente, fue talud víctima de deslizamiento en el mes de abril del presente año, causado principalmente por el mal manejo de aguas por parte de las viviendas ubicadas a ese lado del valle, sumado al hecho de la crítica época invernal acontecida por esos meses en el país. Dicho deslizamiento, fue causante del taponamiento total de la quebrada, lo que ocasionó una grave emergencia invernal atendida oportunamente por los organismos de socorro del municipio de El Retiro que tenía como fin, remover el material que obstruye y permitir el libre flujo del cauce, para de esta manera evitar afectaciones de mayor magnitud en las viviendas que están al borde de la quebrada y evitar posibles avenidas torrenciales en los predios ubicados aguas abajo del punto del deslizamiento. Ver **figura 10**.

## Figura 10

Deslizamiento ocurrido en la parte posterior de las viviendas.



Nota. Fuente Registro fotográfico Secretaria de Hábitat y Desarrollo Territorial. 2021

### 4.4 Evaluación de susceptibilidad mediante el modelo SHALSTAB.

Se procede ahora a realizar la modelación SHALSTAB recolectando una serie de insumos tal como se describe en el marco teórico, que son necesarios e indispensables para correr el método haciendo uso del software ArcGIS Pro; estos, son mostrados en la **tabla 7**. Además, para el modelado inicial, se realiza una corrección en el tamaño de celda del DEM exportado de la plataforma EarthData – ASF Data Search, de tamaños de celda de 12.5 metros a tamaños de celda de 5 metros. Dicho DEM se muestra en la **figura 11** donde también se ilustra la delimitación de la cuenca de estudio con su respectivo mapa de hidrología.

**Tabla 7**

*Insumos necesarios para correr el modelo SHALSTAB.*

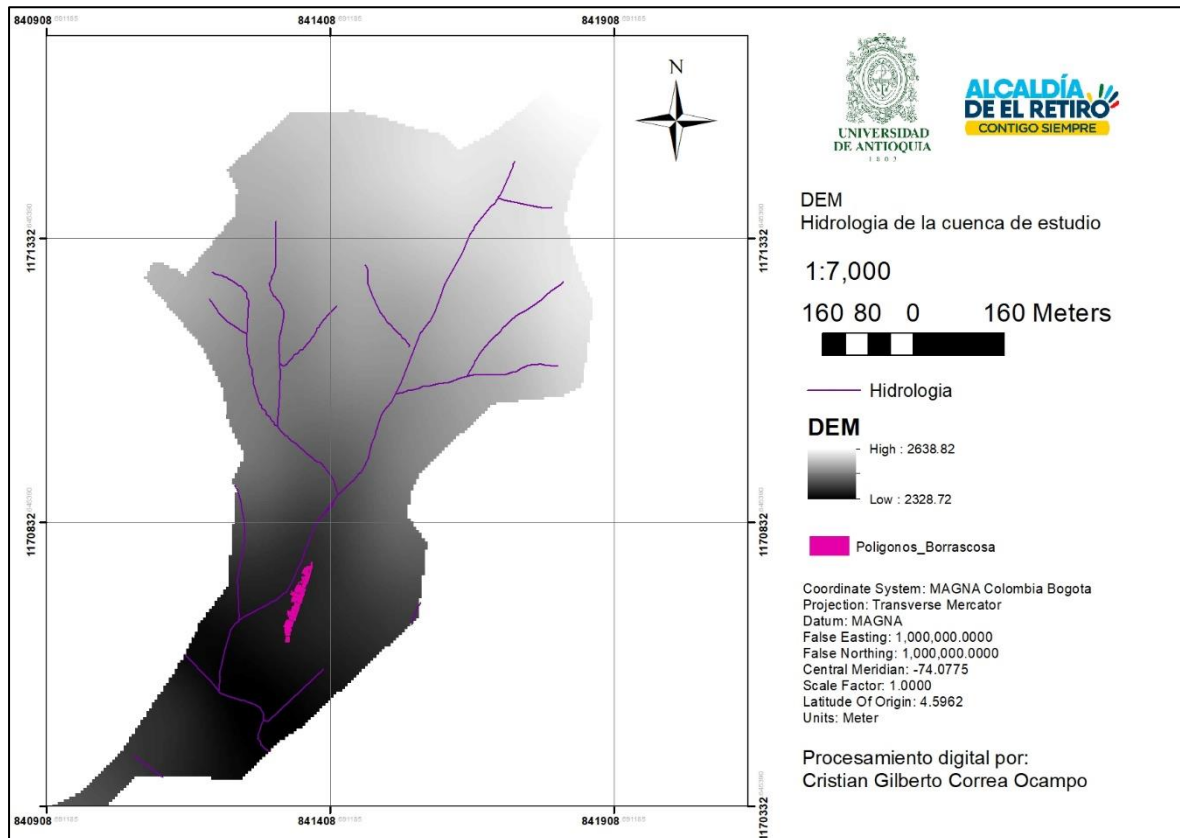
Material	$\gamma$ (KN/m)	$c$ (KPa)	$\phi$ (°)	$K$ (mm/h) *	$L$ (m)
Suelo residual de depósito de vertiente	17	0	24	0.018	3

