



**Definición de susceptibilidad por movimientos en masa  
en suelo urbano escala 1:2000 a partir de modelos  
determinísticos usando el modelo físico distribuido de  
análisis de estabilidad tridimensional Scoops3D. Caso  
de estudio: San José la Cima**

**RICARDO JARAMILLO GONZÁLEZ**

**Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de Geólogo**

**Director:**

**Marco Fidel Gamboa Ramírez**

**Asesores:**

**Msc. Roberto J. Marín Sánchez**

**Ph.D. María Isabel Marín Cerón**

**Universidad EAFIT**

**Departamento Ciencias de la Tierra**

**Medellín. Colombia**

**2019**

## **DEDICATORIA**

**[...] A mis padres, Luisa y mi peluda por su infinito amor y por siempre creer en mi**

**A Fabiola, Gerardo, Cesar y Julio que desde las estrellas me guían y cuidan....**

## **AGRADECIMIENTOS**

**[...] A Dios todo poderoso por darme valor para enfrentar todos los retos que llevó desarrollar esta idea**

**Agradezco al profesor Marco Gambo que creyó en mi cuando nadie lo hizo y me permitió crecer como persona, por su apoyo y disposición sin importar que tan ocupado estuviese, por su firme voluntad de hacerme creer en mi mismo y en lo que puedo lograr.**

**Agradezco a Roberto J. Marín por su infinita paciencia, humildad y voluntad de siempre compartir su conocimiento.**

**Agradezco a María Isabel Marín por su confianza y disposición a hacerme creer y mejorar mis capacidades estéticas y abrirme tantas puertas durante mi investigación.**

**Agradezco a Jose Duque por ser la primera persona que me embarcó en el maravilloso viaje de la Geología y me inspiro a luchar siempre por mis sueños y nunca darme por vencido.**

**Al primo, Andre, Estrada, Emiliano, Mario, Toño, Erick, Rasta, Salas y Mile por ser compañeros de viaje excepcionales...**

**GRACIAS.....**

## Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b> .....	<b>8</b>
<b>2. Planteamiento del problema</b> .....	<b>11</b>
<b>3. Objetivos</b> .....	<b>12</b>
<b>3.1. Objetivo general</b> .....	<b>12</b>
<b>3.2. Objetivos específicos</b> .....	<b>12</b>
<b>4. Marco geográfico</b> .....	<b>13</b>
<b>4.1. Aspectos generales de San José la Cima</b> .....	<b>13</b>
4.1.1. Localización.....	13
4.1.2. Población .....	14
4.1.3. Régimen climático .....	14
<b>4.2. Contexto geológico</b> .....	<b>15</b>
4.2.1. Marco geológico regional .....	15
4.2.2. Marco geológico local .....	22
<b>4.3. Geomorfología Regional: Valle de Aburrá Medio (VM)</b> .....	<b>22</b>
<b>4.4. Variables Morfométricas</b> .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
4.4.1. Pendiente.....	25
4.4.2. Aspectos.....	30
<b>5. Marco Teórico</b> .....	<b>32</b>
<b>5.1. Marco Legal</b> .....	<b>32</b>
<b>5.2. Concepto de Estabilidad de Ladera</b> .....	<b>34</b>
<b>5.3. Movimientos en masa</b> .....	<b>35</b>
5.3.1. Tipos de movimientos en masa.....	35
5.3.2. Factores detonantes de movimientos en masa .....	37
5.3.3. Geometría superficies de deslizamiento de suelo .....	37
<b>5.4. Unidad de Zonificación de Terreno</b> .....	<b>38</b>
5.4.1. Sección Topográfica .....	38
5.4.2. Unidades de Geología para Ingeniería (UGI) .....	39
5.4.3. Unidades Geotécnicas Homogéneas .....	40

<b>5.5. Métodos de Zonificación de Amenaza .....</b>	<b>41</b>
5.5.1. Métodos Cualitativos .....	41
5.5.2. Métodos Cuantitativos .....	42
<b>5.6. Métodos Determinísticos.....</b>	<b>43</b>
<b>5.6.1. Análisis de Estabilidad de Taludes: Métodos de Equilibrio Límite.....</b>	<b>43</b>
<b>6. Marco metodológico: Aplicación modelo Scoops3D .....</b>	<b>54</b>
<b>6.1. Estado del conocimiento de la zona de estudio .....</b>	<b>54</b>
<b>6.2 Modelo Geológico-Geotécnico .....</b>	<b>54</b>
6.2.1. Perforaciones .....	54
6.2.2. Unidades Geológicas para Ingeniería y Parámetros Geomecánicos.....	57
6.2.3. Análisis de estabilidad 2D .....	55
<b>6.3. Análisis de estabilidad tridimensional con Scoops 3D .....</b>	<b>59</b>
<b>6.4. Parámetros de entrada y Dominio 3D .....</b>	<b>62</b>
<b>7. Resultados .....</b>	<b>68</b>
<b>7.1. Mapas de Factor de Seguridad.....</b>	<b>68</b>
<b>7.2. Mapa de susceptibilidad.....</b>	<b>72</b>
<b>8. Discusión.....</b>	<b>74</b>
<b>9. Conclusiones.....</b>	<b>77</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1. Mapa de Localización San José La Cima.....</b>	<b>11</b>
<b>Figura 2. Mapa del marco geológico regional del polígono de San José la Cima.....</b>	<b>20</b>
<b>Figura 3. Mapa geomorfológico regional del polígono de San José La Cima.....</b>	<b>25</b>
<b>Figura 4. Mapa geológico local del polígono de San José la Cima.....</b>	<b>25</b>
<b>Figura 5. Mapa de pendientes de San José la Cima. ....</b>	<b>29</b>
<b>Figura 6. Mapa de Aspectos del polígono de San José la Cima. ....</b>	<b>31</b>
<b>Figura 7. Diagrama del marco legal de zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa .....</b>	<b>32</b>
<b>Figura 8. Segmentos de pendiente en una ladera. Tomado de (Keller y Blodgett, 2004).....</b>	<b>34</b>
<b>Figura 9. Superficie de deslizamiento circular .....</b>	<b>37</b>
<b>Figura 10. Deslizamiento de suelo con mecanismo rotacional sobre una superficie curva. Tomado de (USGS, 2004). ....</b>	<b>38</b>
<b>Figura 11. Sección topográfica del polígono de estudio San José la Cima. Tomado y modificado de (EAFIT, 2018). ....</b>	<b>39</b>
<b>Figura 12. Superficie circular debajo de una masa de suelo dividida en dovelas o “slides”. Tomado de Duncan et al. (2014) .....</b>	<b>45</b>
<b>Figura 13. Diagrama de fuerzas para una dovela para el método de Bishop. Tomado de (Duncan et al. 2014).....</b>	<b>48</b>
<b>Figura 14. Extensión a 3D de la superficie de deslizamiento circular y la masa en equilibrio dividida en dovelas. Modificado de (Huang, 2014). ....</b>	<b>49</b>
<b>Figura 15. Vista tridimensional de las fuerzas actuando en la base de la columna de suelo (i,j). Modificado de (Huang, 2002).....</b>	<b>49</b>

<b>Figura 16. Fuerzas actuantes en una sola columna; la fuerza de presión de poros no se muestra, pero actuaría en la línea de la fuerza normal N. Modificado de (Hunggr, 1987).</b> .....	<b>50</b>
<b>Figura 17. Isometría de un cuerpo rotacional deslizante, simétrico con respecto al plano vertical central y dividida en una serie de columnas (solo se muestra la base de las columnas activas). Modificado de (Hunggr, 1987).</b> .....	<b>52</b>
<b>Figura 20. Mapa de localización de secciones topográficas</b> .....	<b>56</b>
<b>Figura 22. Perspectiva del DEM con una superficie de deslizamiento con masa removida. Modificado de (Reid et al., 2015).</b> .....	<b>60</b>
<b>Figura 24. Esquema de la representación de datos de entrada para el modelado en Scoops3D</b> .....	<b>64</b>
<b>Figura 25. Diagrama que muestra la red de búsqueda sobre el DEM de San José la Cima. Cada punto verde representa el centro de las múltiples superficies esféricas de prueba. Modifica de (Reid et al. 2015)</b> .....	<b>65</b>
<b>Figura 26. Mapa de procesos en el polígono de San José la Cima.</b> .....	<b>67</b>
<b>Figura 27. Mapa factor de seguridad 3D para el polígono de San José la Cima caso 1. A. Escenario seco sin nivel freático. B. Escenario saturado <math>z=10m</math>.</b> .....	<b>69</b>
<b>Figura 28. Mapa de factor de seguridad 3D para el polígono de San José la Cima caso 2. A. Escenario seco sin nivel freático. B. Escenario saturado <math>z=10m</math>.</b> .....	<b>70</b>
<b>Figura 29. Mapa de factor de seguridad 3D para el polígono de San José la Cima caso 3. A. Escenario actual. B. Escenario saturado <math>z=10m</math>.</b> .....	<b>72</b>
<b>Figura 30. Mapa de Susceptibilidad del polígono de San José la Cima. A. Escenario seco sin nivel freático. B. Escenario Saturado con <math>z=10m</math>.</b> .....	<b>73</b>
<b>Figura 31. Mapa de susceptibilidad realizado por (EAFIT, 2018). A. Escenario Actual. B Escenario Saturado.</b> .....	<b>74</b>

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1. Rangos de pendientes de San José la Cima. Adaptado de (EAFIT, 2018)</b>	<b>30</b>
<b>Tabla 2. Clasificación de los movimientos en masa. Tomado y adaptado de (Keller y Blodgett, 2004).</b>	<b>36</b>
<b>Tabla 3. Caracterización de las Unidades de Geología para Ingeniería según su origen. Tomado y modificado de (SGC,2015).</b>	<b>39</b>
<b>Tabla 4. Perforaciones San José la Cima. Adaptado de (EAFIT, 2018)</b>	<b>54</b>
<b>Tabla 5. Parámetros Geomecánicos de las unidades geológica para ingeniería en San José la Cima. Adaptado de (EAFIT, 2018)</b>	<b>59</b>
<b>Tabla 6. Factores de seguridad 2D del polígono San José la Cima. Tomado de (EAFIT, 2018)</b>	<b>56</b>
<b>Tabla 7. Profundidades de la base de cada capa para en la zona de estudio. Tomado de (EAFIT, 2018)</b>	<b>63</b>
<b>Tabla 8. Parámetros de entrada para la red de búsqueda</b>	<b>66</b>
<b>Tabla 9. Valores mínimos y máximos de área para análisis de estabilidad.</b>	<b>66</b>
<b>Tabla 10. Clasificación de estabilidad según (SGC,2015).</b>	<b>68</b>
<b>Tabla 11. Clasificación de estabilidad según Decreto Municipal 1626 de 2015</b>	<b>73</b>
<b>Tabla 12. Comparación de valores de factor de seguridad 2D (EAFIT, 2018) y factor de seguridad 3D calculado por Scoops3D para el escenario actual.</b>	<b>74</b>
<b>Tabla 13. Comparación de valores de factor de seguridad 2D (EAFIT, 2018) y factor de seguridad 3D calculado por Scoops3D para el escenario saturado</b>	<b>75</b>

# 1. Introducción

El territorio colombiano, por su latitud tropical y localización geográfica exhibe condiciones climáticas y geológicas complejas que representan un reto para las ciencias geo-ambientales y de prevención de desastres, particularmente en el valle interandino del Aburrá donde se localiza la ciudad de Medellín.

Las condiciones físicas de la ciudad y su accidentada geomorfología hacen de ella un lugar apto para la ocurrencia de eventos físicos desastrosos, en este caso movimientos en masa. Sumado a lo anterior, la actual crisis migratoria tanto externa como interna que ha vivido el país en los últimos años ha llevado a que en las ciudades principales se presente una ocupación ilegal y no controlada en las zonas de laderas, particularmente en la comuna nororiental donde se localiza el polígono de San José la Cima, sector en el que se han identificado procesos de movimientos en masa activos y ha sido categorizado con condición de riesgo por movimiento en masas en diversos estudios (Tecnisuelos, EAFIT; 2009, 2018).

De esta manera, la predicción espacial de los movimientos en masa, es decir, la zonificación de susceptibilidad de éstos ha tomado una importancia significativa desde el punto de vista de la gestión del riesgo y la consecuente toma de decisiones en el ordenamiento del territorio en la ciudad, lo que ha generado la necesidad de implementar modelos de análisis de estabilidad que permitan representar de manera precisa las condiciones físicas del terreno y sus variaciones espaciales.

El actual proyecto, se concentra en los métodos determinísticos de zonificación de la susceptibilidad que se basan en modelos físicos distribuidos de análisis de estabilidad los cuales están fundamentados en la teoría física de equilibrio límite que permite calcular el factor de seguridad del terreno a analizar.

A nivel global, existen múltiples modelos de análisis de estabilidad (1D y 2D) que han sido implementados tales como el modelo de estabilidad de movimientos en masa superficiales (SHALSTAB, Montgomery y Dietrich, 1994), el modelo de análisis distribuido de movimientos en masa superficiales (dSLAM, Wu y Sidle, 1995), mapeo del índice de estabilidad (SINMAP, Pack et al. 1998), el “Transient Rainfall Infiltration and the Grid-Based Regional Slope-Stability Model” (TRIGS, Baum et al. 2002), y de manera local el (SHIA\_Landslide, Ariztizabal et al. 2015). Los anteriores modelos han sido aplicados en distintas investigaciones en base al modelo físico de equilibrio límite mencionado anteriormente. Dichos modelos tienen ventajas en el análisis de la estabilidad ya que permiten incorporar eventos de lluvia, a medida que incorporan la variación del nivel freático y la respuesta del suelo a la saturación, además de tener en cuenta los parámetros geomecánicos del suelo. Sin embargo, los modelos 1D y 2D mencionados anteriormente no consideran las variaciones en 3D de la topografía y condiciones del suelo, lo que lleva a cálculos del factor de seguridad conservadores y sesgados.

Con el fin de reducir dichos sesgos y mejorar la zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa, en el actual proyecto se aplica el modelo físico distribuido de análisis de estabilidad Scoops3D en el polígono de San José la Cima, desarrollado por el USGS. Scoops3D evalúa la estabilidad sobre una superficie digital de terreno (DEM) por medio del método 3D de columnas y permite definir una serie de puntos extendidos horizontales y verticales (centros rotacionales de esferas) y un incremento de radio de estas, con el fin de generar superficies esféricas de deslizamiento interceptadas por el DEM que servirán como potenciales superficies de falla contenidas en cada celda del DEM donde para cada celda se calcula la estabilidad teniendo en cuenta los parámetros geomecánicos del suelo y su variación en cada celda, permitiendo considerar escenarios secos sin nivel freático y escenarios saturados (Reid et al. 2015). Así, a partir de datos

obtenidos de estudios anteriores y de un DEM de alta resolución (2x2) se evalúa la estabilidad y se realiza la posterior zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa en el polígono de San José la Cima.

## **2. Planteamiento del problema**

En la ciudad de Medellín, especialmente en sus zonas de altas pendientes, se presentan movimientos en masa que ocasionan pérdidas materiales y humanas (Parra, 2015). De esta manera, el análisis del riesgo por movimientos en masa y la zonificación de la susceptibilidad de dichos procesos ha tomado gran importancia dentro de la planificación del territorio donde actualmente se usan modelos de estabilidad con un grado considerable de subjetividad.

En este orden de ideas, dentro de la zonificación y delimitación de la amenaza se han identificado sesgos que no muestran la condición real del terreno, presentando baja confiabilidad en el proceso de zonificación de ésta. Lo anterior, representa un problema dentro de la gestión del riesgo y el ordenamiento territorial, ya que sujeto a estos procesos se encuentran la seguridad, bienestar y calidad de vida de las personas, además de presentar costos económicos incalculables.

### **2.1. Hipótesis**

El modelo físico distribuido de análisis de estabilidad tridimensional Scoops3D es una herramienta confiable para la evaluación de amenaza en suelo urbano escala 1:2000.

### **3. Objetivos**

#### **3.1. Objetivo general**

Zonificar la susceptibilidad por movimientos en masa por medio de métodos determinísticos, utilizando el modelo físico distribuido de análisis de estabilidad Scoops3D a escala 1:2000, en el polígono San José la Cima, municipio de Medellín.

#### **3.2. Objetivos específicos**

- Determinar la distribución espacial de las unidades geotécnicas independientes.
- Evaluar la estabilidad de la zona de estudio a partir del cálculo del factor de seguridad por medio del modelo físico distribuido Scoops3D
- Comparar los resultados del modelo Scoops3D con los resultados obtenidos por (EAFIT,2018) en el marco del convenio de la Universidad EAFIT y la Empresa de Desarrollo Urbano (EDU) (Contrato inter-administrativo CT- 2017-000677) del programa “Unidos por el Agua”.
- Generar un modelo que se pueda recomendar a los tomadores de decisiones tanto públicos como privados.

## **4. Marco geográfico**

### **4.1. Aspectos generales de San José la Cima**

En esta sección se procede a describir las generalidades y el contexto del polígono de San José la Cima.

#### **4.1.1. Localización**

La zona de estudio se localiza al norte de la cordillera Central en el departamento de Antioquia, Colombia; se encuentra en el margen Nororiental del Valle Medio del Rio Aburrá (Rio Medellín) y hace parte de la comuna 3 de la ciudad de Medellín (Figura 1).

El polígono analizado se extiende desde el norte de la quebrada La Bermejala N° 2 a la altura de la calle 92D, hasta la quebrada La Máquina N° 1 y a la tubería proveniente de Piedras Blancas al sur. Al oriente desde la prolongación de la carrera 24 F y 24 C, y al occidente desde la carrera 32 al norte hasta la carrera 32 al sur y abarca un área de 21,05 ha. Como puntos de referencia se encuentran la cancha de fútbol del Jardín y la UVA de la Armonía que se extienden hacia el costado suroccidental, por fuera del polígono analizado, y la tubería de EPM – Piedras Blancas que se extiende hacia el costado sur sirviendo de límite del polígono en dicha zona (EAFIT, 2018).