\*El valor de permeabilidad  $K$  es sacado del portal Geotech data. <https://bit.ly/3I3Z3HQ>

Donde  $\gamma$  es el peso unitario,  $c$  la cohesión,  $\phi$  el ángulo de fricción,  $K$  la permeabilidad y  $L$  el espesor del suelo. Para el caso de la zona de estudio se utiliza una intensidad de precipitación de 131.79 mm/h para un periodo de retorno de 100 años de acuerdo con la curva IDF de la estación

pluviométrica La Fe del municipio de El Retiro según un estudio realizado por CORNARE en conjunto con la Universidad de Antioquia en el año 2010.

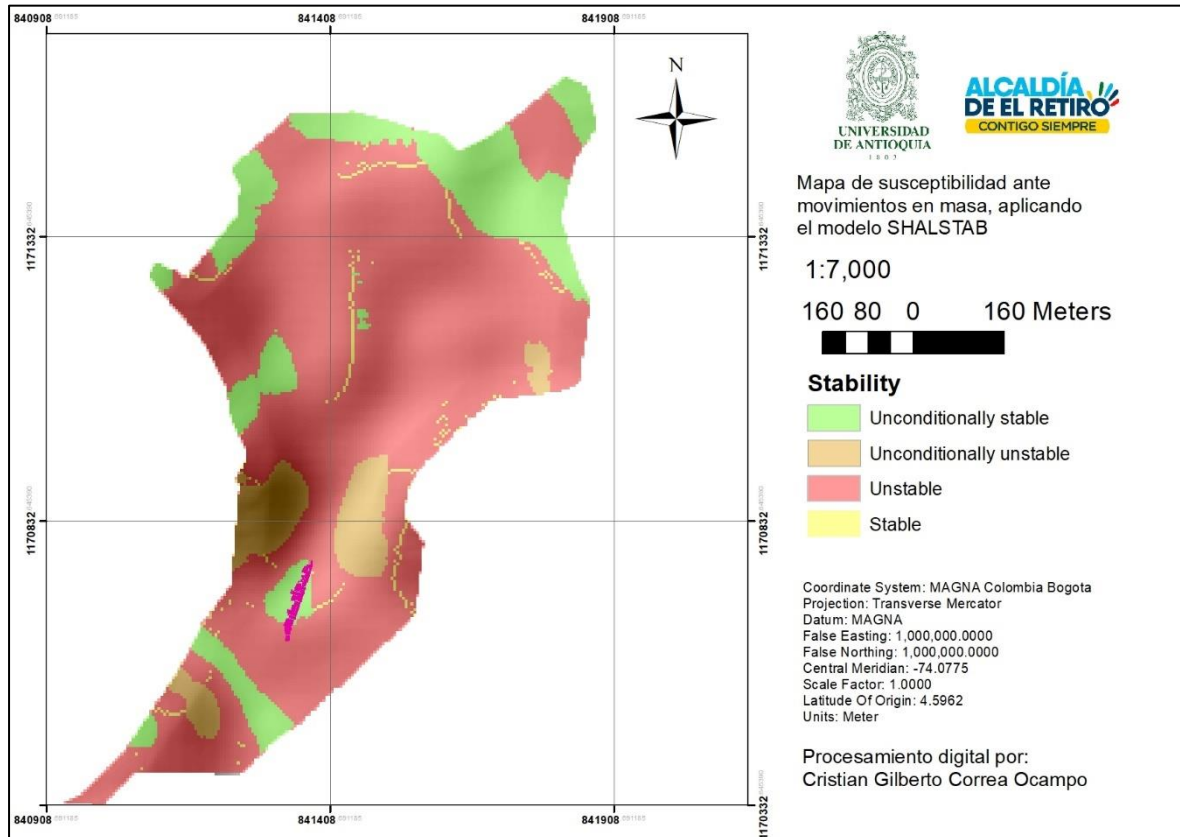
**Figura 11**  
*Modelo de Elevación Digital (DEM) de la cuenca de estudio.*



Luego de tener la cuenca delimitada con los respectivos parámetros que caracterizan el comportamiento geomecánico del suelo, se procede a modelar en ArcGIS Pro el método SHALSTAB mediante una ToolBox suministrada por el asesor interno que acompaña el proceso del trabajo, teniendo en cuenta que para fines prácticos se decide ingresar una cohesión igual a cero ( $c=0$ ) para que de esta manera se arrojen los resultados del estado más crítico al que se puede enfrentar el suelo objeto de estudio. El mapa de susceptibilidad a movimientos en masa resultante del modelo se presenta en la **figura 12**.

**Figura 12**

*Mapa de susceptibilidad ante movimientos en masa empleando el modelo SHALSTAB.*



De la **figura 12** se observa que la mayoría del suelo que compone la cuenca se encuentra dentro de la categoría de suelo inestable lo que la hace muy susceptible ante un deslizamiento, recalcando que de hecho, en la parte posterior de las viviendas, en la zona que se clasifica como inestable ya ha acontecido un movimiento en masa en lo que va del presente año (ver **figura 3**). Lo que confirma para dicha zona la concordancia del modelo y del mapa con respecto a las características de inestabilidad observadas en las visitas de campo. Así mismo, es de notarse que la zona en la que se ubican las viviendas se encuentra dentro de la clasificación incondicionalmente estable, es decir, una susceptibilidad prácticamente nula ante un deslizamiento, resultado que no tiene concordancia para los fines del estudio, ya que por todas las condiciones descritas anteriormente y por la evaluación de la fragilidad, es poco conveniente clasificar este punto del asentamiento como una zona incondicionalmente estable. Lo anterior, puede deberse a la desactualización y lo poco precisos que pueden resultar los insumos, ya que algunos de estos datan

de hace más de cinco años, además de que el DEM con el que se ha trabajado en el transcurso del trabajo, no cuenta con una resolución fina que permita mejores resultados.

#### **4.5 Evaluación de la fragilidad física.**

Para el caso de la fragilidad física, se realiza la caracterización de las viviendas, basándose en las visitas de campo, el diagnóstico visual y el registro fotográfico tomado. Inicialmente, para tener un trabajo más acertado y actualizado, ya que la ortofoto suministrada por el municipio data del año 2012, se utiliza la herramienta de georreferenciación por medio de puntos de control, para pegar una foto, tomada con un dron DJI mini, sobre la ortofoto; esto con el fin de incluir las viviendas que fueron construidas en el periodo de los años 2012-2021. Ver **figura 13**.

#### **Figura 13**

*Ortofoto antes y después de realizar la georreferenciación con la foto aérea.*



Debido a que el acceso a las viviendas estaba restringido por los residentes de estas, la caracterización y enumeración de las edificaciones, tuvo que ser llevada a cabo con base en la visualización desde las afueras, con fotografías aéreas y fotografías desde el terreno. Algunas de las fotos utilizadas para realizar esta actividad, se presentan en la **figura 14**, **figura 15** y **figura 16**.

**Figura 14**

*Fotografía aérea de la parte posterior del asentamiento para caracterización.*



*Nota.* Fuente Registro fotográfico de elaboración propia. Junio, 2021.

**Figura 15**

*Fotografía aérea de la parte frontal del asentamiento para caracterización.*



*Nota.* Fuente Registro fotográfico de elaboración propia. Junio, 2021.



## Figura 16

*Fotografía de la parte posterior del asentamiento para caracterización.*



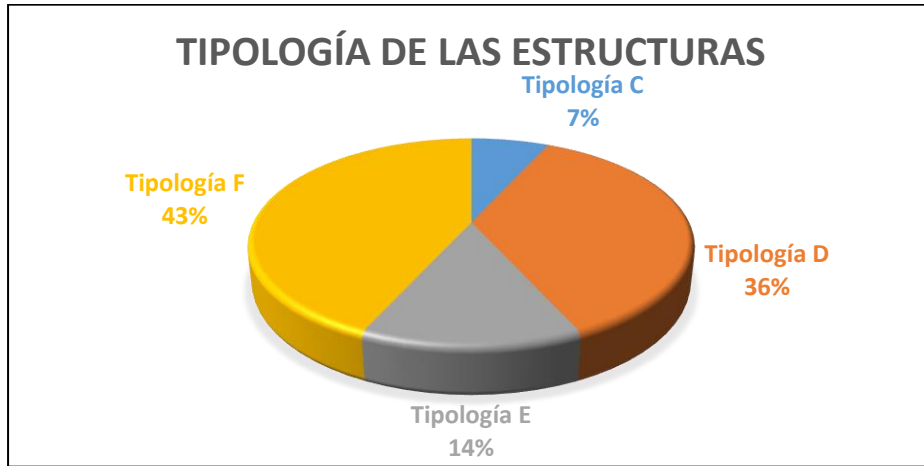
*Nota.* Fuente Registro fotográfico de elaboración propia. Junio, 2021.