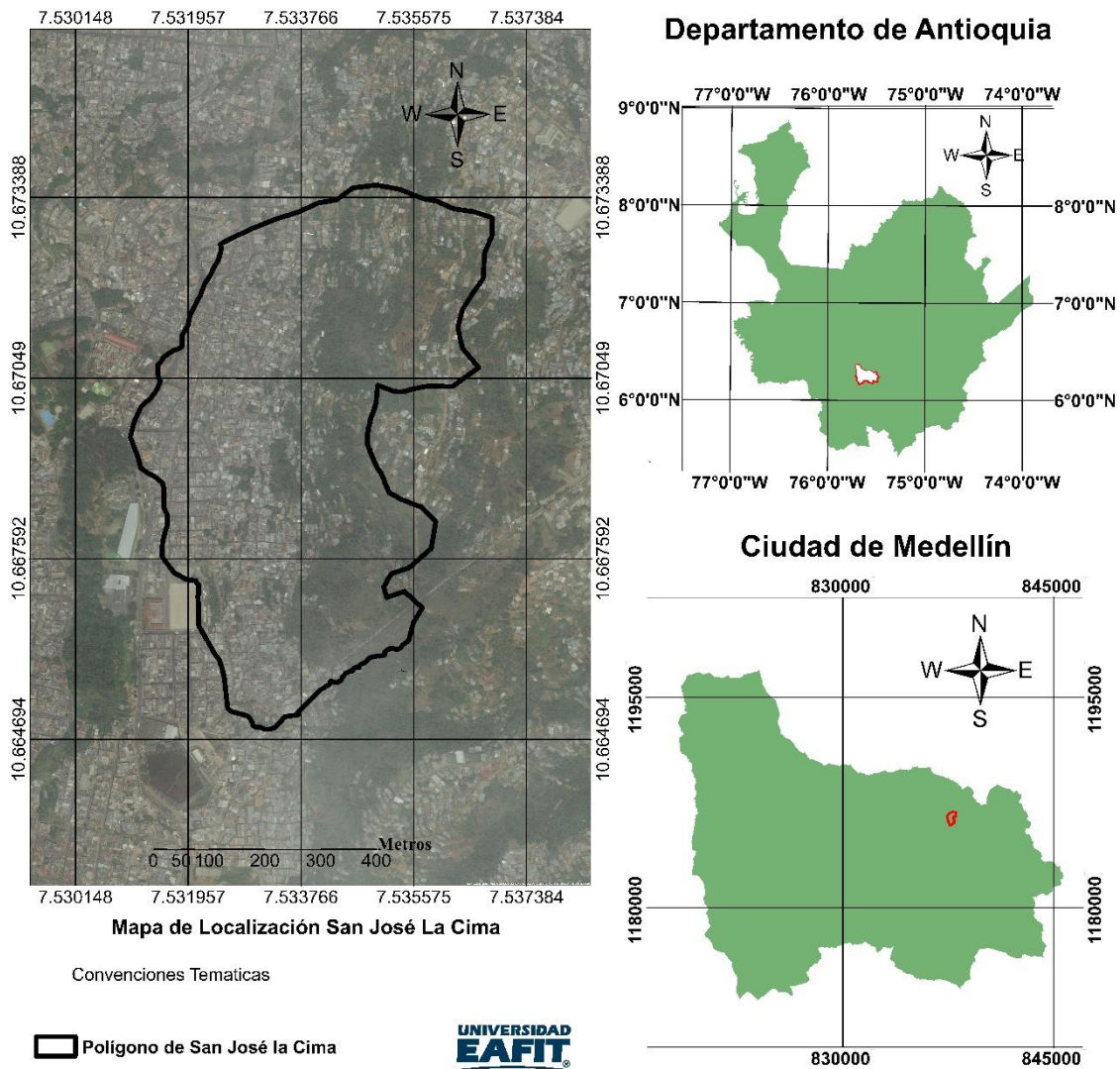


Figura 1. Mapa de Localización San José La Cima

#### 4.1.2. Población

El polígono San José La Cima comprende los barrios San José La Cima N°1 y San José N°2 los cuales tienen una densidad poblacional de 4985 habitantes (Municipio de Medellín – EMTELCO, 2015).

#### 4.1.3. Régimen climático

A diferencia de los continentes sin muchas elevaciones, donde el clima cambia en función de la latitud, los climas colombianos dependen de la altura, que a su vez controla la temperatura. El valle medio del Río Aburrá se encuentra a alturas que oscilan entre los

1300 y 2800 m.s.n.m. localizado a una latitud de 6°30N el valle de Aburrá puede ser considerado como ecuatorial. Su ubicación le dan una temperatura media de 23 °C. La precipitación 2.000 mm/año hacia el sur con dos épocas lluviosas controladas por el paso de la zona de convergencia intertropical (marzo-abril y octubre-noviembre) (VV. AA., 2007).

## **4.2. Contexto Regional**

A continuación, se describen las condiciones geológicas y geomorfológicas regionales del polígono de San José la Cima.

### **4.2.1. Marco geológico regional**

A continuación, se describen las principales unidades litoestratigráficas asociadas al polígono de San José la Cima.

#### **4.2.1.1. *Evolución tectonoestratigráfica del Valle de Aburrá: Elementos estratigráficos***

El Valle de Aburrá se encuentra localizado en la Cordillera Central de Colombia en la parte más norte de la Cordillera de los Andes. El área de estudio se encuentra localizada sobre la vertiente nororiental del Valle de Aburrá, en donde se presenta un basamento rocoso de edad Jurásica y representadas por dos unidades de roca; las primeras son rocas metamórficas definidas con el nombre de Metabasitas del Picacho (JKmbP), las cuales hacen parte del Complejo Ofiolítico de Aburrá, las cuales han sufrido dos eventos metamórficos, uno dinámico y otro térmico. En segundo lugar, se encuentra La Dunita de Medellín (JKuM), que está caracterizada por un conjunto de cuerpos alargados de composición dunítica, basaltos y sedimentos metamorfoseados de origen marino, que se encuentran fuertemente afectados tectónicamente. Finalmente y asociado a los procesos naturales que han afectado dicha vertiente se identifican una serie de materiales,

correspondientes a depósitos de vertiente asociados a antiguos movimientos en masa que se han desprendido de la parte alta de la ladera y que se han acumulado en zonas de menor pendiente, representando una compleja secuencia de depósitos con edades desde el Terciario Tardío hasta el Cuaternario, además de depósitos aluviales y aluvio – torrenciales asociados a la dinámica depositacional de algunos cuerpos de agua como la quebrada Santa Elena y algunos de sus principales afluentes (AMVA, 2007).

A continuación, se describen las características de las principales unidades litológicas que desde el punto de vista regional afloran en la zona de estudio.

- **Dunitas de Medellín (emplazamiento) (JKuM)**

Conforman una faja en forma de cuña dispuesta NNW, ubicada al oriente del Valle de Aburrá, la cual se extiende desde el sector de las Palmas hasta el municipio de San Pedro. Se trata de una roca compuesta esencialmente por olivino, con contenidos menores de cromita y magnetita; con alteraciones parciales a minerales del grupo de la serpentinita y está asociada en su origen con los metagabros mencionados. La roca presenta un color negro, verde oscuro o café cuando está meteorizada, se observa un intenso fracturamiento, que se hace más fuerte en las cercanías de las zonas de contacto (AMVA, 2007).

Esta litología conforma las zonas de topografía más abrupta que se observan al oriente del Valle de Aburrá (comuna nororiental), entre las que se incluyen las vertientes escarpadas. La meteorización de estas rocas genera suelos residuales que dependiendo de factores tales como el grado de fracturamiento del macizo, inclinación de la vertiente, geoformas presentes y condiciones hidrológicas, presentan condiciones y características muy diversas, con espesores variables entre 10 y 40m. Dichos suelos poseen capas con un alto contenido de hierro, evidenciado por la presencia hacia la superficie de gran cantidad de nódulos de este mineral. Hacia los horizontes más profundos del perfil se

observa una mezcla de bloques residuales embebidos en una matriz de material fino, correspondiente a suelo residual, generando una apariencia de depósito de vertiente (AMVA, 2007).

- **Metabasitas del Picacho (JKmbP)**

Hace parte del Complejo Ofiolítico de Aburrá y son rocas que han sufrido dos eventos metamórficos, uno dinámico y otro térmico, definiendo así la asociación de anfibolitas y metagabros. Estas rocas, en estado fresco, son de color gris moteada de blanco, presenta claras variaciones texturales, desde bandeada con alternancia de franjas claras y oscuras con orientación de los minerales máficos, hasta masiva (AMVA, 2007).

En la vertiente oriental afloran principalmente en los alrededores de Canteras de Colombia. También se encuentran como cantos y bloques en depósitos de vertiente y algunos depósitos aluviotorrenciales. Se presenta como un saprolito limo arcilloso de color variable entre gris claro, ligeramente moteado de blanco, amarillo y amarillo rojizo, consistente y de textura bandeada. El espesor de estos materiales se desconoce, pero supera los siete metros (AMVA, 2007).

- **Depósitos de vertiente (Q, N) (FI, FII, FIII, FIV, Fa)**

Corresponden a un conjunto de depósitos no litificados que se encuentran, en el área de interés, suprayaciendo las rocas antes descritas. Se encuentran depósitos de diferentes edades, que de acuerdo con las características que exhiben en cuanto a grado de consolidación, madurez y grado de incisión son considerados de edades anteriores al Cuaternario y por medio de las relaciones entre ellos son agrupados por eventos. En este grupo se encuentran depósitos de flujos de escombros y/o lodos frescos y maduros y depósitos de deslizamiento (AMVA, 2007).

Los flujos de escombros y/o lodos (NQFI, NQFII, QFIII, QFIV, QFa) representan una serie de eventos relacionados con depósitos de vertiente, donde los depósitos más antiguos se localizan en la parte media y alta de las laderas y los más jóvenes están en la parte baja de éstas. Estos depósitos se caracterizan por la variación en la relación matriz/bloques, la cual confiere el carácter de flujo de lodos o flujo de escombros a los eventos, y aunque esta proporción está muy relacionada con la fuente de donde se originaron los depósitos, también es frecuente encontrar una mezcla de ambos depósitos para un único evento. En términos generales se componen por un conjunto de bloques de roca que presentan diferentes grados de meteorización y están embebidos en una matriz más fina, por lo general arcilla o limo, que también puede estar meteorizada (AMVA, 2007).

Los depósitos de deslizamiento o depósitos coluviales, representan la acumulación de materiales producto de procesos de inestabilidad o movimientos en masa, y que se localizan sobre las vertientes donde hay zonas de baja pendiente y topografía suave (AMVA, 2007).

En general, los depósitos de flujo de lodo y/o escombros se caracterizan por presentar grandes diferencias en el grado de meteorización y mezclas caóticas (fabrica aleatoria) de fragmentos de roca (principalmente de origen Metamórfico) que varían de tamaño grava a bloques, embebidos en una matriz arcillosa principalmente, con una relación matriz - clastos muy variable (AMVA, 2007).

- **Depósitos aluviales y aluvio - torrenciales (Qal - Qat)**

Son los depósitos encontrados en el fondo de los valles de los principales drenajes del sector; están dispuestos como franjas angostas, alargadas e irregulares a lo largo de las quebradas y se identifican por presentar una morfología suave. De acuerdo con su

dinámica pueden ser de dos tipos: depósitos aluviales y depósitos aluviotorrenciales (AMVA, 2007).

Los **depósitos aluviales (Qal)** se presentan conformando las llanuras de inundación y terrazas aluviales de las corrientes. Son superficies suaves, generalmente planas, conformadas por clastos que tienen una selección moderada, alto grado de redondez y ligera imbricación (AMVA, 2007).

Los depósitos **aluviotorrenciales (Qat)** se caracterizan por su composición heterogénea, donde el tamaño de sus componentes varía desde bloques rocosos hasta arenas finas y limos. Estos depósitos están asociados a cuencas de montaña, donde los canales tienen altas pendientes y se desarrollan flujos turbulentos con alta energía, que moviliza materiales de diferente granulometría hasta encontrar zonas de pendientes suaves aledañas al cauce, donde se depositan los materiales (AMVA, 2007).

- **Llenos antrópicos (Qll)**

Constituyen depósitos artificiales, con una composición muy heterogénea, incluyendo aquellos materiales homogéneos conformados con algunas normas técnicas, y materiales mixtos tales como basura, materia orgánica y escombros vertidos sin disposiciones geotécnicas adecuadas. También se consideran llenos antrópicos las acumulaciones artificiales realizadas para la construcción de obras de infraestructura (AMVA, 2007).

#### ***4.2.1.2. Elementos estructurales: Sistema de fallas regionales***

Debido a la localización en el flanco Oeste de la Cordillera Central, la tectónica del Valle de Aburra está dominada por las fallas del Sistema Cauca-Romeral; el cual atraviesa el territorio nacional con una dirección aproximada N-S. Este sistema está compuesto por dos grupos de estructuras, hacia el oeste se tiene el sistema Cauca y al Este el sistema Romeral. Este último sistema es el más cercano a la ciudad de Medellín.

El complejo sistema de fallas N-S, del sistema de falla de Romeral involucra el flanco Oriental de la ciudad y las estribaciones de las superficies de erosión; posee una moderada a baja expresión geomorfológica en la cual se dificulta su observación por la presencia de lineamientos N-W y E-W que los desplazan (AMVA, 2007).

Rendón (1999) plantea en el área Urbana de Medellín, la presencia de al menos tres grupos de estructuras tectónicas principales, las relacionadas con la obducción de una secuencia ofiolítica; las de tendencias N-S y las de tendencia N-W (AMVA, 2007).

Las estructuras tectónicas de obducción o cabalgamiento están relacionadas a un extenso cuerpo dunítico que cruza el sector Oriental de la ciudad con dirección general N-NE; el cual corresponde a una antigua escama de material ultrabásico oceánico, emplazado tectónicamente por un complejo proceso de obducción durante el Cretáceo Inferior (102 m.a., aproximadamente) sobre las anfibolitas (Restrepo, 1986). Asociadas a este fenómeno se desarrollaron una serie de estructuras tectónicas que marcan el contacto aproximadamente subhorizontal entre las dunitas y las anfibolitas (AMVA, 2007).

- Falla Santa Elena

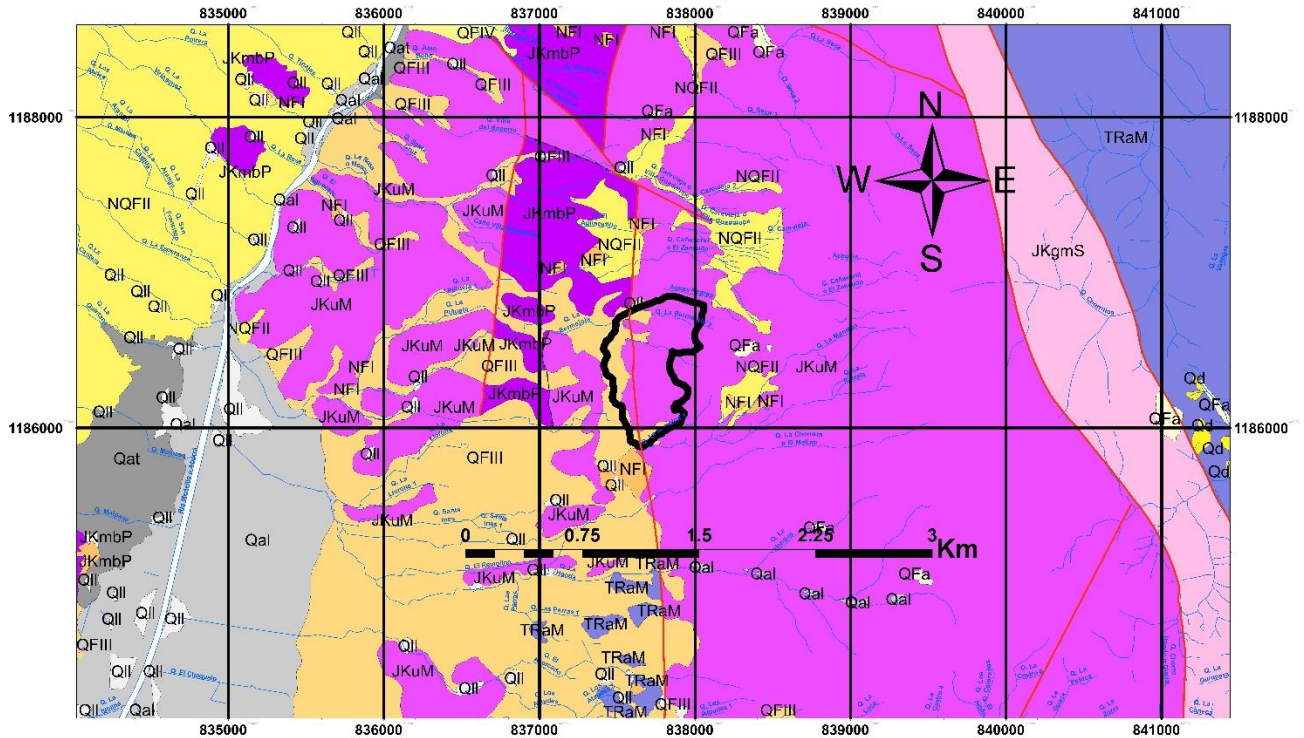
Propuesta por Ingeominas (2007) es una falla normal que desplaza verticalmente el plano de cabalgamiento de la Dunita en aproximadamente 270 m. Su buzamiento se encuentra entre  $55^{\circ}$  y  $75^{\circ}$ N. De esta estructura no se conoce su grado de actividad ni hay estudios que permitan definir si es una falla activa, se presume que es baja (AMVA, 2007).

- Falla La Acuarela

Ingeominas (2007) propone este nombre a la falla de rumbo de N-S a N NW, que ha sido denominada por otros autores como falla Pericos y falla Rodas (Rendón, 1999; GSM, 1999), con el fin de diferenciarla de la falla de cabalgamiento de Rodas y de la falla Otú - Pericos. Ingeominas (2007) la propone con una longitud de 35 km y su continuidad

hacia el norte con las trazas de falla del Sistema Belmira. Esta falla presenta una bifurcación y se presenta como dos trazas bien diferenciadas, desde la quebrada Las Palmas (Sector Paulandia) hasta la Curva de Rodas sobre la vía Medellín- Bogotá. Estos autores la describen como una falla en cola de caballo con dos trazas que localmente alcanzan una separación mayor a 1,1 km (AMVA, 2007).

Geomorfológicamente, la describen como una falla que presenta un fuerte cambio de pendiente, y alineamiento de drenajes (quebrada Rodas y quebrada Seca; quebrada Santa Elena y quebrada Espíritu Santo), forma además una depresión a lo largo de su traza y entre las dos trazas de la falla se forman colinas alongadas en sentido NS en los sectores de las veredas Pericos y Santa Elena. La traza occidental de la falla presenta rumbo NS y N15°W con buzamientos de 58°W a verticales, mientras que la traza oriental presenta valores entre N10°E y N10°W, y buzamientos entre 56° y vertical generalmente hacia el oriente. Le asignan un movimiento lateral izquierdo (AMVA, 2007).



**Mapa de Geología Regional San José La Cima**



Con convenciones Tematicas	
<b>Unidades</b>	<b>Con convenciones Tematicas</b>
Qal, Depósitos aluviales	Qd, Depósitos de deslizamiento
QII, Llenos antrópicos	NFI, Depósitos de flujos de escombros y/o lodos
QFIII, Depósitos de flujos de escombros y/o lodos	NQFII, Depósitos de flujos de escombros y/o lodos
QFIV, Depósitos de flujos de escombros y/o lodos	JKuM, Dunitas de Medellín
QFa, Depósitos de flujos de escombros y/o lodos	JKmbP, Metabasitas del Picacho
Qat, Depósitos aluviotorrenciales	JKgmS, Gneis Milonítico de Sajonia
Falla	TRaM, Anfibolitas de Medellín
Cabalgamiento	Polígono San José La Cima
	Red Hidrica

Coordenadas Proyectadas: PCS MAG Ant Medellín  
 Proyección: Transversa de Mercator  
 Falso Este: 835.378  
 Falso Norte: 1.180.816  
 Meridiano Central: -75,5649  
 Latitud de Origen: 6,2292  
 Unidad Lineal: Metros  
 Coordenadas Geográficas: GCS\_MAGNA  
 Datum: Magna, Origen Medellín

Figura 2. Mapa del marco geológico regional del polígono de San José la Cima.