En el asentamiento, se identificaron cuarenta y cuatro (44) polígonos en los que se desarrollan actividades residenciales, comerciales e industriales de las cuales es complejo definir la cantidad total de la unidades debido a su configuración estructural y las cuales están construidas con diferentes materiales poco convencionales, tales como, madera no apta para construcción, madera inmunizada, placas de fibrocemento, lata, ladrillo y concreto; siendo predominante el uso de madera, con métodos constructivos tanto en su estructura como en sus cimentaciones por fuera de lo que establece la norma NSR-10. A continuación, se presenta un resumen de los datos obtenidos en la elaboración de la tabla:

**4.5.1 Tipología de las estructuras.** De los cuarenta y cuatro (44) polígonos que se lograron identificar, se encuentra que de estas, no hay ninguna que sea del tipo A o B, descartando de entrada, que exista alguna estructura que tenga una fragilidad extremadamente baja o muy baja. Por otro lado, se nota que las estructuras que están al borde de la vía son las que tienen materiales de construcción más convencionales que las que están en la parte posterior, estas ultimas construidas de una manera escalonada según la pendiente del terreno, adosadas una sobre otra.

**Figura 17**

*Diagrama circular 3D de la tipología de las estructuras.*



Por el contrario, se evidencia que la tipología más abundante es precisamente la F con un porcentaje de 43% que corresponde a diecinueve (19) de las cuarenta y cuatro (44) edificaciones, cuya caracterización es de construcciones simples con una fragilidad muy alta. Seis (6) corresponden a la tipología E con un porcentaje del 14% siendo estas estructuras ligeras. Dieciséis (16) de la tipología D correspondientes al 36%, las cuales tienen un confinamiento deficiente. Por último, tres (3) que equivalen al 7% de la tipología C con mampostería reforzada.

**4.5.2 Altura de las estructuras.** A pesar de que hay estructuras con una gran altura desde la parte en la que se realiza el desplante en el terreno hasta la cota del primer piso, la altura fue considerada únicamente por el número de pisos que dicha edificación tenga a partir de la primera losa de piso. Ver **figura 18**. En la **figura 19**, se ilustran los resultados obtenidos para el factor por altura de edificación.

### Figura 18

Altura considerada a la hora de establecer la Altura de las edificaciones.



Nota. Fuente Registro fotográfico de elaboración propia. Mayo, 2021.

Como se mencionaba, la altura que existe entre la parte baja del terreno y el punto donde se conecta con la edificación, en este caso representada por la altura que mide el estacón de madera inmunizada que se evidencia en la **figura 18**, no es tomada en cuenta dentro del cálculo del factor.

### Figura 19

Diagrama circular 3D de la altura de las edificaciones.

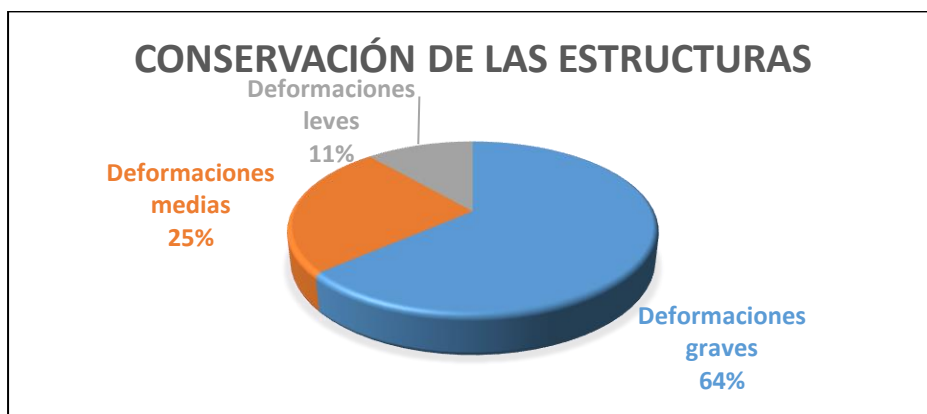


De la tipología C, se siguen manteniendo las mismas tres (3) edificaciones a cuyo factor les corresponde un valor de “0,05”. De la tipología D se encuentran dieciocho (18) edificaciones, ninguna con un número de pisos mayor a 3 por lo que su respectivo factor por altura es de “0,06”. Las demás edificaciones, corresponden a las tipologías E y F de entre 1 y 2 pisos, con un factor igual a “0,09”.

**4.5.3 Estado de conservación de las estructuras.** Por ser edificaciones que no contaron con un debido proceso constructivo y actualmente no cuentan con un debido mantenimiento, el estado de conservación no es muy alentador, en el que sus clasificaciones varían entre deformaciones leves, medias y graves. En la **figura 20** se muestra el porcentaje por cada clasificación.

**Figura 20**

*Diagrama circular 3D del estado de conservación de las edificaciones.*



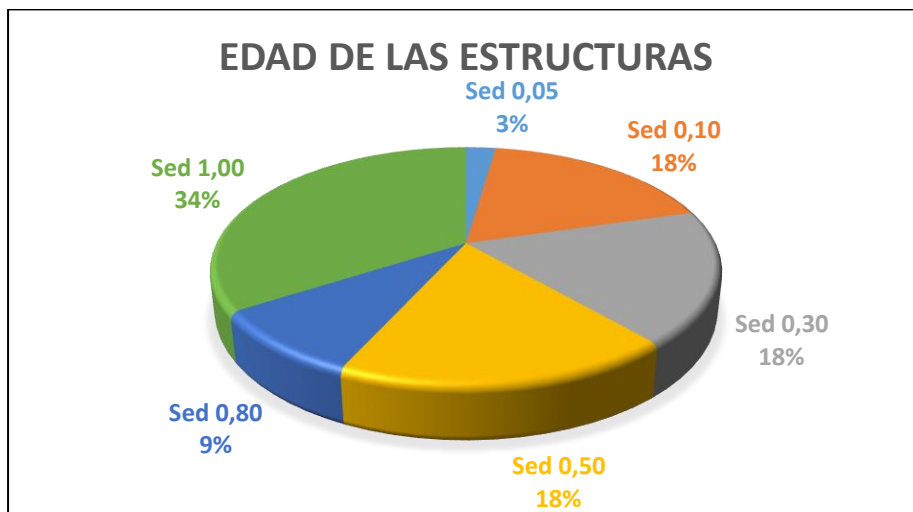
Al realizar la visita de campo, se encuentra que la mayoría de las edificaciones, sufren de afectaciones muy preocupantes que van desde simples daños superficiales a fallas, fisuras, desplazamientos e inclinaciones que ponen la estabilidad de la estructura en riesgo de colapso. Se puede apreciar, que el estado de conservación de algunas viviendas es más deplorable que otras, pudiendo deberse esto a la edad de estas o por el hecho de que algunas personas si den cierto tipo de mantenimiento a las estructuras, además de que al estar construidas en madera, es difícil proteger totalmente este tipo de material de la intemperie.

**4.5.4 Edad de las estructuras.** Según el archivo municipal, existen estructuras en el asentamiento que datan de hace aproximadamente cuarenta (40) años; sin embargo, para establecer la edad de

las viviendas, se recurre al historial de imágenes que ofrece la plataforma de Google Earth Pro, cuyas primeras imágenes apreciables corresponden a las del año 2002 donde se evidencia la existencia de algunas de las estructuras y que actualmente siguen en pie. Además, gracias a el comparativo entre dichas imágenes o la ortofoto datada del año 2012 y la fotografía tomada con un dron, como se muestra en la **figura 13**, se logra identificar el crecimiento poblacional que ha padecido esta zona en los últimos veinte (20) años. En la **figura 21**, se muestra el factor por edad, siguiendo lo que dicta la Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa y que se muestra también en la **tabla 4** y la **tabla 5**.