#### 4.2.2. Geomorfología Regional: Valle de Aburrá Medio (VM)

El valle consiste en una profunda depresión rodeada de montañas que alcanzan 3.000 m s. n. m. y altiplanos de 2.000 a 2.600 m. Dicha depresión comprende dos tramos, uno con dirección SN de Caldas a Bello y otro con dirección NE de Bello hasta Barbosa, donde el río se encañona (Hermelin, 2015).

El Valle de Aburrá Medio (VM) Se extiende aproximadamente desde los municipios de Itagüí y Envigado hasta los límites entre Bello y Copacabana. Es el valle más ancho, con un fondo amplio y plano, flanqueado por superficies suaves en distintos depósitos de

vertiente, sistemas de colinas y lomos que terminan en la parte más alta en escarpes lineales que marcan el límite del valle y los altiplanos. La zona estudiada, se localiza dentro de los bloques denominados como: Bloque Comuna Nororiental Alta y Bloque Comuna Nororiental Baja. Estas macrounidades se localizan sobre la vertiente oriental del Valle Medio de Aburrá (AMVA, 2007).

- **Bloque Comuna Nororiental Alta (VM-BCNA)**

Esta macrounidad corresponde a una franja de terreno alargada en sentido N-S, desarrollada sobre rocas ultrabásicas (Dunitas de Medellín) y muy localmente sobre depósitos de vertiente. Su característica principal es el claro control estructural (AMVA, 2007).

El avance remontante del frente erosivo del río Aburrá, a través de las corrientes del sector, ha generado un sistema de lomos, que en la parte norte tienen una tendencia N-W a N-S y en el sector sur E-W. En medio de esta unidad geomorfológica, con una distribución irregular, se identifican áreas de topografía suave, orientadas en sentido N-S y desarrolladas sobre suelos residuales de dunitas. Por su paralelismo con estructuras regionales se interpretan como Peldaños. En el sector de Santo Domingo Savio se presenta en medio de la vertiente un cerro de carácter regional, el cual tiene una base oval de tendencia N-S y laderas empinadas, el cual fue cartografiado como Picacho. Finalmente, hacia la parte baja de polígono y en estrecha relación espacial con las fallas N-S se identificaron una serie de facetas triangulares, definidas en este trabajo como rasgos morfotectónicos (AMVA, 2007).

- **Bloque Comuna Nororiental Baja (VM-BCNB)**

En estrecha relación con la macrounidad anterior se presenta otra franja de terreno de tendencia también N-S, localizada en la misma vertiente nororiental del Valle Medio,

pero más abajo, ocupando terrenos entre los 1.750 y 1.450 msnm. Esta macrounidad está limitada al este por una serie de fallas y lineamientos de tendencia N-S, que coincide con un marcado incremento de la pendiente.

Al norte se observan pendientes regulares y continuas de inclinación suave a moderada con vergencia hacia al fondo del valle; constituidas principalmente por espesos suelos residuales de rocas ultrabásicas cizalladas y localmente por depósitos de vertiente; en medio de las cuales las corrientes han labrado sus cauces, generando una red poco densa de vaguadas moderadamente incisadas de flancos cortos, irregulares y de pendientes moderadas. Este tipo de morfología se extiende al sur siguiendo el borde oriental de la macrounidad. Por otro lado, dentro del polígono también se identificaron una serie de zonas de pendiente suave a diferentes alturas, que por su localización (cerca a las trazas de las fallas o lineamientos) u orientación se cartografiaron como peldaños. Dentro de estos llama la atención el sector de Aranjuez-Brasilia (AMVA, 2007).

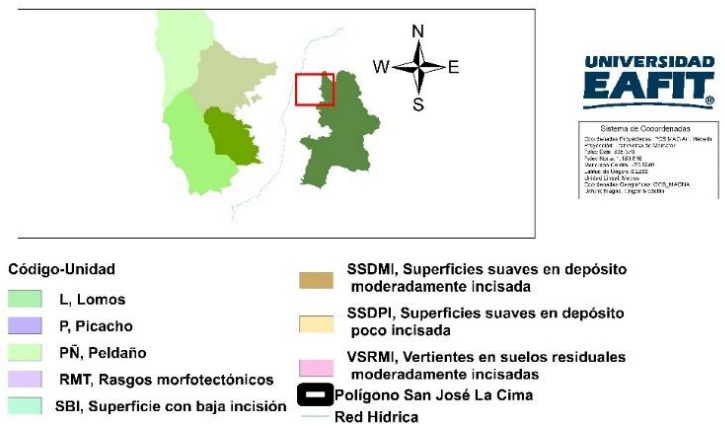
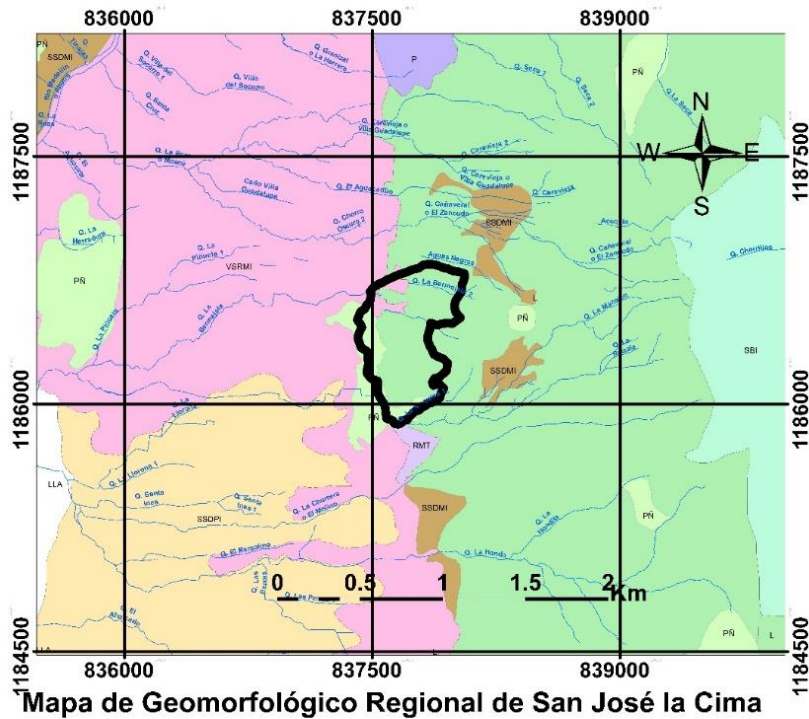


Figura 3. Mapa geomorfológico regional del polígono de San José La Cima.

### 4.3. Contexto Local

A continuación, se describen las condiciones geológicas locales y variables morfométricas del polígono de San José la Cima

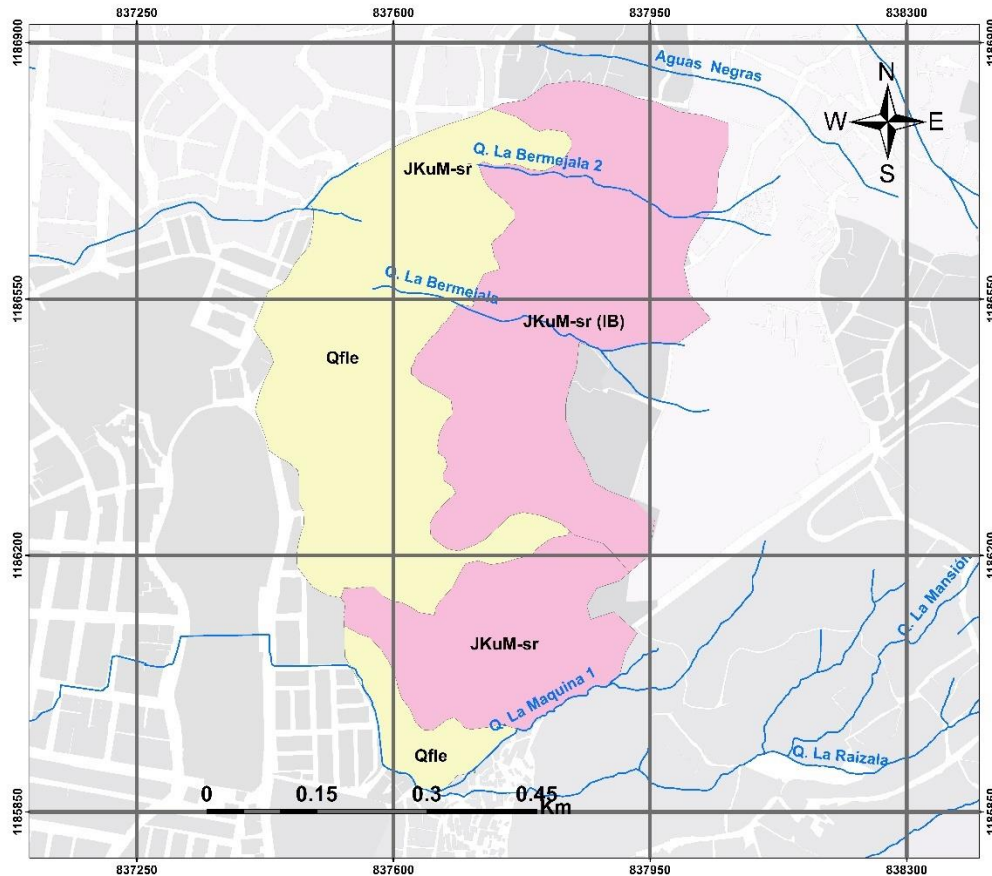
#### 4.3.1. Marco geológico local

Las condiciones geológicas locales del polígono de San José la Cima están definidas por las unidades geológicas para ingeniería (UGI) que afloran en la zona del proyecto, que corresponden a suelos residuales y saprolito asociados al perfil de meteorización de la Dunita de Medellín (JKuM) unidad geológica predominante en la zona y que representa

el basamento de la mayor parte de la ladera estudiada. Hacia la parte baja, en el costado occidental, esta unidad se encuentra cubierta por depósitos de vertiente de edad cuaternaria asociados a antiguos movimientos en masa que se han desprendido de la parte alta de la ladera y se han depositado conformando áreas de menor pendiente y aspecto irregular (Figura 3) (EAFIT, 2018).

A continuación, se describen las unidades geológicas para ingeniería (UGI) que afloran en la zona del proyecto:

**Depósitos de flujo de lodos y escombros (Qfle):** Corresponden a materiales asociados a depósitos generados a lo largo de la vertiente, producto de la meteorización, desprendimiento y arrastre de los mismos desde las partes alta de la ladera a través de antiguos movimientos en masa. Debido a los procesos gravitacionales se localizan en la base de la misma, cubriendo la mayor parte de la zona media y baja de estudio, caracterizándose por presentar una morfología suavizada e irregular y una composición heterogénea, con porcentajes entre los bloques y la matriz en proporciones variables. Estos corresponden a depósitos de flujos de lodos y escombros, cuyos porcentajes de matriz/clastos varía dependiente de la localización y las características topográficas de la zona.



**Mapa Geológico Local**



Figura 4. Mapa geológico local del polígono de San José la Cima

**Dunita de Medellín (JKuM):** esta unidad litológica representa el basamento rocoso de la mayor parte de la ladera que conforma el polígono de San José la Cima (Figura 2), sin embargo, en el costado occidental, se encuentra cubierta por depósitos de vertiente y llenos antrópicos, por lo que los principales afloramientos se observan hacia el costado oriental.

En la zona de estudio afloran principalmente suelos completamente meteorizados y la roca altamente fracturada y meteorizada, donde el horizonte de transición no es continuo y sólo es observable en algunos afloramientos (EAFIT, 2018).

A continuación, se describe el perfil de meteorización generalizado:

**Suelo residual – nivel IB:** este estrato está constituido por limos arcillosos de color café amarillento, de consistencia blanda y compacidad suelta completamente meteorizados, donde no se observa la textura original de la roca. Localmente, se presentan zonas de oxidación que imprimen coloraciones negras sobre el material, asociado a antiguas zonas de debilidad.

**Saprolito – nivel IC (JKum-s):** Los saprolitos identificados en la zona se presentan como limos arcillosos de coloraciones café amarillenta con zonas grises verdosas. El material conserva parte de la textura de la roca original donde se observa parcialmente la serpentinita a través de planos bien definidos. Igualmente se presentan zonas de oxidación a través de planos heredados de la roca original.

#### **4.3.2. Variables Morfométricas**

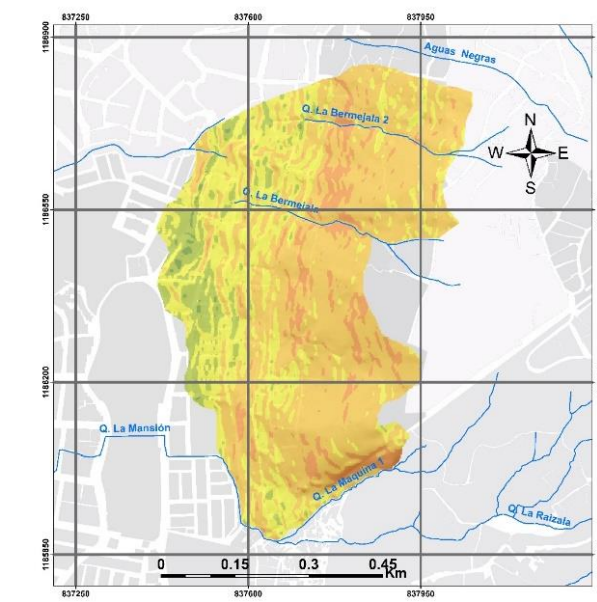
A continuación, se describen las variables morfométricas del polígono de San José la Cima tenidas en cuenta para el análisis de estabilidad.

##### **4.3.2.1. Pendiente**

La morfometría, como componente del relieve, se refiere al grado de inclinación del terreno o gradiente, expresado en porcentaje o grados. El mapa resultante de este análisis muestra la distribución de las pendientes naturales del área de estudio, de acuerdo con los rangos preestablecidos. La importancia de este análisis radica en que, en la evaluación de la susceptibilidad a movimientos en masa, el análisis de éstas no se puede pasar por alto, ya que cada material superficial posee un comportamiento geomecánico diferente,

según la pendiente donde este localizado. Igualmente, el desarrollo urbanístico y el uso del suelo se encuentran restringidos por esta variable.

La zona de estudio se caracteriza por tener una topografía dominada por rangos de pendientes abruptas a muy abruptas en una gran porción de su extensión, la mayor parte de éstas asociado a las vertientes rectas y largas que se extienden hacia la parte media y costado oriental del área analizada. Hacia la parte baja predominan zonas inclinadas a muy inclinadas, asociadas a los sectores que han sido suavizadas por la acumulación de depósitos de vertiente. Igualmente se identifican zonas de menor pendiente (muy suave a suaves) asociadas a los sectores intervenidos antrópicamente para el establecimiento de viviendas, vías de acceso y adecuaciones de tipo urbanístico (Figura 5).



**Mapa de Pendientes**



Figura 5. Mapa de pendientes de San José la Cima.

En la siguiente tabla se presenta la distribución de los diferentes rangos de pendientes para la zona de estudio:

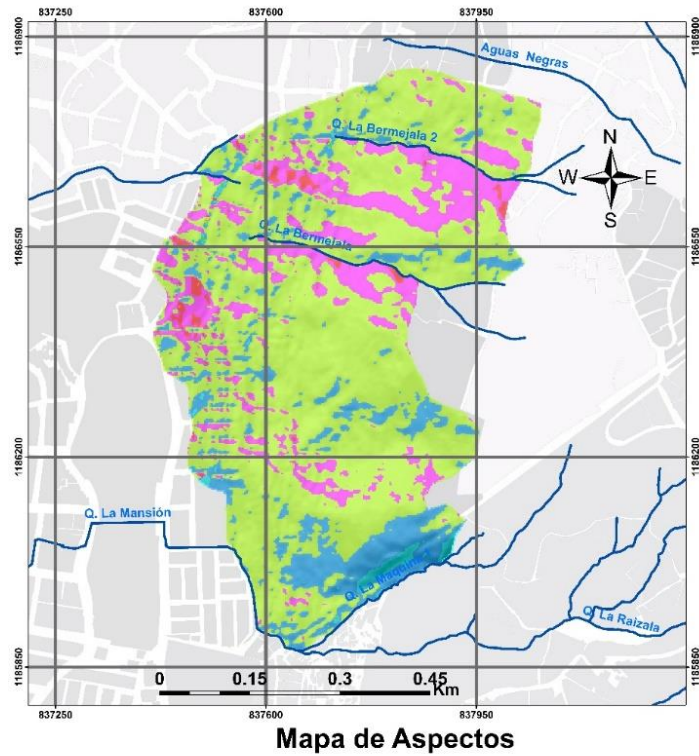
**Tabla 1. Rangos de pendientes de San José la Cima. Adaptado de (EAFIT, 2018)**

<b>Rango pendiente</b>	<b>Total Área (ha)</b>	<b>Porcentaje (%)</b>
0 - 3% (muy suave)	1.28	3.3
3 - 10% (suave)	0.75	1.9
10 - 25% (inclinada)	3.49	8.9
25 - 40% (muy inclinada)	5.26	13.5
40 - 60% (abrupta)	12.30	31.5
60 - 100% (muy abrupta)	15.39	39.4
>100% (escarpada)	0.63	1.6

#### **4.3.2.2. Aspectos**

Aspecto es un concepto geomorfológico que indica la dirección de mayor pendiente en cualquier punto de una vertiente, definida por la celda y sus 8 vecinos circundantes. (Acosta, 2017). La orientación puede verse como la dirección de la pendiente. Los valores del ráster de salida serán la dirección de brújula de la orientación.

Así, de acuerdo con (Figura 6) se puede observar que la dirección de las mayores pendientes en el polígono de San José la Cima en su mayoría son en sentido W y NW, especialmente en la zona de incisión de las Quebrada La Bermejala y Bermejala 2. En la zona sur del polígono se observan direcciones en sentido SW asociadas a la incisión de la Quebrada La Maquina 1.



**UNIVERSIDAD  
EAFIT®**

Coordinate System: PCS MAG Ant Medellín  
 Projection: Transverse Mercator  
 Datum: DAT MAG Ant Medellín  
 False Easting: 835.378.9470  
 False Northing: 1.180.216.8750  
 Central Meridian: -75.5549  
 Scale Factor: 1.0000  
 Latitude Of Origin: 6.2292  
 Units: Meter

Figura 6. Mapa de Aspectos del polígono de San José la Cima.

## 5. Marco Teórico

El marco teórico del actual proyecto se fundamenta en un inicio en el marco legal correspondiente a Colombia, donde se describen las principales leyes y conceptos establecidos para la zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa; posteriormente se describen los conceptos físicos y modelos matemáticos en los que se fundamenta el análisis de estabilidad en 3D.

### 5.1. Marco Legal

A continuación, se definen los conceptos legales asociados al proyecto actual.

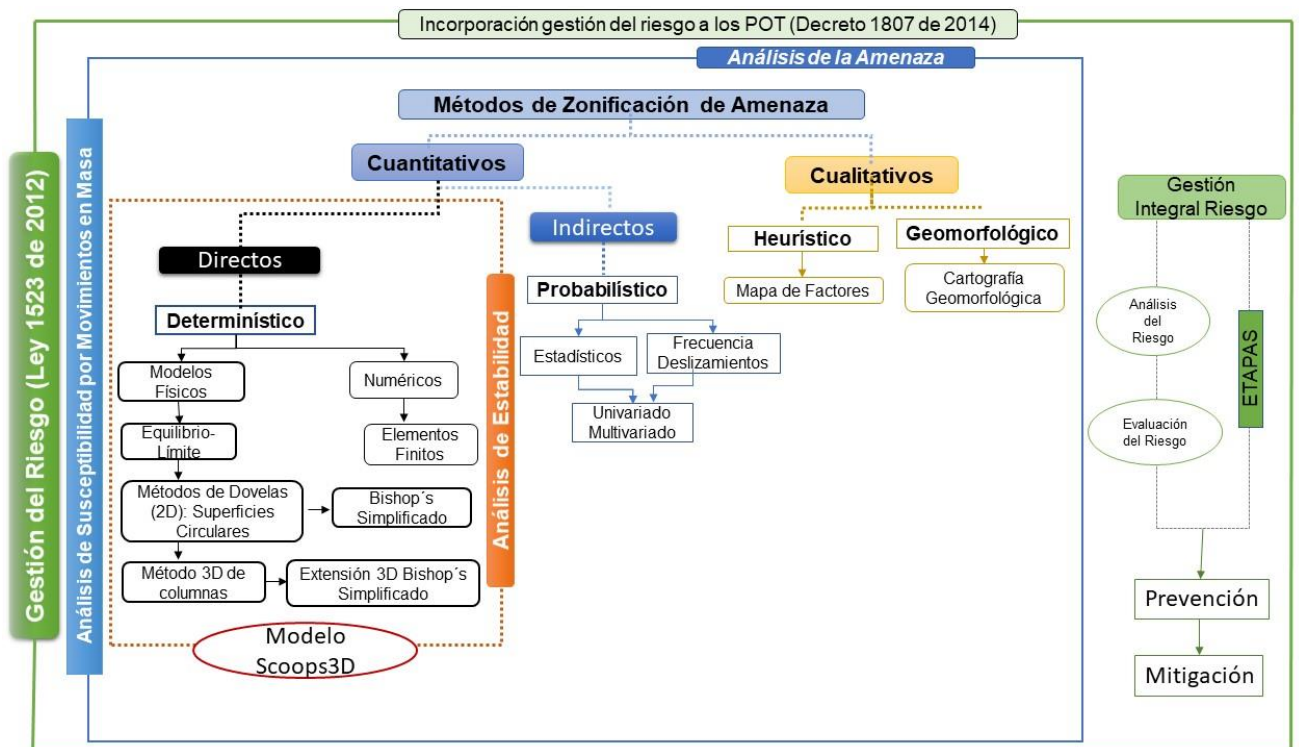


Figura 7. Diagrama del marco legal de zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa

#### 5.1.1. Gestión del Riesgo

En Colombia, la Gestión del Riesgo está definida por la Ley 1523 de 2012 como un proceso social cuyo fin es contribuir a la seguridad, el bienestar, la calidad de vida de las personas y al desarrollo sostenible (SGC, 2015). La gestión del riesgo comprende tres etapas: análisis del riesgo, evaluación del riesgo y mitigación, y prevención.

El proyecto actual se centrará únicamente en el análisis de susceptibilidad contenido dentro de la etapa de análisis de riesgo.

### **5.1.2. Análisis del Riesgo**

De acuerdo con la Ley 1523 de 2012, el análisis del riesgo implica la consideración de las causas y fuentes del riesgo, sus consecuencias y la probabilidad de que dichas consecuencias puedan ocurrir, mediante la relación cualitativa, semicuantitativa o cuantitativa de la amenaza y la vulnerabilidad., con el fin de determinar los posibles efectos sociales, económicos y ambientales, y sus probabilidades (SGC, 2015).

### **5.1.3. Análisis de Amenaza**

Esta etapa comprende tres fases principales: definir un modelo geológico-geotécnico, plantear escenarios de amenaza y zonificar la amenaza. Como resultado de estas fases y de la etapa de análisis en sí misma, se obtienen los mapas de amenaza (SGC, 2015).

### **5.1.4. Ordenamiento Territorial**

La gestión integral del riesgo se incorpora a los planes de ordenamiento territorial por medio del Decreto 1807 de 2014, donde se establecen los estudios básicos y estudios de detalle. Los estudios de detalle, que son materia del proyecto actual están orientados a determinar la categorización del riesgo y establecer las medidas de mitigación correspondientes (Decreto 1807 de 2014).

### **5.1.5. Estudios de Detalle**

Según el SGC (2015) el análisis detallado de amenaza por movimientos en masa escala 1:2000, se debe desarrollar para aquellas zonas que hayan quedado clasificadas como de amenaza alta y media en el estudio básico de amenaza. En los estudios detallados deben realizarse secciones de análisis en ladera que permitan refinar el modelo geológico-

geotécnico base mediante el levantamiento topográfico detallado, el plan de exploración del subsuelo y ensayos de laboratorio (SGC, 2015).

## 5.2. Concepto de Estabilidad de Ladera

Las laderas son las formas del terreno más comunes en la Tierra. Aunque la mayoría de las laderas parecen estables y estáticas, son en realidad sistemas dinámicos y en evolución. Los procesos activos en estos sistemas por lo general no producen pendientes uniformes. Más bien, la mayoría de las laderas están compuestas por varios segmentos que son rectos o curvos (Figura 7) (Keller y Blodgett, 2004).



Figura 8. Segmentos de pendiente en una ladera. Tomado de (Keller y Blodgett, 2004)

En un análisis de estabilidad de una ladera urbanizada como la del polígono de San José La Cima; conviene evaluar la amenaza e implementar a tiempo las medidas preventivas y correctivas para evitar desastres y pérdidas de vidas humanas (Chica, 1989). Chowdhury y Flentje (2011) plantean que los factores propios y variables de la ladera que controlan la estabilidad y que deben ser investigados a largo plazo son: topografía, geología, condiciones geotécnicas y ambientales; además de que es importante considerar

los principales elementos desencadenantes de inestabilidad tales como, la ocurrencia de lluvias excesivas o sismos.

De esta manera, el actual proyecto se centrará en los movimientos en masa, como principal evento físico o amenaza natural a evaluar dentro de una ladera urbanizada, en este caso, el polígono urbano de San José La Cima en la ciudad de Medellín, Colombia.

### **5.3. Movimientos en masa**

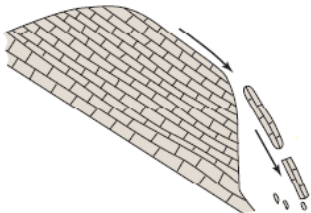
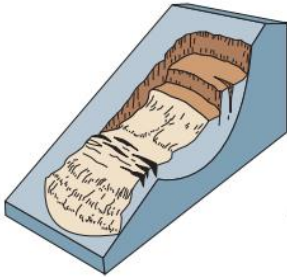
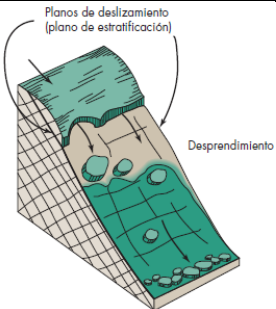
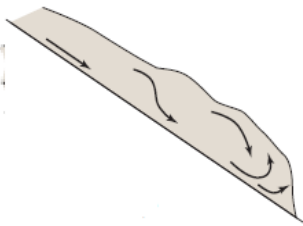
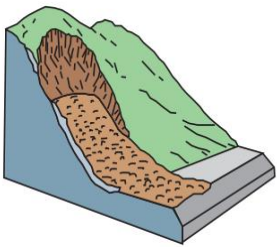
Movimientos en masa es un término amplio para designar cualquier tipo de movimiento ladera abajo del terreno (Figura 9). En un sentido más restringido, movimiento en masa se refiere a un rápido movimiento ladera abajo de rocas o suelo en forma de una masa más o menos coherente (Keller y Blodgett, 2004).

#### **5.3.1. Tipos de movimientos en masa**

Los diferentes tipos de movimientos en masa implican tal cantidad de procesos y factores que ofrecen ilimitadas posibilidades de clasificación (Hansen, 1984). Pueden diferenciarse en función del tipo cinemático del movimiento, tipo de material movilizado, según su estado de actividad, velocidad de movimiento y etapa de desarrollo (Cruden y Varnes, 1996).

Habitualmente, se usa el término deslizamiento en sentido amplio, para designar casi todas las variedades de movimientos en masa producidos en las laderas, incluyendo algunos procesos como caídas, vuelcos o flujos, en los que no hay deslizamiento o éste es muy pequeño (Varnes, 1984). Sin embargo, Keller y Blodgett (2004) hacen la distinción de deslizamiento como el desprendimiento de suelo o roca a lo largo de un plano de deslizamiento curvo que produce bloques de deslizamiento. En la (Tabla 2), se exponen los diferentes tipos de movimientos en masa, su mecanismo y las características que los definen según Keller y Blodgett (2004):

**Tabla 2. Clasificación de los movimientos en masa. Tomado y adaptado de Keller y Blodgett (2004)**

Mecanismo	Tipo de Movimiento	Características	Ilustración
Caída	Caída de Roca	Caen rocas individuales por el aire y pueden acumularse como talud.	 <p>Tomado de (Keller y Blodgett, 2004).</p>
Deslizamiento	Deslizamiento de Suelo	Suelo y otros materiales de la tierra erosionados se desprenden en una superficie inclinada de lecho de roca o sedimento cohesivo; también denominado desprendimiento de detritos o de tierra.	 <p>Tomado de (USGS,2004).</p>
	Desprendimiento de Roca	Grandes bloques de lecho de roca se desprenden de una superficie plana, como planos de estratificación o foliación (metamórfica).	 <p>Tomado de (Keller y Blodgett, 2004).</p>
Flujo	Flujo de Tierra	Masa de suelo y roca erosionada húmeda, parcialmente cohesiva e internamente deformada.	 <p>Tomado de (Keller y Blodgett, 2004).</p>
	Flujo de Detritos	Mezcla fluida de rocas, arena, lodo y agua que es intermedia entre un deslizamiento de tierra y flujo de agua; incluye flujos de lodo y lahars.	 <p>Tomado de (USGS, 2004).</p>

### 5.3.2. Factores detonantes de movimientos en masa

Factores como la lluvia y los sismos, que pueden modificar las condiciones de estabilidad de una ladera, se consideran detonantes y se deben evaluar para la definición de escenarios de amenaza actuales y potenciales (SGC, 2015). La definición de escenarios permite caracterizar la amenaza en términos de ubicación, clasificación material y tamaño (SGC, 2015).

### 5.3.3. Geometría superficies de deslizamiento de suelo

El término de superficie de deslizamiento o como la define Suarez (2013) superficie de falla, se utiliza para referirse a una superficie asumida a lo largo de la cual puede ocurrir el deslizamiento o la rotura de un talud. Para la evaluación de la amenaza por movimientos en masa que se realizará, se considera una superficie de deslizamiento cuya forma geométrica es curva o circular (Figura 9).

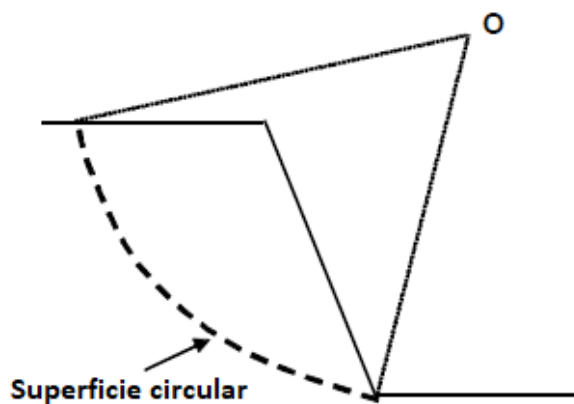


Figura 9. Superficie de deslizamiento circular

Los movimientos en masa rotacionales se presentan cuando la superficie de ruptura es curva y cóncava hacia arriba y el movimiento es más o menos rotacional sobre un eje paralelo a la superficie del suelo y transversal a lo largo del deslizamiento (USGS, 2004) (Figura 10). De esta manera, se restringe el análisis de amenaza para deslizamientos con mecanismo rotacional sobre una superficie de deslizamiento curva.

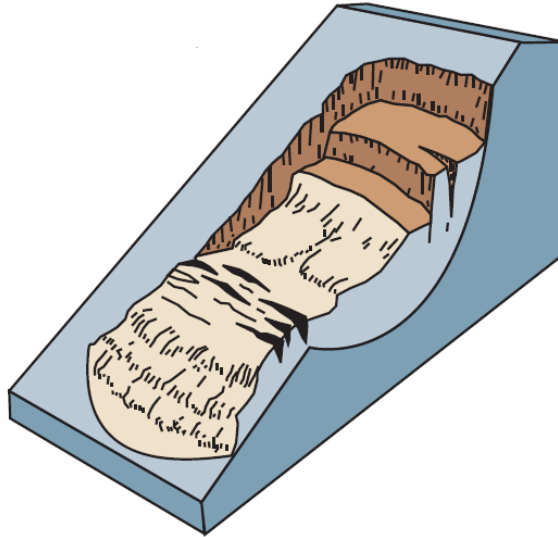


Figura 10. Deslizamiento de suelo con mecanismo rotacional sobre una superficie curva. Tomado de (USGS, 2004).

#### **5.4. Unidad de Zonificación de Terreno**

Se define la UZT (Unidad de Zonificación de Terreno), como la unidad de discretización para producir mapas temáticos con propósitos de zonificación (SGC, 2015). El área mínima de una UZT está relacionada con la resolución de la información de la zonificación que se desee (Calvello et al. 2013).

##### **5.4.1. Sección Topográfica**

Como unidades de zonificación, las secciones topográficas plasman las condiciones estratigráficas y geomecánicas de los diferentes estratos que componen cada sector a analizar (Figura 11) (EAFIT, 2018).

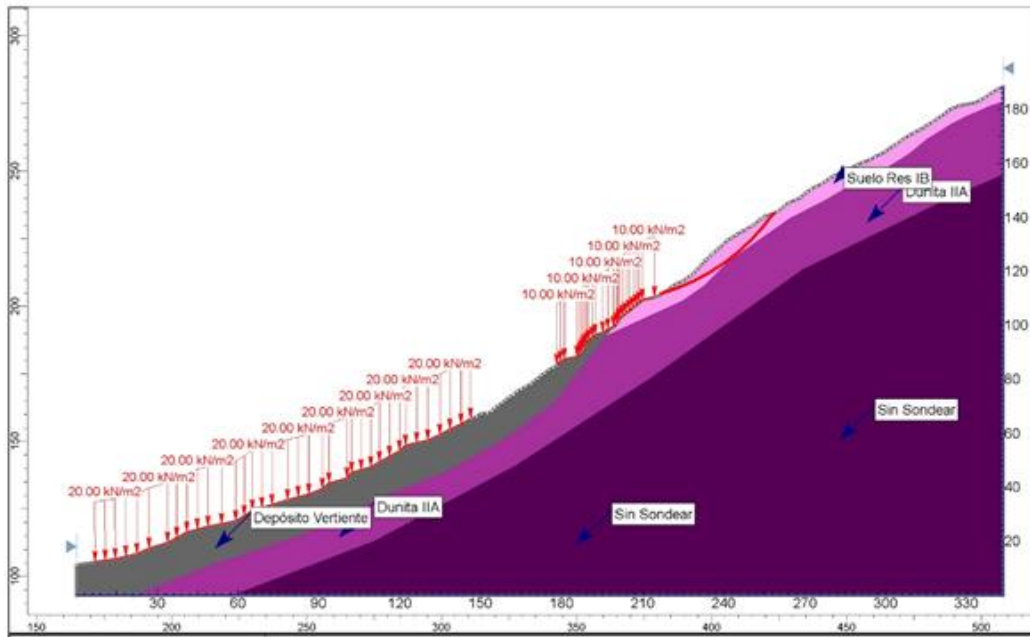


Figura 11. Sección topográfica del polígono de estudio San José la Cima. Tomado y modificado de (EAFIT, 2018).

#### 5.4.2. Unidades de Geología para Ingeniería (UGI)

Las UGI corresponden a zonas delimitadas teniendo en cuenta que representen alto grado de homogeneidad con respecto a las propiedades geotécnicas básicas, cumpliendo con las características de área y espesores mínimos cartografiables (SGC, 2015). Como base para la generación de las UGI, se propone clasificar los materiales de acuerdo con su origen, donde se modificó a partir de las unidades geológicas superficiales propuestas por Hermelín (1985).

Para el actual caso de estudio se tendrán en cuenta únicamente depósitos de ladera, de vertiente o coluviales (Tabla 3):

Tabla 3. Caracterización de las Unidades de Geología para Ingeniería según su origen. Tomado y modificado de SGC (2015).

Origen de la UGI	Tipo de UGI
Depósitos de ladera, de vertiente o coluviales	Coluviones Taludes Flujos (de lodo, suelo y escombros) Derrubios de pendiente

### **5.4.3. Unidades Geotécnicas Homogéneas**

Las condiciones intrínsecas que determinan la estabilidad del terreno, como tipo de material, espesor, pendiente, condiciones de agua, cobertura, etc., presentan variabilidad espacial; por lo tanto, resulta conveniente identificar unidades geotécnicamente homogéneas, con el fin de plantear en cada caso un modelo conceptual que involucre en forma consistente las características geológicas y geomorfológicas y los parámetros geotécnicos de modo que se puedan hacer cálculos de estabilidad para obtener en cada zona la amenaza por movimientos en masa de manera determinística, basada en el cálculo de los factores de seguridad (SGC, 2015).

El SGC (2015) establece que las UGH se obtienen a partir de la asociación de los elementos geomorfológicos del área de estudio y las UGI; donde, para cada una de las unidades geotécnicas definidas se establece un modelo geológico-geotécnico con base en la información geológica y geomorfológica, y el reconocimiento geotécnico inicial por parte de los expertos. Los elementos que se deben definir son:

- Pendiente del terreno, a partir del DEM
- Espesor del suelo y su variación dentro de la unidad geotécnica
- Litoestratigrafía hasta el sustrato rocoso
- Posición del nivel freático

Los parámetros geotécnicos para cada unidad geotécnica homogénea se determinan a partir de la exploración del subsuelo, los ensayos de laboratorio (peso unitario, intercepto de cohesión y ángulo de resistencia interna), la caracterización geomecánica de las unidades y la posición del nivel freático (SEG, 2015).

Además, Chica (1989) plantea la importancia que tiene para los estudios de detalle la variación horizontal y vertical de los parámetros anteriormente mencionados y las

características de los contactos entre las unidades geotécnicas homogéneas. De esta manera, para el análisis actual de estabilidad se usará como unidad de análisis la Unidad Geotécnica Homogénea.