**Figura 21**

*Diagrama circular 3D de la edad de las edificaciones.*

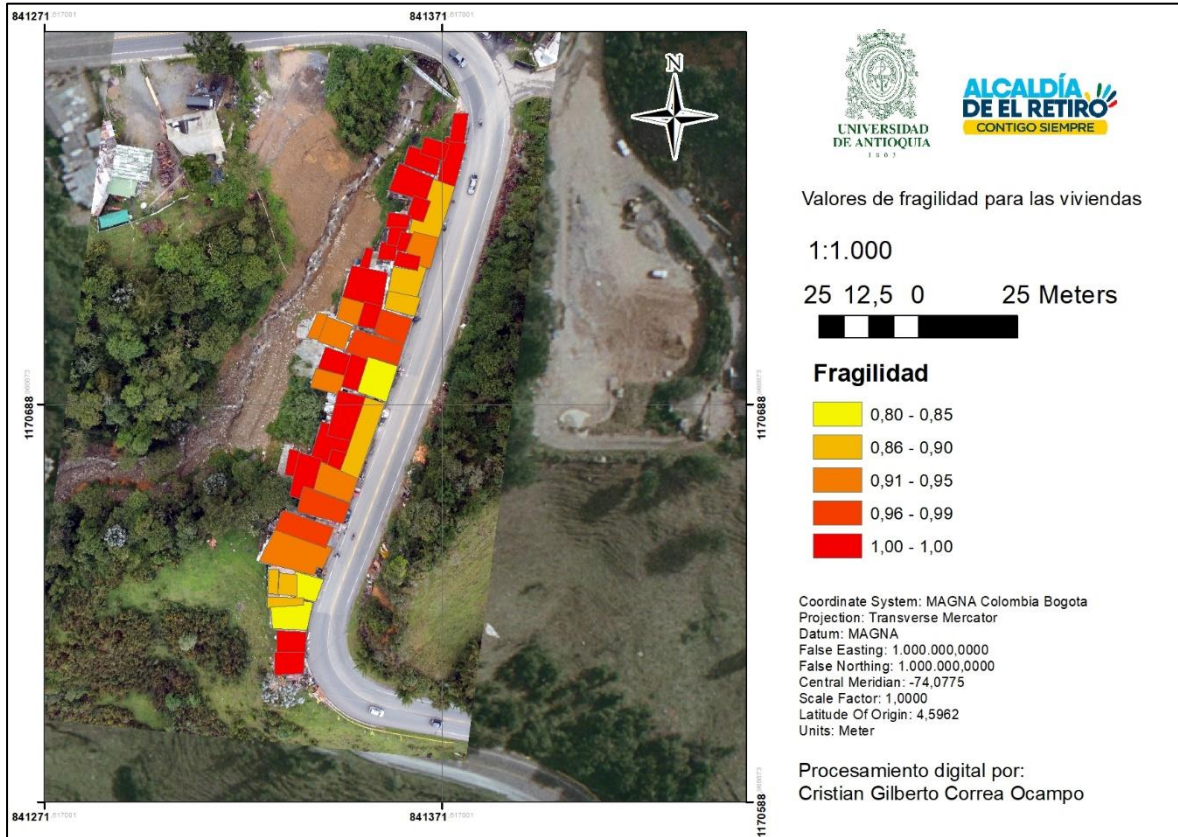


La edad de las edificaciones va ligada directamente al estado de conservación de estas, notando que según el archivo municipal, si más edad tiene la estructura, más crítico es su estado de conservación.

Tras haber realizado toda la caracterización y haber calculado los factores que exige la Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa para el cálculo de fragilidad, se procede a establecer dichos valores en ArcGIS por medio de un shapefile que muestra todos los cuarenta y cuatro (44) polígonos, que corresponden a cada una de las viviendas identificadas, con su respectiva tabla de atributos. El mapa resultante se muestra en la **figura 22** al igual como el porcentaje de cada resultado en la **figura 23**.

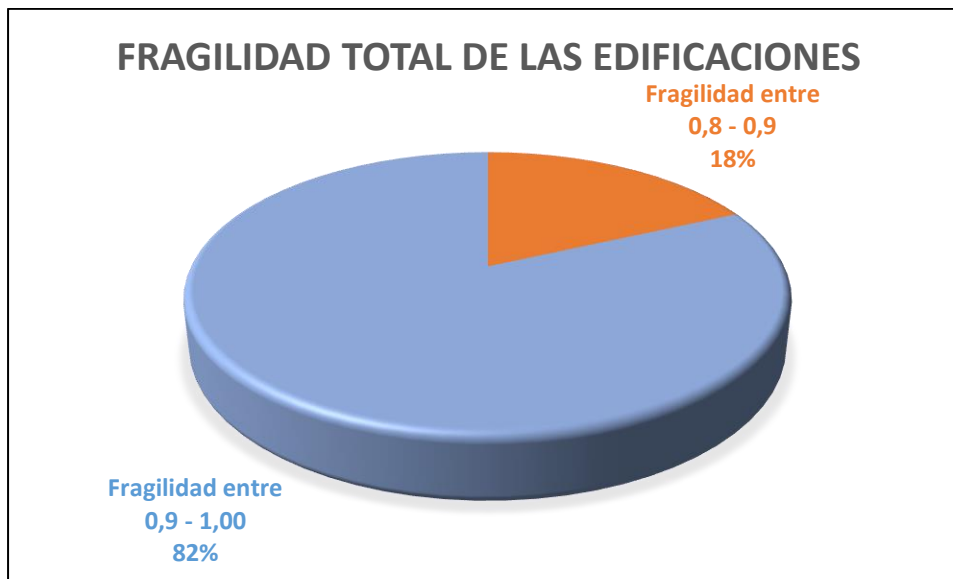
**Figura 22**

*Mapa de fragilidad física de las viviendas asentadas en La Borrascosa.*



**Figura 23**

*Diagrama circular 3D del factor de fragilidad de las edificaciones.*



Se nota que la totalidad de viviendas se encuentran por un valor superior a 0,80 lo que implica que tienen un valor de fragilidad muy alto y por tanto, están en un alto riesgo ante la ocurrencia de un movimiento en masa. Las viviendas que están más al borde de la carretera son las que presentan menor grado de fragilidad, debido a que están construidas con materiales más resistentes por lo que tienen también una edad más elevada.

## 5 Conclusiones

Al estar en una zona donde es difícil recolectar información, esto puede generar errores y sesgos en los resultados obtenidos, ya que al no contar con insumos precisos y con un mejor soporte, se recurre a estudios con casi diez o más años de antigüedad para algunos casos por lo que no se puede asegurar que los resultados sean totalmente confiables. El sector de la borrascosa, que se encuentra ubicado en el municipio de El Retiro en la vereda Carrizales, donde a su vez éste se encuentra ubicado a aproximadamente 28 kilómetros de Medellín, no cuenta con información actualizada para ser un municipio tan cercano a un área metropolitana que se supone debería contar con bases de datos y estudios de mejor modernidad.