## **5.5. Métodos de Zonificación de Susceptibilidad**

Atendiendo a la definición de amenaza como un evento o proceso potencialmente dañino caracterizado por una probabilidad, intensidad, magnitud, localización, etc., se requiere plantear métodos que determinen además de la probabilidad de ocurrencia de un evento, su intensidad, magnitud y localización. El análisis de la amenaza permite la confección de mapas de amenaza que expresan cartográficamente los resultados de este análisis (Calderón, 2010).

### **5.5.1. Métodos Cualitativos**

Los métodos cualitativos están soportados en el criterio y evaluación de un experto para definir el grado de susceptibilidad.

#### **5.5.1.1. Método Heurístico (Métodos basados en la susceptibilidad relativa)**

Los mapas basados en la combinación de factores estiman la susceptibilidad relativa según una ponderación definida por el autor para cada factor, en base a su contribución respecto a la estabilidad de ladera, son también denominados métodos heurísticos (Calderón, 2010). Los métodos heurísticos se basan en categorizar y ponderar los factores causantes de inestabilidad según la influencia esperada de éstos en la generación de deslizamientos (Brabb et al., 1972; Nilsen et al., 1979; Ambalagan, 1992). Son métodos conocidos como indirectos, los resultados de los cuales se pueden extrapolar a zonas sin deslizamientos con una combinación de factores similar (Calderón, 2010).

#### **5.5.1.2. Método Geomorfológico**

Son métodos directos que se basan en cartografía geomorfológica a partir de la cual el autor identifica y localiza los deslizamientos y procesos asociados a éstos directamente

en el campo (Calderón, 2010). Con las observaciones, el experto extrae unos criterios para la determinación de áreas potencialmente inestables y para la confección del mapa de susceptibilidad y/o amenaza final. La elaboración de estos mapas exige conocer la morfología y tipología de movimientos (Hansen, 1984).

### **5.5.2. Métodos Cuantitativos**

Los métodos cuantitativos utilizan expresiones matemáticas objetivas produciendo factores de seguridad o probabilidades de ocurrencia de movimientos en masa.

#### **5.5.2.1. Método Indirecto: Probabilístico**

Dentro de este grupo se encuentran los métodos estadísticos y el análisis de frecuencia de deslizamientos. Son métodos indirectos cuyos resultados se pueden extrapolar a zonas distintas de las utilizadas para estimar la susceptibilidad y en algunos casos la amenaza, con condiciones geológicas y climáticas homogéneas (Calderón, 2010). Según Calderón (2010) estas aproximaciones permiten regionalizar los resultados. Una de las dificultades para evaluar la amenaza es la introducción de las variables detonantes cuya recurrencia y aparición dentro de los procesos difiere de la recurrencia y aparición de los factores condicionantes usados para evaluar la susceptibilidad.

#### **5.5.2.2. Método Directo: Determinístico**

Los métodos determinísticos se utilizan para el estudio de la estabilidad de una ladera o talud concreto, se fundamentan en métodos basados en el equilibrio límite o en modelos numéricos teniendo, pues, una base física, lo que es de una gran ventaja respecto a otros métodos. Los datos de entrada son derivados de ensayos de laboratorio y se utilizan para determinar el factor de seguridad de la ladera. Estos métodos muestran un grado de fiabilidad alto en el caso en que los datos utilizados sean correctos. Su principal inconveniente es su baja idoneidad para zonificaciones rápidas y áreas extensas –

regionalización- (Van Westen, 1993). En general al introducir en el análisis el agua y el sismo (factores detonantes) se convierten en un método de evaluación de amenaza (Calderón, 2010).

## **5.6. Métodos Determinísticos**

Existe una amplia variedad de métodos determinísticos disponibles para realizar análisis de estabilidad, desde análisis de talud infinito en su caso más simple (EAFIT,2018) hasta modelos tridimensionales (Reid, 2015). El actual proyecto se centrará únicamente en implementar un modelo tridimensional. El análisis se puede llevar a término en distintas condiciones según Luzi et al. (1995): estáticas, considerando la estabilidad del deslizamiento sin introducir fuerzas dinámicas externas; pseudoestáticas, evaluando la entidad de la mínima fuerza dinámica externa que podría desencadenar el deslizamiento y condiciones dinámicas, en donde se introduce una fuerza dinámica externa comparable a un terremoto (Calderón, 2010).

### **5.6.1. Análisis de Estabilidad de Taludes: Métodos de Equilibrio Límite**

El análisis de estabilidad permite determinar si existe suficiente resistencia en los suelos del talud su base, para soportar los esfuerzos que pueden causar la falla por cortante y el deslizamiento (Mesa et al. 2013). La modelación matemática de los taludes tiene como objeto analizar las condiciones de estabilidad de los taludes naturales y la seguridad y funcionalidad del diseño de los taludes artificiales (Suarez, 2013).

Suarez (2013) menciona como metodologías disponibles para el análisis de estabilidad: los métodos numéricos, los métodos dinámicos y los métodos de equilibrio límite; siendo los últimos el enfoque de este proyecto, además, de ser los más adecuados para analizar escenarios de deslizamientos de suelo con mecanismo rotacional.

En este orden de ideas, el método del equilibrio límite consiste en estudiar el equilibrio de un cuerpo rígido, constituido por el talud y por la superficie de deslizamiento. De esta forma, se interpreta que la masa de terreno por encima de dicha superficie se desplaza respecto la masa inferior, produciéndose, así, la rotura del terreno (Catanzarati, 2019). En el momento de producirse la rotura, la resistencia al corte a lo largo de la superficie de deslizamiento está movilizada, y el terreno se encuentra, en su totalidad, en equilibrio estático (Catanzarati, 2019).

Por otro lado, los métodos de equilibrio límite permiten integrar al análisis de estabilidad modelaciones de hidrogeología y las sollicitaciones sísmicas.

#### **5.6.1.1. Factor de Seguridad: Ecuación Coulomb-Terzagui**

Fellenius (1922) presentó el factor de seguridad como la relación física entre la resistencia al corte real, calculada del material del talud y los esfuerzos de corte críticos que tratan de producir la falla, a lo largo de una superficie supuesta de falla como

$$FS = \frac{M_r}{M_d} \quad \text{Ecu.1}$$

Donde  $M_r$  es el momento resistente al cortante disponible y  $M_d$  es el momento de esfuerzo cortante actuante.

Duncan et al. (2014) expresan la relación física anteriormente mencionada en términos de la ecuación de Coulomb-Terzagui, donde el factor de seguridad se expresa en términos de la resistencia a la cortante del suelo como

$$FS = \frac{s}{\tau} \quad \text{Ecu.2}$$

Donde  $s$  la fuerza resistente al cortante y  $\tau$  la fuerza cortante de equilibrio, así, expresando la resistencia al cortante disponible en términos de esfuerzos efectivos en Ecu.2 se obtiene:

$$FS = \frac{c' + (\sigma' - u) \tan \varphi'}{\tau} \quad \text{Ecu. 3}$$

Ecu 3. Factor de seguridad expresado en términos de la ecuación de Coulomb-Terzaghi. Adaptado de (Duncan y Wright, 2014).

Donde  $c'$  es la cohesión del suelo,  $\sigma'$  es el esfuerzo normal en el plano de falla,  $u$  la presión de poros del agua,  $\varphi'$  es el ángulo de fricción del suelo y  $\tau$  es el esfuerzo cortante de equilibrio.

#### 5.6.1.2. Método de Dovelas “slides” (2D)

El método de Dovelas o “slides” es planteado por Duncan et al. (2014) como un procedimiento en el que la masa de suelo se divide en una serie de dovelas verticales y que asume una superficie circular de deslizamiento donde se consideran los momentos de equilibrio sobre el centro del círculo para el cuerpo de dividido en dovelas (Figura 12).

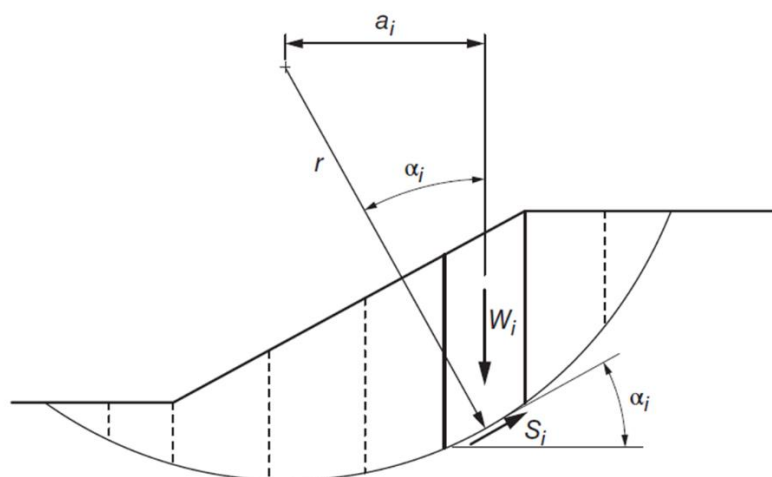


Figura 12. Superficie circular debajo de una masa de suelo dividida en dovelas o “slides”. Tomado de Duncan et al. (2014)

De acuerdo con la Figura 12, se tiene que para una masa de suelo dividida en dovelas es posible calcular el factor de seguridad, teniendo en cuenta que el momento cortante está definido como

$$M_d = \sum w_i a_i \quad \text{Ecu.4}$$

Donde  $w_i$  es el peso del suelo y  $a_i$  es la distancia horizontal entre el centro de la superficie circular y el centro de gravedad de la dovela (Figura). Así,  $a_i$  se define como brazo de momento expresado como

$$a_i = r \sin \alpha_i \quad \text{Ecu. 5}$$

Reemplazando en Ecu. 4 se tiene

$$M_d = \sum w_i r \sin \alpha_i \quad \text{Ecu 6.}$$

Por otro lado, el momento resistente al cortante esta dado en términos de la fuerza cortante como

$$M_s = r \sum S_i \quad \text{Ecu.7}$$

Donde  $r$  es el radio de la superficie circular y  $S_i$  es la fuerza de corte en la base de cada dovela (Figura 11). Además, se tiene que la fuerza de corte es el producto del esfuerzo cortante  $\tau_i$  y el área de la base de cada dovela  $\Delta l_i$  (Duncan et al., 2014). Así, Ecu 5 se puede expresar como

$$M_s = r \sum \tau_i \Delta l_i \quad \text{Ecu. 8}$$

De Ecu 2 se tiene

$$\tau_i = \frac{S_i}{FS} \quad \text{Ecu. 9}$$

Así, reemplazando Ecu. 9 en Ecu. 8 se tiene

$$M_S = r \sum \frac{S_i}{FS} \Delta l_i \quad \text{Ecu.10}$$

Para que haya equilibrio se debe cumplir que  $M_d = M_S$ , por consiguiente

$$r \sum \frac{S_i}{FS} \Delta l_i = \sum w_i r \sin \alpha_i \quad \text{Ecu. 11}$$

Simplificando Ecu 11 Duncan et al. (2014) obtienen que el Factor de seguridad es:

$$FS = \frac{\sum S_i \Delta l_i}{\sum w_i \sin \alpha_i} \quad \text{Ecu. 12}$$

Reemplazando  $S = c' + (\sigma' - u) \tan \varphi'$  de Ecu. 3 en Ecu. 12 se tiene que

$$FS = \frac{\sum c' + (\sigma' - u) \tan \varphi' \Delta l_i}{\sum w_i \sin \alpha_i} \quad \text{Ecu. 13}$$

Así Ecu. 13 representa la ecuación de equilibrio estático para momentos en el centro de una superficie circular de deslizamiento, suprayacida por una masa de suelo dividida en dovelas (Duncan et al., 2014).

### 5.6.1.3. Método de Bishop simplificado

En el método de Bishop las fuerzas entre las dovelas se asumen como horizontales asumiendo que no hay fuerzas cortantes entre ellas (Bishop, 1955). Duncan et al. (2014) plantean que las fuerzas se asumen en dirección vertical para satisfacer el equilibrio en esta dirección y así obtener una expresión para los esfuerzos normales en la base de cada dovela (Figura 13).

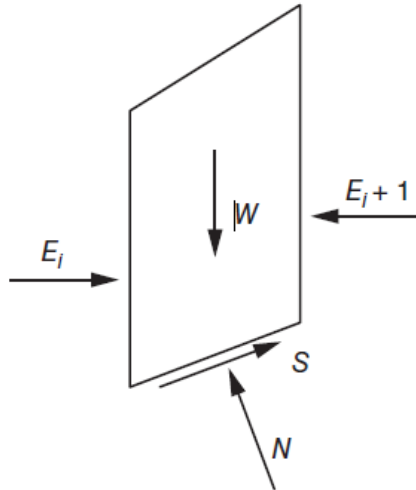


Figura 13. Diagrama de fuerzas para una dovela para el método de Bishop. Tomado de (Duncan et al. 2014)

Para el método de Bishop se tiene una ecuación del factor de seguridad que satisface el equilibrio de momentos en el centro de un círculo para esfuerzos efectivos teniendo en cuenta que el movimiento de la masa sigue una trayectoria circular (Duncan et al. 2014):

$$FS = \frac{\sum \left[ \frac{c' \Delta l \cos \alpha + (W - u \Delta l \cos \alpha) \tan \phi}{\cos \alpha + (\sin \alpha \tan \phi) / F} \right]}{\sum W \sin \alpha} \quad \text{Ecu. 14 adaptado de (Duncan et al. 2014)}$$

#### 5.6.1.4. Método de aproximación de columnas

El método de aproximación de columnas es una extensión en 3D del método de dovelas (Figura 14), donde la masa en equilibrio dividida en dovelas se divide en columnas verticales (Huang, 2014).

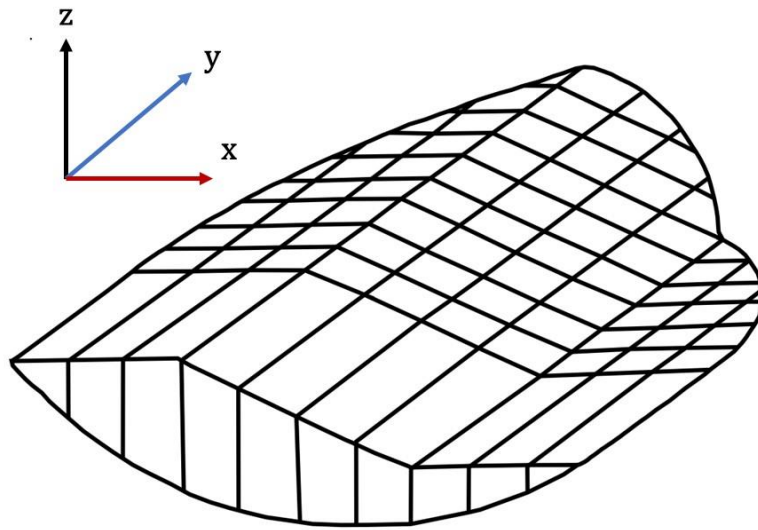


Figura 14. Extensión a 3D de la superficie de deslizamiento circular y la masa en equilibrio dividida en dovelas. Modificado de (Huang, 2014).

Huang (2014) considera las componentes de fuerzas actuantes en la columna en el plano xy (Figura 15) siendo análogo al procedimiento 2D (Figura 12) donde las fuerzas se asumen en la base de la dovela.

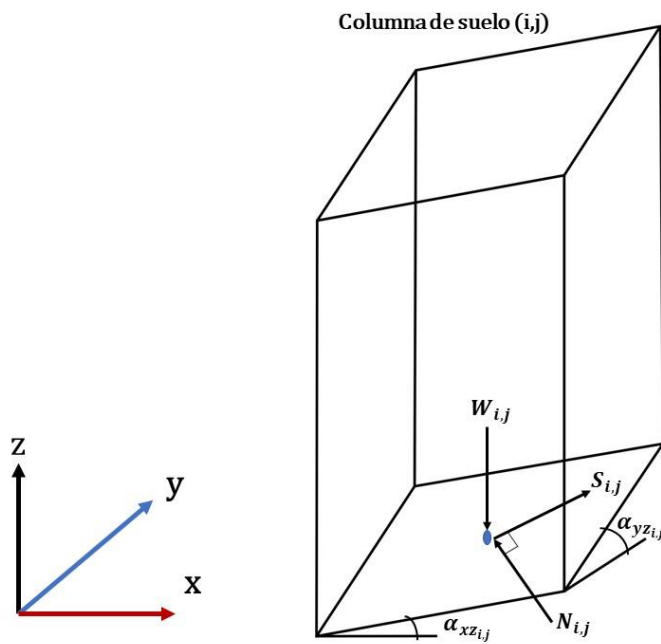


Figura 15. Vista tridimensional de las fuerzas actuantes en la base de la columna de suelo (i,j). Modificado de (Huang, 2002)

### 5.6.1.5. Extensión 3D de Método de Bishop simplificado

En este orden de ideas, Hungr (1987) plantea una extensión en 3D de las asunciones de Bishop (1955) donde se plantea un modelo físico análogo que busca estimar un factor de seguridad significativamente mayor y menos conservativo que el del método ordinario en 2D, así, el método ignora las fuerzas cortantes en la vertical, pero no las fuerzas normales y horizontales cortantes entre las columnas.

Para el planeamiento del modelo Hungr (1987) toma las dos asunciones de Bishop (1955):

- Las fuerzas cortantes verticales que actúan en el lado longitudinal y lateral de cada columna pueden ser ignoradas en las ecuaciones de equilibrio.
- La ecuación de equilibrio de fuerza vertical de cada columna y la ecuación de sumatoria de momentos del ensamble de columnas completo son suficientes para determinar todas las fuerzas no conocidas.

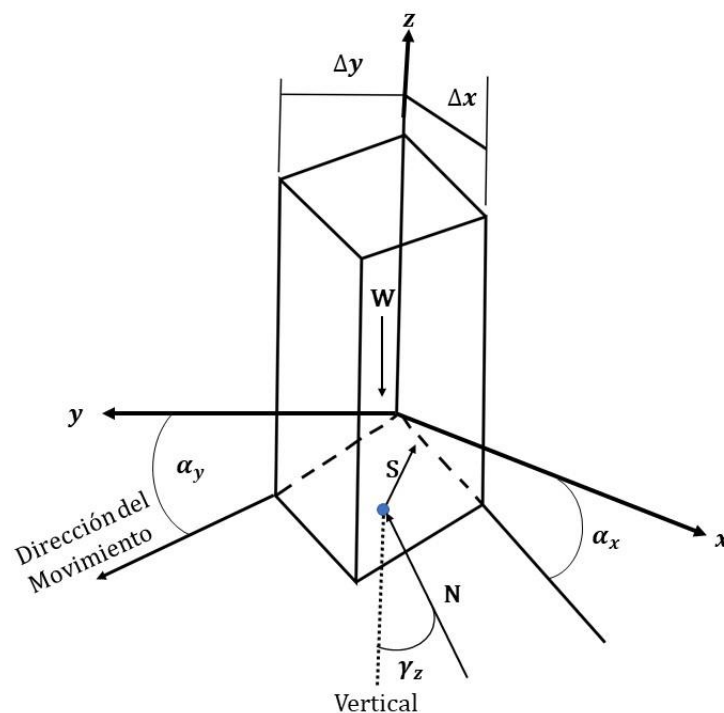


Figura 16. Fuerzas actuantes en una sola columna; la fuerza de presión de poros no se muestra, pero actuaría en la línea de la fuerza normal N. Modificado de (Hungr, 1987).