El estrato de suelo que fue objeto de estudio se clasifica como un limo de baja compresibilidad (ML), y una resistencia promedio al ensayo de penetración estándar de 5 golpes/pie, lo que podría indicar una resistencia baja, siendo esto una condición crítica si se tiene en cuenta la cantidad de agua que se puede infiltrar no solo en lo que respecta al agua lluvia sino también por las constantes crecientes que ocurren en la quebrada La Borrascosa haciendo que el terreno pueda presentar fallas de inestabilidad en el momento que se encuentre con un grado de humedad alto.

Las pendientes juegan un papel importante a la hora de determinar qué tan estable puede resultar una zona de estudio, predominando en el punto de interés pendientes entre 12% y 25% (**figura 1**) y clasificándose como una zona de amenaza media ante movimiento en masa (**figura 2**) se determina según esto que las viviendas se encuentran asentadas en una zona potencial a ocurrir un deslizamiento, donde además se le suma el hecho de que en el presenta año aconteció un deslizamiento a escasos veinte metros del sitio, se concluye que las viviendas corren un riesgo ante un movimiento en masa que puede poner en juego la vida de las personas que allí habitan.

Las condiciones de frontera descritas en el cuerpo del trabajo, tales como la quebrada La Borrascosa, la vía que comunica Medellín con El Retiro y la cantera La Borrascosa, permiten hacer una idea de lo crítico que resulta el punto donde las personas decidieron en algún momento asentarse y construir sus viviendas, no solo porque las condiciones topográficas no son las óptimas, sino también porque están expuestos a sufrir algún tipo de accidente de tránsito, avenidas torrenciales o lesiones al estar tan cerca de una mina que tiene procesos de explotación por voladura.

Las viviendas en su totalidad que allí se encuentran construidas, viola una serie de acuerdos y leyes decretadas por las normas colombianas, empezando por el hecho de que ninguna cuenta con su correspondiente licencia de construcción que debe ser expedida en la administración municipal. Por otro lado, ninguna cuenta con los métodos constructivos, ya sea para los diferentes materiales presentes en el asentamiento como mampostería o madera que exige la norma NSR - 10 encargada de detallar la manera y la forma en que se debe construir una edificación; y de que ninguna cumple con los retiros mínimos a faja de vía y retiro mínimo a fuente hídrica, por lo que se concluye que el asentamiento no cuenta con ningún soporte legal.

Las viviendas del asentamiento están construidas con métodos poco convencionales de las cuales la gran mayoría están compuestas por madera y con cimentaciones mal elaboradas, por lo que se encuentra al tener en cuenta esto y al tener en cuenta los demás parámetros al evaluar la fragilidad, de que todas las edificaciones tienen un factor de fragilidad por encima de 0.80 lo que las hace sumamente susceptibles ante un movimiento en masa.

El modelo SHALSTAB permite modelar la susceptibilidad ante movimientos en masa de una cuenca hidrográfica, combinando métodos hidrológicos y métodos topográficos, contando además con ciertos parámetros geomecánicos que dan una idea del comportamiento del estrato del suelo considerando solo fallas superficiales y con ciertos parámetros hidrológicos como lo es la precipitación, que para el caso de estudio se utiliza una de 131,79 mm/h para un periodo de retorno de 100 años. En el caso de este estudio, el mapa de susceptibilidad resultante muestra una gran extensión de terreno con una clasificación inestable ante un deslizamiento superficial incluida la que rodea el punto de estudio, por lo que los habitantes de las viviendas se encuentran en riesgo al estar ocupando las edificaciones presentes en el punto.

Todas las personas que habitan las viviendas se encuentran en alto riesgo de lesiones y de ser víctimas ante la ocurrencia de un deslizamiento, por lo que es recomendable hacer un llamado de atención tanto a las personas residentes de las casas como a las autoridades competentes



encargadas de velar por la seguridad de los ciudadanos, para que tomen medidas de prevención o mitigación haciendo que la zona de estudio sea más segura en caso de que sea necesario hacer una reubicación o una estabilización de la ladera de estudio.

Realizar una evaluación de susceptibilidad ante movimientos en masa empleando el modelo SHALSTAB que abarque toda la extensión del territorio que compone al municipio de el Retiro, puede traer grandes beneficios para una correcta revisión o formulación del Plan de Ordenamiento Territorial (POT), así como la facilidad de tomar decisiones con base a un soporte técnico y cuantitativo del riesgo físico que se pueda evidenciar al identificar zonas de alto riesgo a lo largo del territorio guarceño, proponiendo medidas de prevención y mitigación de riesgos en la infraestructura y eventuales pérdidas humanas.