Con referencia a la (Figura 16) Hungr (1987) propone que la fuerza normal total  $N$  actuante en la base de una columna puede ser obtenida de la ecuación de equilibrio de fuerza vertical:

$$W = N_X + S_Z = N \cos \gamma_Z + \left[ \frac{(N-uA) \tan \varphi}{F} + \frac{cA}{F} \right] \sin \alpha_y \quad \text{Ecu. 15}$$

Donde,  $W$  es el peso total de la columna,  $u$  es la presión de poros actuando en el centro de la base de la columna,  $A$  es el área de la base de la columna,  $c$  es la cohesión,  $\varphi$  es el ángulo de fricción y  $F$  es el factor de seguridad. De esto se tiene que:

$$N = \frac{W - cA \sin \frac{\alpha_y}{F} + uA \tan \varphi \sin \frac{\alpha_y}{F}}{m_\alpha} \quad \text{Ecu. 16}$$

$$\text{Donde, } m_\alpha = \cos \gamma_Z \left( 1 + \frac{\sin \alpha_y \tan \varphi}{F \cos \gamma_Z} \right) \quad \text{Ecu. 17}$$

El área de la base de la columna,  $A$  (Ecu. 15), ha sido obtenida por Hovland (1977) como:

$$A = \Delta x \Delta y \frac{(1 - \sin^2 \alpha_x \sin^2 \alpha_y)^{\frac{1}{2}}}{\cos \alpha_x \cos \alpha_y} \quad \text{Ecu. 18}$$

El ángulo  $\gamma_Z$  (Ecu. 15) entre la dirección de la fuerza normal  $N$  y el eje vertical es obtenido por Hungr (1987) haciendo uso de las consideraciones geométricas (Figura 15) tal que:

$$\cos \gamma_Z = \left( \frac{1}{\tan^2 \alpha_y + \tan^2 \alpha_x + 1} \right)^{1/2} \quad \text{Ecu. 19}$$

Consecuentemente Hungr (1987) establece que el área plana del cuerpo deslizante es dividida en una serie de columnas ordenadas en filas de un ancho uniforme (Figura 17) con sus bases sobre una superficie rotacional asociada a un único eje de rotación (Figura 18).

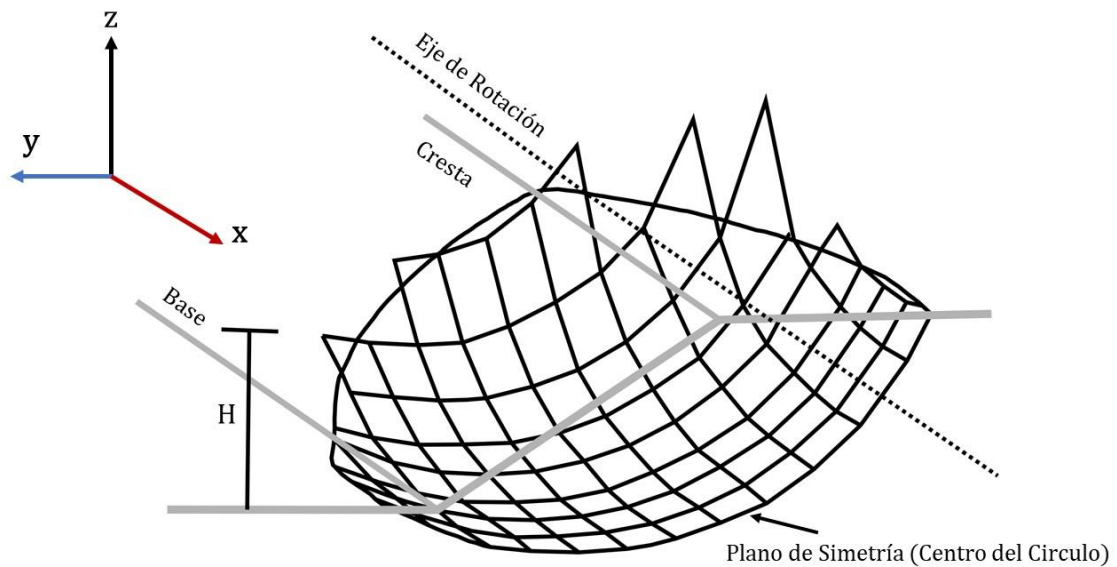


Figura 17. Isometría de un cuerpo rotacional deslizante, simétrico con respecto al plano vertical central y dividida en una serie de columnas (solo se muestra la base de las columnas activas). Modificado de (Hungr, 1987).

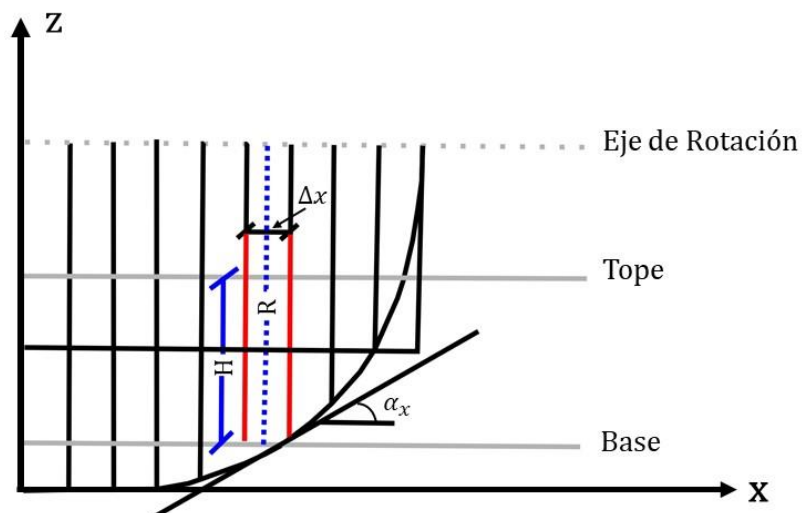


Figura 18. Corte vertical del cuerpo deslizante en el plano del eje de rotación. Modificado de (Hungr, 1987)

Así una ecuación de equilibrio de momento para el ensamblaje de  $j$  columnas puede escribirse de la siguiente manera, asumiendo que todas las fuerzas se cancelan con sus reacciones (Hungry, 1987):

$$\sum_{i=1}^j (N - uA) \frac{\tan\phi}{F} + \frac{cA}{F} = \sum_{i=1}^j W \sin\alpha_y \quad \text{Ecu. 20 Adaptado de (Hungry, 1987)}$$

Reemplazando Ecu. (16) en Ecu. (20), se tiene:

$$FS = \frac{\sum_{i=1}^j \left[ \frac{(W - uA \cos\gamma_z) \tan\phi + cA \cos\gamma_z}{m\alpha} \right]}{\left( \sum_{i=1}^j W \sin\alpha_y \right)}$$

Ecu. 21. Ecuación del factor de seguridad para la extensión en 3D del método de Bishop (1955). Adaptado de (Hungry, 1987).

## 6. Marco metodológico: Aplicación modelo Scoops3D

Para la aplicación del modelo físico distribuido Scoops3D se desarrollarán ciertas actividades que van a permitir el cálculo del factor de seguridad y la posterior zonificación de la susceptibilidad en el caso de estudio: San José la Cima.

### 6.1. Estado del conocimiento de la zona de estudio

El estado del conocimiento se da en el marco del convenio de la Universidad EAFIT y la Empresa de Desarrollo Urbano (EDU) (Contrato inter administrativo CT- 2017-000677) del programa “Unidos por el Agua” de donde son provistos todos los datos que permiten reconocer los principales procesos de la zona de estudio e identificar la metodología pertinente para evaluar estabilidad.

#### 6.1.1. Perforaciones

Los datos de las perforaciones que se realizaron en diferentes puntos del polígono se obtienen del proyecto realizado por (EAFIT, 2018) dichas perforaciones alcanzan profundidades entre 14 y 20 metros (Figura 19), donde se recuperan muestras alteradas e inalteradas, el resumen de la estratigrafía de las perforaciones se presentan en el Anexo 1. En la tabla 4 se presentan las generalidades de las perforaciones:

**Tabla 4. Perforaciones San José la Cima. Adaptado de EAFIT (2018)**

Sondeo	Coordenada Norte	Coordenada Este	Profundidad (metros)	Altura (m.s.n.m)
P-1	837918	1186136	15	1948.03
P-2	837886	1186576	20	1949.69
P-3	837891	1186324	15	1933.50
P-4	837783	1186797	15	1828.04
P-5	837810	1186749	14.7	1856.17
P-6	837711	1186567	14	1814.52
P-7	837616	1186280	14	1785.09
P-8	837594	1186007	15	1762.53



Figura 19. Mapa de localización de perforaciones polígono San José la Cima. Realización propia (ESRI, 2019).

### 6.1.2. Análisis de estabilidad 2D

El análisis de estabilidad 2D es realizado en (EAFIT, 2018) donde se consideran dos escenarios: condiciones secas donde no hay nivel freático y saturado por debajo de una superficie piezométrica de 10 metros. El cálculo del factor de seguridad 2D se fundamenta en la teoría de equilibrio límite, haciendo uso del método de Bishop simplificado (Ecu 14) y su unidad de análisis son 4 secciones topográficas (Figura 11). Para cada sección topográfica se calcula el factor de seguridad estático donde se obtienen valores mínimos para cada escenario (Tabla 6).

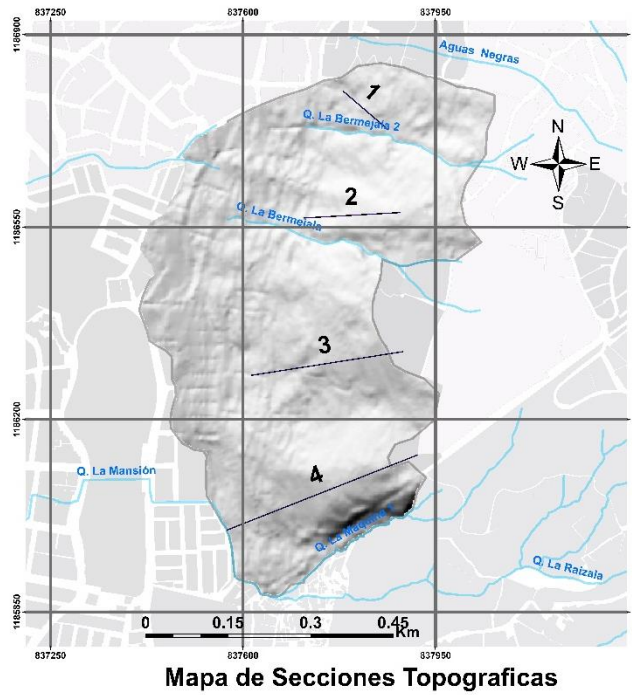


Figura 20. Mapa de localización de secciones topográficas.

**Tabla 6. Factores de seguridad 2D del polígono San José la Cima. Tomado de (EAFIT, 2018)**

Sección (Actual)	FS-2D	Sección (Saturado)	FS-2D
Perfil 1	1.42	Perfil 1	1.35
Perfil 2	1.17	Perfil 2	1.17
Perfil 3	1.23	Perfil 3	1.2
Perfil 4	1.37	Perfil 4	1.39

## **6.2 Modelo Geológico-Geotécnico**

A partir de la información disponible de la zona de estudio se realizó una caracterización de las principales unidades geotécnicas independientes y su variación espacial por medio de datos de exploración, perforaciones y ensayos de laboratorio.

### **6.2.2. Unidades Geológicas para Ingeniería y Parámetros Geomecánicos**

Con base en la caracterización geológica, los resultados del programa de exploración y los resultados de los diferentes ensayos de laboratorio practicados a las muestras recolectadas por (EAFIT, 2018), se describe un perfil (Figura 21) que contiene las unidades geológicas para ingeniería identificadas para el polígono de San José la Cima (Figura 4) sobre las que se realizará el análisis de estabilidad de la zona , además de asignarle los parámetros geomecánicos a cada una de ellas en la (Tabla 5).

Los parámetros geomecánicos son obtenidos por (EAFIT, 2018) a partir de información recopilada de los sondeos exploratorios y de los análisis de los resultados de los ensayos de corte directo practicados a las muestras extraídas en cada uno de ellos, teniendo en cuenta también el comportamiento del suelo a partir del ensayo SPT realizado en campo y los valores de referencias bibliográficas de reconocidos autores.

Se realizan correlaciones entre el valor de N, obtenido del ensayo SPT, y los parámetros de cohesión y ángulo de fricción. Los valores obtenidos a través de las correlaciones son analizados por el personal técnico de acuerdo con su experiencia y conocimientos sobre la zona de objeto de estudio. El procedimiento para obtener los valores finales de cohesión y fricción consiste en la obtención de un valor promedio, mínimo y máximo de dichos valores para cada una de las correlaciones utilizadas, descartando aquellas consideradas no representativas. Posteriormente, a criterio del geotecnista se selecciona ya sean los valores mínimos, máximos o promedios que se constituirán como la muestra

estadística final para obtener la media, la desviación estándar, el mínimo y el máximo de los parámetros geomecánicos para así obtener los valores de la Tabla 5.

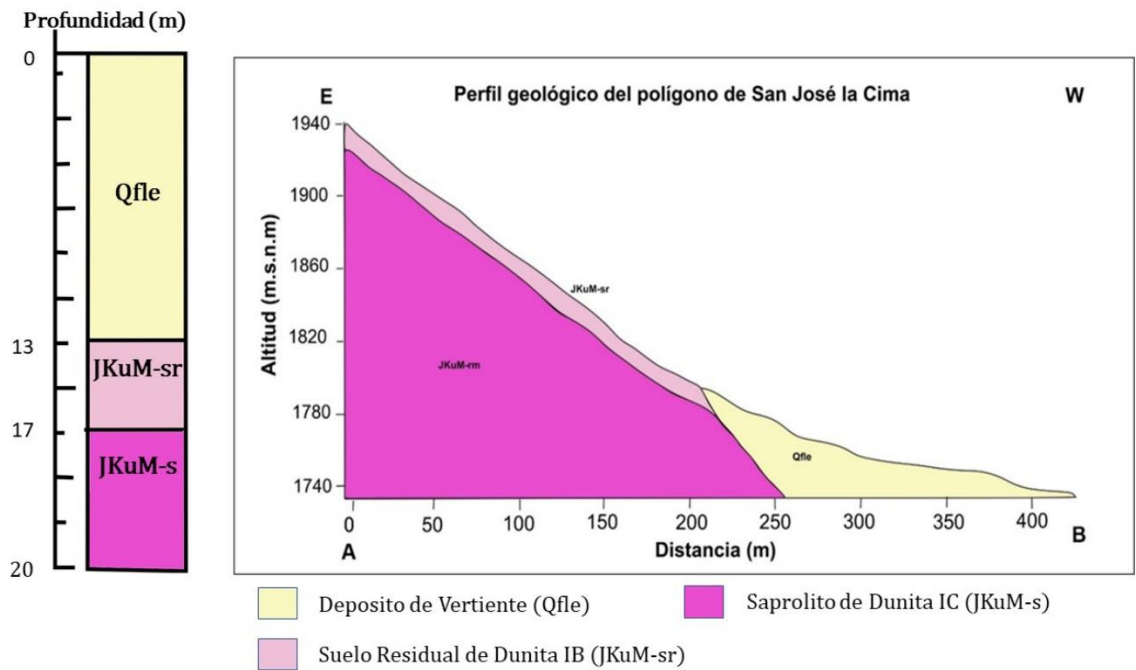
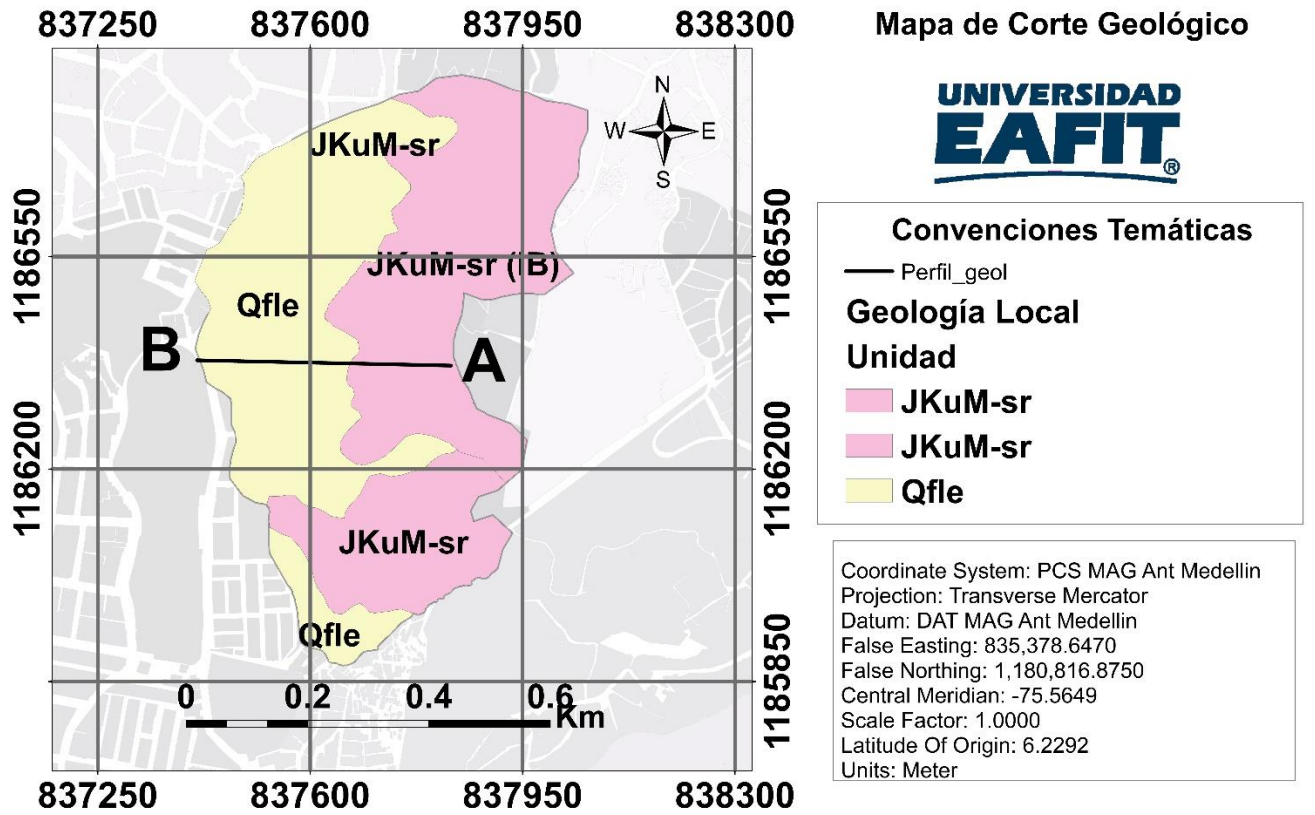


Figura 21. Perfil geológico generalizado del polígono de San José la Cima. Modificado de EAFIT (2018).