## Referencias

- Acuerdo 251 de 2011 [Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare]. Por medio del cual se fijan determinantes ambientales para la reglamentación de las rondas hídricas y las áreas de protección o conservación aferentes a las corrientes hídricas y nacimientos de agua en el oriente del departamento de Antioquia, jurisdicción de CORNARE. 10 de agosto de 2011.
- Administración municipal El Retiro (2013). *Plan Básico de Ordenamiento Territorial – PBOT*. El Retiro, Antioquia.
- Aristizábal Giraldo E. V., Gómez Cardona F. J., García Aristizábal E. F. & Guzmán Martínez J.C. (2020). Análisis de la amenaza por movimientos en masa detonados por sismo en los Andes colombianos, caso estudio: Barbosa (Antioquia). *Cienc. Ing. Neogranadina*, vol. 30, no.2, pp.31-47.
- Aristizábal E., Martínez H. & Vélez J. I. (2010). Una revisión sobre el estudio de movimientos en masa detonados por lluvias. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* Vol. 34, no.131, pp.209-227.
- Aristizábal E., Martínez H. & Vélez J. I. (2016). Influencia de la lluvia antecedente y la conductividad hidráulica en la ocurrencia de deslizamientos detonados por lluvias utilizando el modelo SHIA\_Landslide. *Revista EIA*, vol. 13, no.26, pp. 31-46.
- Bartelletti C., D’Amato Avanzi G., Galanti Y., Giannecchini R. & Mazzali A. (2015). Assessing shallow landslide susceptibility by using the SHALSTAB model in Eastern Liguria (Italy). *Rendiconti Online Società Geologica Italiana*, vol. 35, pp. 17-20.
- Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare [CORNARE]. (2012). *Evaluación y zonificación de riesgos por avenida torrencial, inundación y movimiento en masa, y dimensionamiento de procesos erosivos en el municipio de El Retiro*. Divegráficas Ltda.
- Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare [CORNARE]. (2010). *Plan de ordenamiento y manejo de la cuenca hidrográfica La Agudelo del municipio de El Retiro*. Corporación académica ambiental.
- Du J., Yin K., Lacasse S. & Nadim F. (2013). Quantitative vulnerability estimation of structures for individual landslide: application to the metropolitan area of San Salvador. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 19, 1251-1264.
- EarthData Search – ASF Data Search. (2021). *EOSDIS Land Data – Topography - Search for collections or topics*. <https://go.nasa.gov/3uDWe3p>

- García-Aristizábal E. F., Aristizábal E., Marín R. J. & Guzmán-Martínez J. C. (2019). Implementación del modelo TRIGRS con análisis de confiabilidad para la evaluación de la amenaza a movimientos en masa superficiales detonados por lluvia. *TecnoLógicas*, vol. 22, no. 44, pp.113-131.
- Geología & Geotecnia GEO<sup>2</sup>. (2021). *Análisis de estabilidad talud via acceso finca La Cascada. GEO<sup>2</sup>*.
- Geotech data [GD]. (2021). *Geoparameters – Soil permeability coefficient*. <https://bit.ly/3l3Z3HQ>
- Gonzales I., H. (2001). *Mapa geológico del departamento de Antioquia. Geología, recursos minerales y amenazas potenciales, Escala 1:400.000*. Publicación digital Ingeominas.
- Jiménez, J.A. and Aristizábal, E. (2018). Propuesta metodológica para la zonificación de la susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa en proyectos lineales: caso de estudio Tramo 2, vía Medellín – Turbo. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 43, pp. 14-23, Enero, 2018.
- Ley 1228 de 2008. Por la cual se determinan las fajas mínimas de retiro obligatorio o áreas de exclusión, para las carreteras del sistema vial nacional, se crea el Sistema Integral Nacional de Información de Carreteras y se dictan otras disposiciones. 16 de julio de 2008. D.O. No. 4550.
- Malagón Torres J. U. & Vanegas Estrada J. P. (2020). *Análisis de la incidencia de las lluvias antecedentes en la estabilidad del talud en el sector Altos de la Estancia en Bogotá D.C.* [Trabajo de grado, Universidad Santo Tomás]. Repositorio Institucional Universidad Santo Tomás.
- Martins, T., Vieira, B., Fernandes, N., Okafiori, C., & Montgomery, D. R. (2017). Application of the SHALSTAB model for the identification of areas susceptible to landslides: Brazilian case studies. *Revista De Geomorfologie*, 19(1), 136-144.
- MINMINAS. (2015). *Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa*. Servicio Geológico Colombiano – SGC.
- Resolución 02033 de 2018 [Autoridad Nacional de Licencias Ambientales]. Por lo cual se resuelve un conflicto de competencia. 13 de noviembre de 2018.
- Rojas Ochoa J. L. & Uribe Montaña W. A. (2020). *Evaluación de la vulnerabilidad y fragilidad para diferentes niveles de intensidad por movimientos en masa rápidos a partir de la metodología del SGC y el convenio No. 4600076515 de 2018 entre la universidad EAFIT y la Alcaldía de Medellín*. [Trabajo de grado, Universidad EAFIT]. Repositorio Institucional Universidad EAFIT.
- Vélez Upegui, J, Álvarez Villa, O, Alarcón Guerrero, J y Quintero Duque, F. (2004). Modelo distribuido hidrológico y geotécnico para determinar la amenaza de deslizamiento