**Tabla 5. Parámetros Geomecánicos de las unidades geológica para ingeniería en San José la Cima. Adaptado de (EAFIT, 2018)**

Capa de suelo	Símbolo	$[\gamma_{húmedo}]$ ( $kNm^3$ )	$[\gamma_{sat}]$ ( $kNm^3$ )	w(%)	$c'$ (kPa)	$\varphi$ (°)	Profundidad de la muestra(m)	Ensayo
Depósito de Vertiente	Qfle	16.67	17.34	39.53	24.1	32	2.45	Corte Directo
Suelo Residual de Dunita (IB)	JKuM-sr	14.42	15.43	96.37	19.6	26	2	Corte Directo
Saprolito de Dunita (IC)	JKuM-s	15.69	15.76	65.9	52.6	30	6	Corte Directo

$\gamma_{húmedo}$  Peso unitario húmedo,  $\gamma_{sat}$  Peso unitario saturado, w Humedad,  $c'$  Cohesión,  $\varphi$  Ángulo de fricción.

### 6.3. Análisis de estabilidad tridimensional con Scoops 3D

Scoops3D es un programa, desarrollado por el Servicio Geológico de los EE. UU. (USGS), para analizar estabilidad de talud a través de una superficie de terreno digital, la cual está representada por un modelo de elevación digital o DEM (Reid et al. 2015). Scoops3D computa la estabilidad de una masa rígida interceptada por superficies esféricas de prueba (potenciales superficies de deslizamiento) (Figura 22) y evalúa la estabilidad por medio de la extensión a 3D del método convencional de equilibrio límite (Zhang y Wang, 2019).

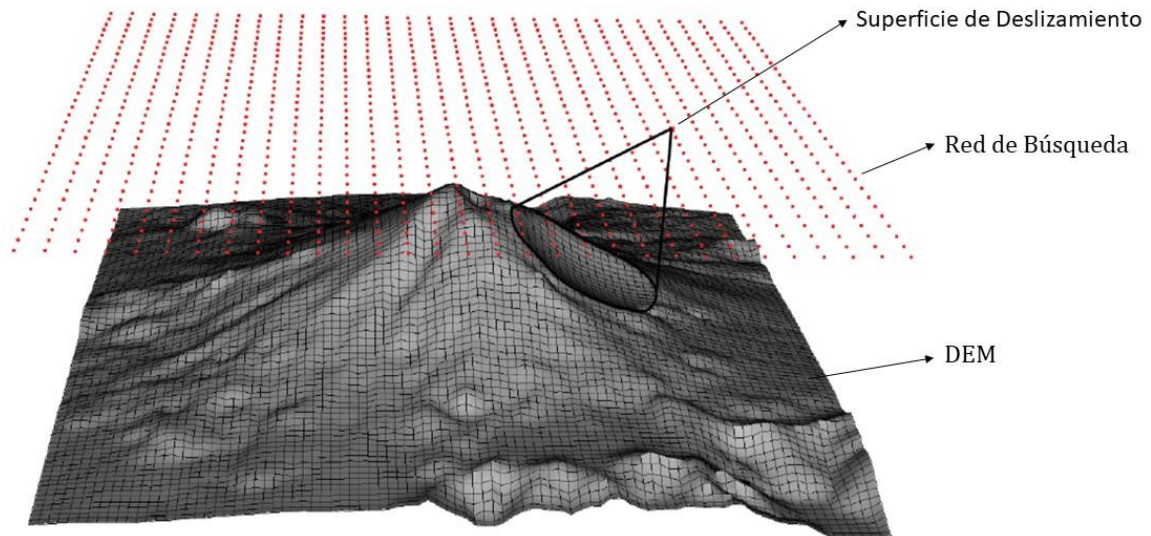


Figura 22. Perspectiva del DEM con una superficie de deslizamiento con masa removida.  
Modificado de (Reid et al., 2015)

Scoops3D, usa el método 3D de “columnas” el cual es una extensión en 3D del método convencional de dovelas para calcular el factor de seguridad, y satisface los requerimientos de momento de equilibrio de fuerzas sobre un eje principal de rotación (Chakraborty y Goswami, 2016). Dentro de los métodos de “columnas” para análisis de estabilidad, Scoops3D utiliza la extensión en 3D del método de Bishop simplificado (Ecu.21) (Hung, 1987); método que provee un factor de seguridad que se acerca a los métodos de equilibrio límite más rigurosos (Spencer 1967; Hung 1987; Lam y Fredlund 1993; Reid et al. 2015; Tran et al. 2018; Zhang y Wang, 2019) y adopta las mismas asunciones mecánicas de Bishop (1955).

Por otro lado, en el contexto global, Scoops3D ha sido usado para la evaluación de estabilidad de edificios volcánicos (Reid et al. 2010; estudios hidrológicos (Brien y Reid, 2007; 2008), depósitos de flujos piroclásticos (Zhang y Wang, 2019) e implementado de manera regional por The Viet et al. (2018). De esta manera, a diferencia de los trabajos

anteriormente mencionados el actual proyecto evaluara la estabilidad en una latitud tropical, suelo urbano y a escala de detalle 1:2000.

A continuación, en la (Figura 23) modificada de (Zhang y Wang,2019) se observa la vista en 3D de una columna interceptada por una superficie de deslizamiento potencial y el DEM, así como las fuerzas actuantes sobre esta.

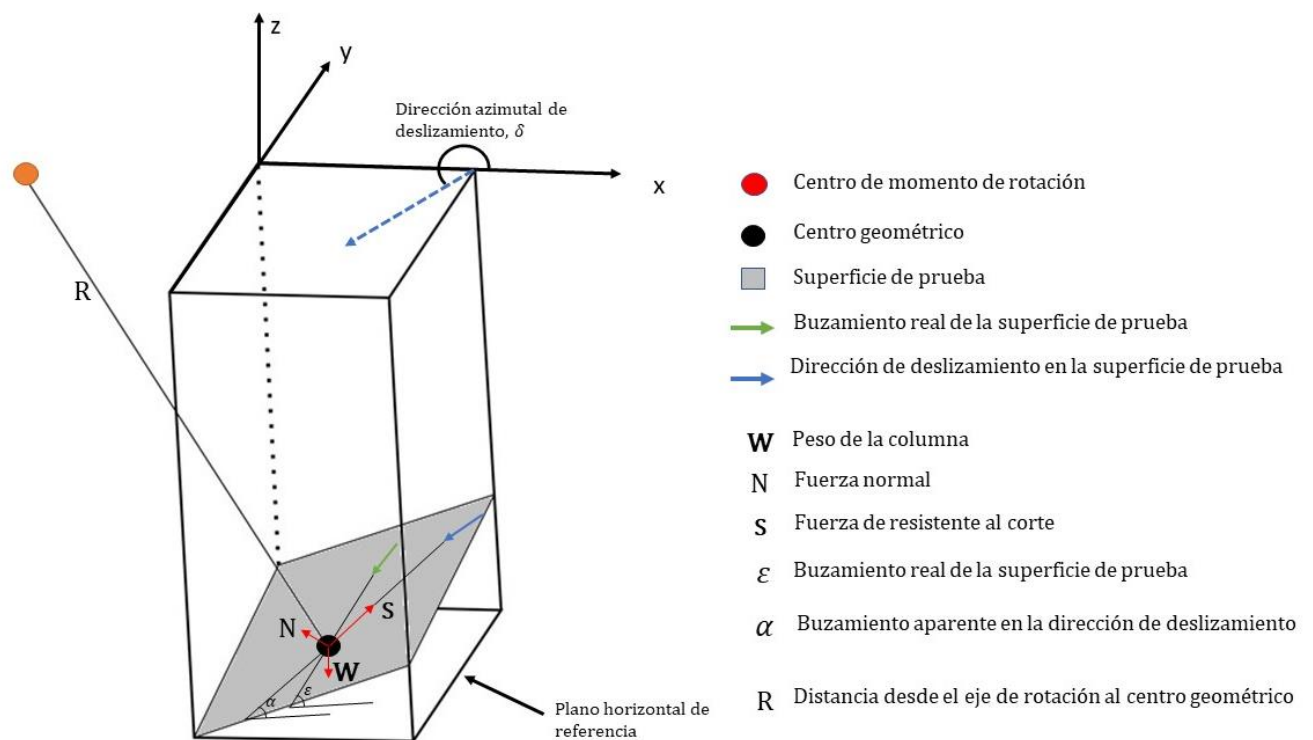


Figura 23. Diagrama esquemático de fuerzas actuantes en una columna modificado de (Shang y Wang, 2019).

Para el cálculo del factor de seguridad Reid et al. (2015) plantean dos modelos a partir de la (Figura 23), uno para condiciones secas donde no hay nivel freático y saturado por debajo de una superficie piezométrica de 10 metros, los cuales son adaptados a partir del modelo de extensión 3D del método de Bishop simplificado propuesto por (Hung, 1987) (Ecu 21.); Así para el **caso estático (ausencia de nivel freático)** se tiene que:

$$F = \frac{\sum R_{i,j} [c_{i,j} A_{h_{i,j}} + W_{i,j} \tan \varphi_{i,j}] / m_{\alpha_{i,j}}}{\sum W_{i,j} [R_{i,j} \sin \alpha_{i,j}]} \quad \text{Ecu. 22.}$$

Ecuación para el cálculo del factor de seguridad caso estático. Adaptado de (Reid et a. 2015)

Donde  $R_{i,j}$  es la distancia del eje de rotación al centro geométrico de la superficie de la columna (i,j),  $W_{i,j}$  el peso de la columna,  $A_{h_{i,j}} = (A_{i,j} \cos \varepsilon_{i,j})$  es el área proyectada de la superficie de prueba en la horizontal,  $\varphi_{i,j}$  ángulo de fricción,  $c_{i,j}$  cohesión,  $\alpha_{i,j}$  buzamiento aparente de la base de la columna y  $m_{\alpha_{i,j}}$  se adapta por Reid et al. (2015) de Ecu. 17 como  $m_{\alpha} = \cos \varepsilon_{i,j} + \frac{\sin \alpha_{i,j} \tan \varphi_{i,j}}{F}$  donde,  $\varepsilon_{i,j}$  es el ángulo de buzamiento real de la superficie de prueba.

Para el **caso saturado** Scoops3D usa una matriz que contiene las elevaciones de la superficie piezométrica para determinar la presión de poros actuante sobre la superficie de prueba en la base de la columna (Reid et al., 2015). Así, se tiene que:

$$F = \frac{\sum R_{i,j} [c_{i,j} A_{h_{i,j}} + (W_{i,j} - z_{pz_{i,j}} \gamma_w A_{h_{i,j}}) \tan \varphi_{i,j}] / m_{\alpha_{i,j}}}{\sum W_{i,j} [R_{i,j} \sin \alpha_{i,j}]} \quad \text{Ecu. 23.}$$

Ecuación para el cálculo del factor de seguridad caso saturado a partir de una superficie piezométrica z. Adaptado de (Reid et al., 2015).

Donde, la presión de poros  $u = z_{pz_{i,j}} \gamma_w$ ,  $z_{pz_{i,j}}$  es la profundidad vertical debajo de la superficie piezométrica y puede variar en cada columna, y  $\gamma_w$  el peso unitario. En este caso se representa el flujo horizontal subterráneo de agua debajo de una capa freática de 10 metros.

#### 6.4. Parámetros de entrada y Dominio 3D

Según Zhang y Wang (2019) el proceso de evaluación de estabilidad de talud en Scoops3D consiste en tres partes: Construcción de un dominio 3D, la entrada de los parámetros subsuperficiales y la definición de una configuración de búsqueda.

Scoops3D computa la estabilidad del talud para todas las partes de un dominio 3D que subyace un modelo de elevación digital o DEM; así, Scoops3D determina la mínima estabilidad o factor de seguridad asociado con cada celda del DEM en la superficie digital.

En este trabajo, se utiliza un Esri ASCII raster DEM (2x2) para representar la superficie del suelo, donde, el DEM define la extensión horizontal del dominio 3D, y cada celda define las dimensiones horizontales de las columnas en 3D usadas en la computación de la estabilidad del talud (Reid et al. 2015). Además, se usa una configuración capa-capa para representar las unidades de suelo.

La profundidad de la base de cada capa se define basado en las perforaciones (Figura 18) realizadas por (EAFIT, 2018) y haciendo uso del raster calculator en el SIG software ArcGis, Esri, se construyen los datos ASCII raster de capa requeridos por Scoops3D que definen la estratigrafía del subsuelo en la zona de estudio (Tabla 7).

**Tabla 7. Profundidades de la base de cada capa para en la zona de estudio. Tomado de (EAFIT, 2018)**

Unidad	Profundidad (m)
Depósito de Vertiente (Qfle)	13
Suelo Residual de Dunita (JKuM-sr)	17
Saprolito de Dunita (JKuM-s)	20

Para la tercera unidad Saprolito de Dunita (JKuM-s) no es necesario crear la capa ya que Scoops3D computa su profundidad a partir de la penúltima unidad, en este caso Suelo Residual de Dunita (JKuM-sr).

Las propiedades de las capas en el subsuelo debajo del DEM requeridas por Scoops3D para computar el factor de seguridad de la superficie de prueba son los parámetros geomecánicos que se le asignan a cada celda de los respectivos ASCII raster de las capas Tabla 5.

Otra consideración durante la construcción del dominio 3D es la profundidad de la superficie piezométrica la cual se utilizará para evaluar la estabilidad en el escenario saturado. Sin embargo, debido a la carencia de información hidrogeológica en la zona de estudio y de que en ninguna perforación (EAFIT,2018) fue encontrado nivel freático; con el fin de no subestimar o sobreestimar el evento físico de inundación, se adopta una superficie piezométrica  $z=10\text{m}$  la cual se construye a partir del DEM y la herramienta de ArcGIS (ESRI), raster calculator, donde se crea un ASCII ráster en el que cada celda representa la profundidad de la superficie piezométrica.

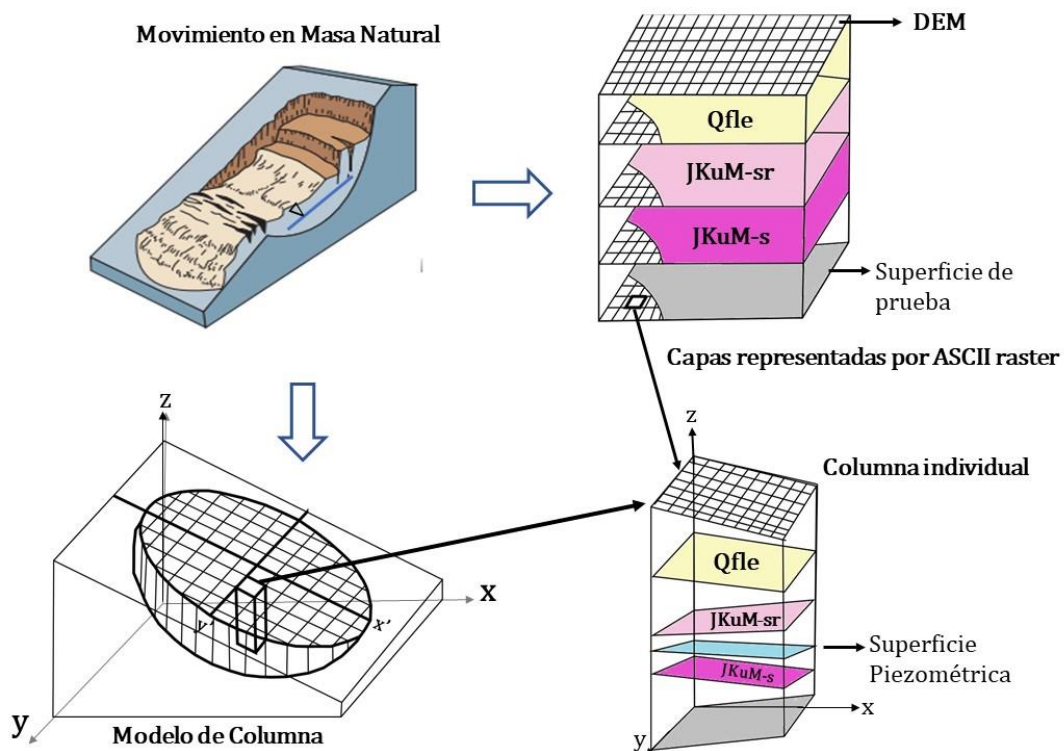


Figura 24. Esquema de la representación de datos de entrada para el modelado en Scoops3D

En este orden de ideas, la búsqueda que realiza el dominio 3D consiste en determinar la estabilidad a través del DEM en una amplia variedad de superficies de prueba a diferentes profundidades, donde cada superficie de prueba hace parte de una esfera definida por un punto rotacional localizado y un radio dado, así usando un arreglo ortogonal 3D de centros rotacionales o red de búsqueda (Figura 25), Scoops3D puede crear y analizar

múltiples superficies esféricas con centro rotacional en cada nodo de la red de búsqueda, con algunas de ellas afectando el DEM, así, durante la búsqueda Scoops3D rastrea el factor de seguridad mínimo para cada celda del DEM y la superficie con el factor de seguridad mínimo es definida como superficie crítica (Reid et al. 2015).

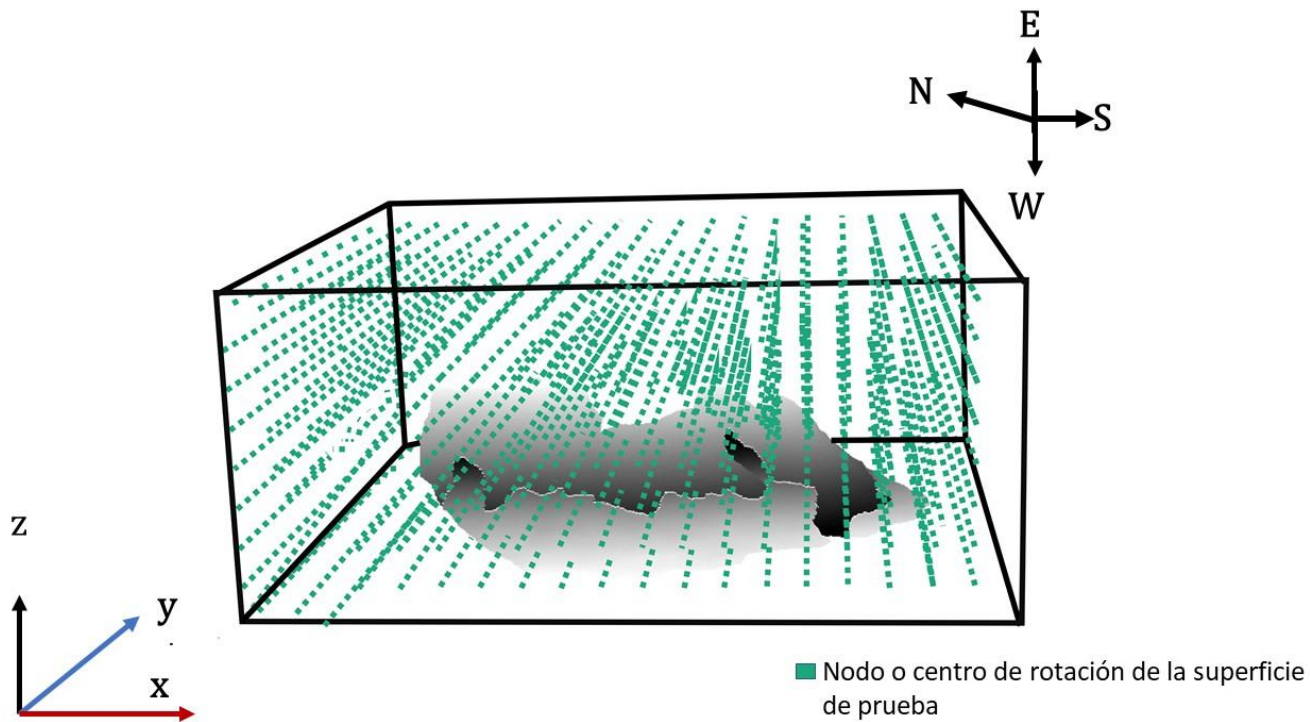


Figura 25. Diagrama que muestra la red de búsqueda sobre el DEM de San José la Cima. Cada punto verde representa el centro de las múltiples superficies esféricas de prueba. Modifica de (Reid et al. 2015)

Luego, para desarrollar una búsqueda adecuada se deben definir la extensión vertical, extensión horizontal, multiplicador horizontal, la resolución vertical (espaciamiento de los nodos de búsqueda), radio de la superficie de deslizamiento y un área mínima y máxima de los procesos a evaluar, los cuales deben de estar en las mismas unidades del DEM (2x2m) (Tabla 8).

**Tabla 8. Parámetros de entrada para la red de búsqueda**

Parámetro de Búsqueda	Valor (m)
Extensión Vertical	320
Resolución Vertical (Espaciamiento de los nodos de búsqueda)	2
Extensión Horizontal	161
Multiplicador Horizontal	2
Radio	2

Dentro del dominio de búsqueda se generan infinitas superficies de prueba en el DEM; por lo tanto, Scoops3D utiliza límites de área de superficie horizontal (planimétrica) mínimos y máximos con el fin de restringir el tamaño de las superficies potenciales de falla, valores dados en las unidades del DEM. Así, solo se consideran validos los valores de área de potenciales superficies de falla que estén dentro del rango definido para el análisis de estabilidad.

Para estimar el área mínima y máxima de los procesos a evaluar se tienen en cuenta los procesos cartografiados por (EAFIT, 2018), donde fueron cartografiados 33 procesos (Figura 25) y cicatrices de movimientos de naturaleza rotacional y superficial; así, se tiene un área mínima de  $14,68 \text{ m}^2$  y máxima de  $3452,71 \text{ m}^2$  dentro del polígono de San José la Cima.

De manera que, para la evaluación de estabilidad se consideraran 3 casos (Tabla 9) en los que el área máxima varía desde un valor aproximado a los procesos cartografiados (Figura 26) a valores mayores que permiten evaluar eventos físicos más desastrosos.

**Tabla 9. Valores mínimos y máximos de área para análisis de estabilidad.**

Caso	$A_{\min} \text{m}^2$	$A_{\max} \text{m}^2$
1	5	5000
2	5	10000
3	5	25000

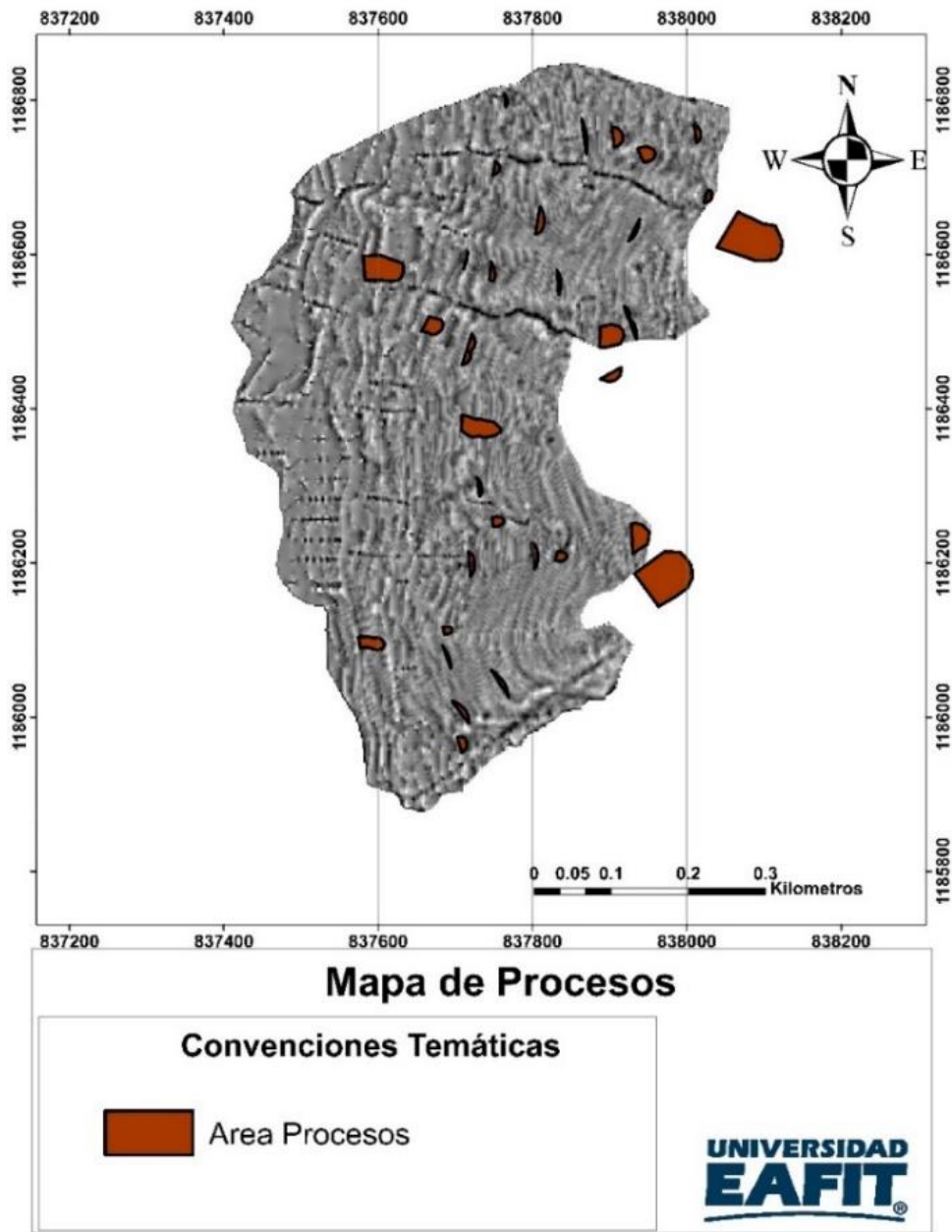


Figura 26. Mapa de procesos en el polígono de San José la Cima.

## 7. Resultados

A continuación, se describen los resultados obtenidos durante el análisis de estabilidad en 3D por medio del modelo físico distribuido Scoops3D.

### 7.1. Mapas de Factor de Seguridad

Los mapas de factor de seguridad 3D calculados por Scoops3D para el polígono de San José la Cima se clasifican de acuerdo con (SGC, 2015) (Tabla 10) y su distribución espacial bajo condiciones secas donde no hay nivel freático y condiciones saturadas por debajo de una superficie piezométrica de 10 metros, además de la variación de los resultados conforme se consideran diferentes casos donde varían las áreas máximas de procesos (Tabla 9 ).

**Tabla 10. Clasificación de estabilidad según (SGC,2015).**

Factor de Seguridad	Clasificación de Estabilidad
$FS \leq 1,1$	Inestable
$1.1 < FS \leq 1,5$	Estabilidad Media
$FS > 1.5$	Estable

En el **caso 1** (Figura 27) se tiene un área máxima de  $5000 \text{ m}^2$ , valor cercano al cartografiado por (EAFIT, 2018) en Figura, donde se visualiza la distribución espacial del factor de seguridad en el (a) escenario seco sin nivel freático y en el (b) escenario saturado con una superficie piezométrica  $z=10\text{m}$ .

Para el escenario seco sin nivel freático (Figura 27 (A)) se tiene un FS mínimo de 1.01 que representa inestabilidad en un 1.2% de la zona de estudio, para valores de FS entre 1.01- 1.1 se tiene un 12.95% de la zona de estudio en condición de inestabilidad, el 47.3% de la zona de estudio esta en condición de estabilidad media con un FS entre 1.1-1.5 y el valor máximo de 16 en el 38.6% de la zona de estudio evidencia una condición estable.

Para el escenario saturado por debajo de una superficie piezométrica de 10 metros (Figura 27 (B)) se tiene un FS mínimo de 0.93 que representa condiciones inestables en un 1.29% de la zona de estudio, para valores de FS entre 0.93- 1.1 se tiene un 29.98% de la zona de estudio en condiciones inestables, el 32.1% de la zona de estudio está en condición de estabilidad media con un FS entre 1.1-1.5, para valores de FS >1.5 se presenta una condición estable en el 36.63% de la zona de estudio.

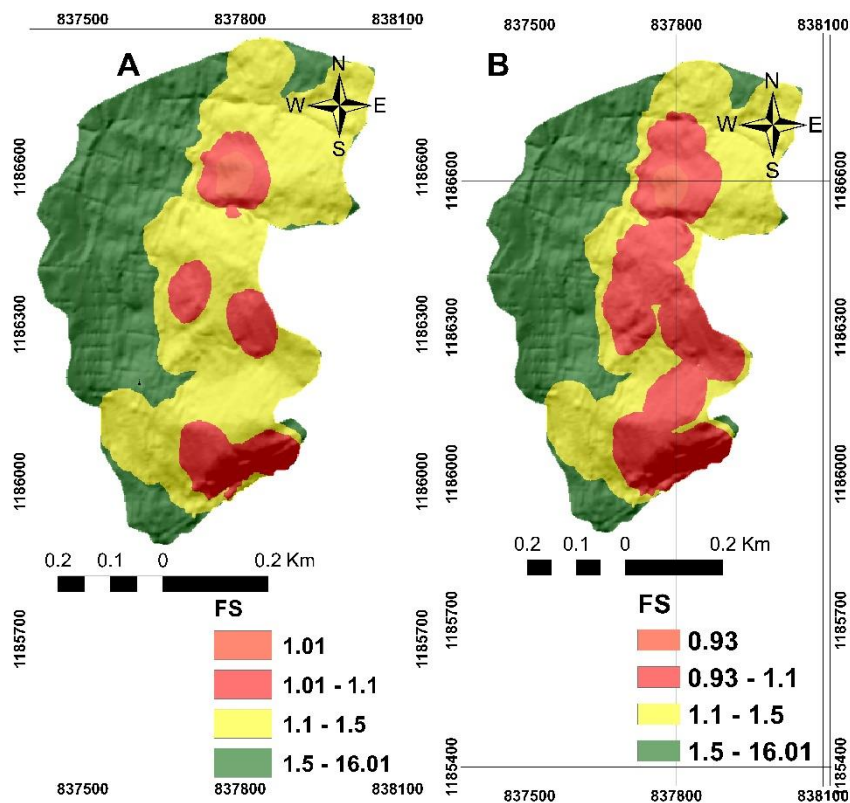


Figura 27. Mapa factor de seguridad 3D para el polígono de San José la Cima caso 1. A. Escenario seco sin nivel freático. B. Escenario saturado z=10m.

En el **caso 2** (Figura 28) se tiene un área máxima de  $10.000 m^2$ , donde se visualiza la distribución espacial del factor de seguridad en el (a) escenario seco sin nivel freático y en el (b) escenario saturado con una superficie piezométrica z=10m.

Para el escenario seco sin nivel freático (Figura 28 (A)) se tiene un FS mínimo de 0.98 que representa condiciones inestables en un 2.17% de la zona de estudio, para valores de

FS entre 0.98- 1.1 se tiene un 24.9% de la zona de estudio en condiciones inestables, el 42.03% de la zona de estudio está en condición de estabilidad media con un FS entre 1.1- 1.5, para valores de FS entre >1.5 se presenta una condición estable en el 30.9% de la zona de estudio.

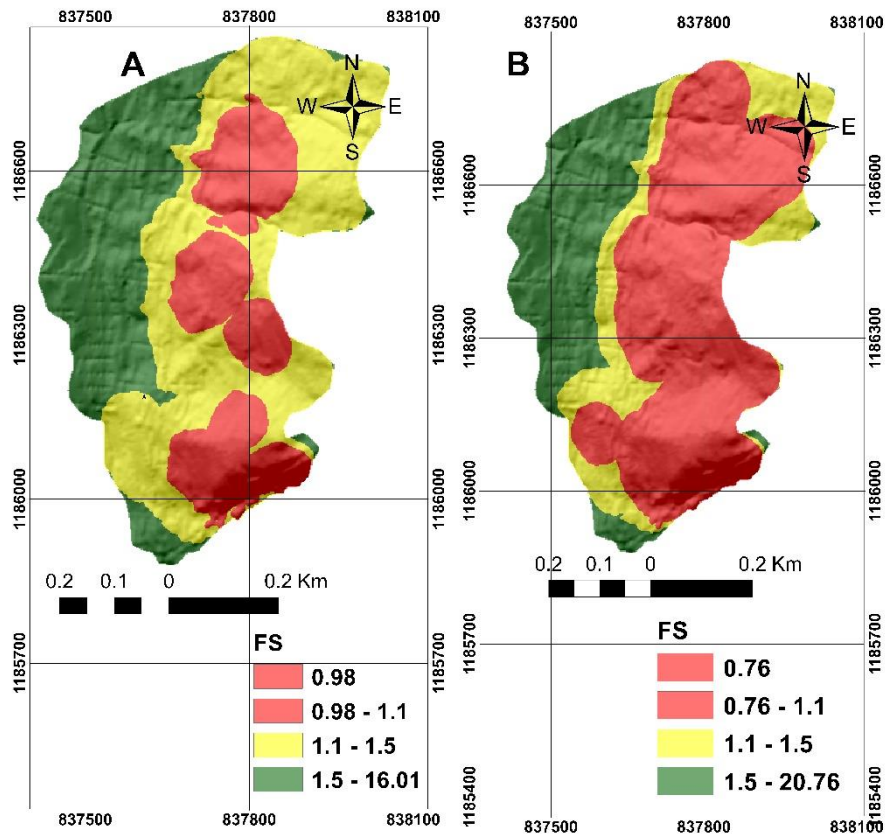


Figura 28. Mapa de factor de seguridad 3D para el polígono de San José la Cima caso 2. A. Escenario seco sin nivel freático. B. Escenario saturado  $z=10\text{m}$ .

Para el escenario saturado por debajo de una superficie piezométrica de 10 metros (Figura 28 (B)) se tiene un FS mínimo de 0.76 que representa condiciones inestables en un 2.64% de la zona de estudio, para valores de FS entre 0.76- 1.1 se tiene un 53.63% de la zona de estudio en condiciones inestables, el 17.55% de la zona de estudio está en condición de estabilidad media con un FS entre 1.1-1.5, para valores de FS >1.5 se presenta una condición estable en el 26.18% de la zona de estudio.

En el **caso 3** (Figura 29) se considera un área máxima de  $25.000 m^2$ , con el fin de simular un escenario extremo con un valor superior al área del polígono ( $21000m^2$ ). Se visualiza la distribución espacial del factor de seguridad en el (a) escenario seco sin nivel freático y (b) escenario saturado con una superficie piezométrica  $z=10m$ .

Para el escenario seco sin nivel freático (Figura 29 (A)) se tiene un FS mínimo de 1.01 que representa condiciones de inestabilidad en un 2.02% de la zona de estudio, el 10.74% de la zona de estudio está en condición de inestabilidad con un FS entre 1.01-1.1, para valores de FS entre 1.1-1.5 se presenta una condición de estabilidad media en el 57.64% de la zona de estudio y para  $FS > 1.5$  en el 29.6% de la zona de estudio se evidencia una condición estable.

Para el escenario saturado por debajo de una superficie piezométrica de 10 metros (Figura 29 (B)) se tiene un FS entre 0.69-1.1 que representa condiciones inestables en un 72.77% de la zona de estudio, para valores de FS entre 1.1-1.5 se tiene un 12.03% de la zona de estudio en condiciones de estabilidad media, el 15.2% de la zona de estudio presenta estabilidad con un  $FS > 1.5$ .

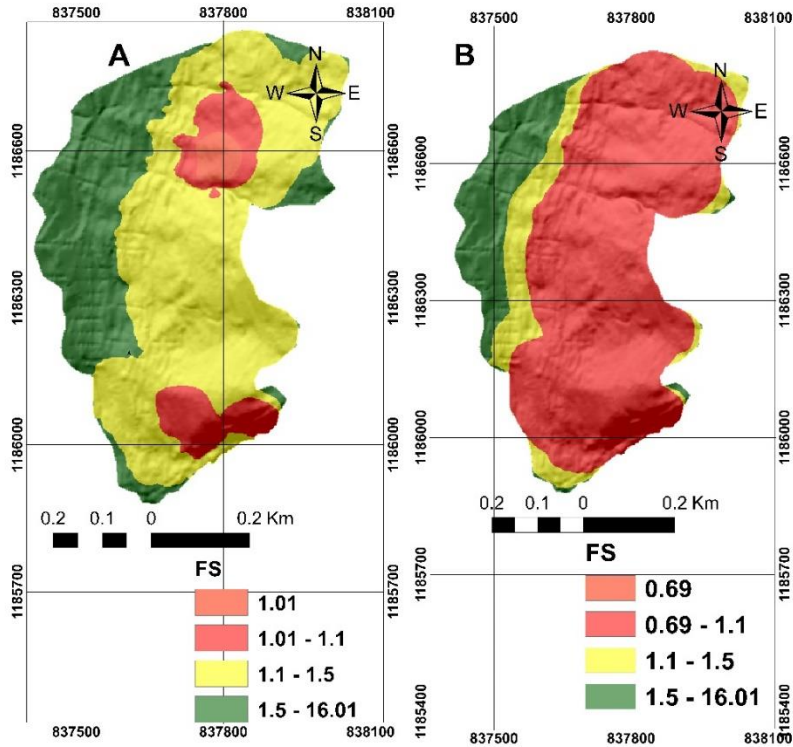


Figura 29. Mapa de factor de seguridad 3D para el polígono de San José la Cima caso 3. A. Escenario actual. B. Escenario saturado z=10m.

## 7.2. Mapa de susceptibilidad

En el actual proyecto, para la zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa se tienen en cuenta los valores de factor de seguridad límites calculados por Scoops3D en el análisis de estabilidad del caso 1 (Figura 30) y se clasifican según el Decreto Municipal de Medellín 1626 de 2015 (Tabla 11); esto con el fin de visualizar el alcance del modelo y poder comparar con el mapa de susceptibilidad obtenido por (EAFIT,2018).

Tabla 11. Clasificación de estabilidad según Decreto Municipal 1626 de 2015

Factor de Seguridad	Categorización de estabilidad
$FS < 1.2$	Susceptibilidad Alta
$1.2 < FS < 1.5$	Susceptibilidad Media
$FS > 1.5$	Susceptibilidad Baja

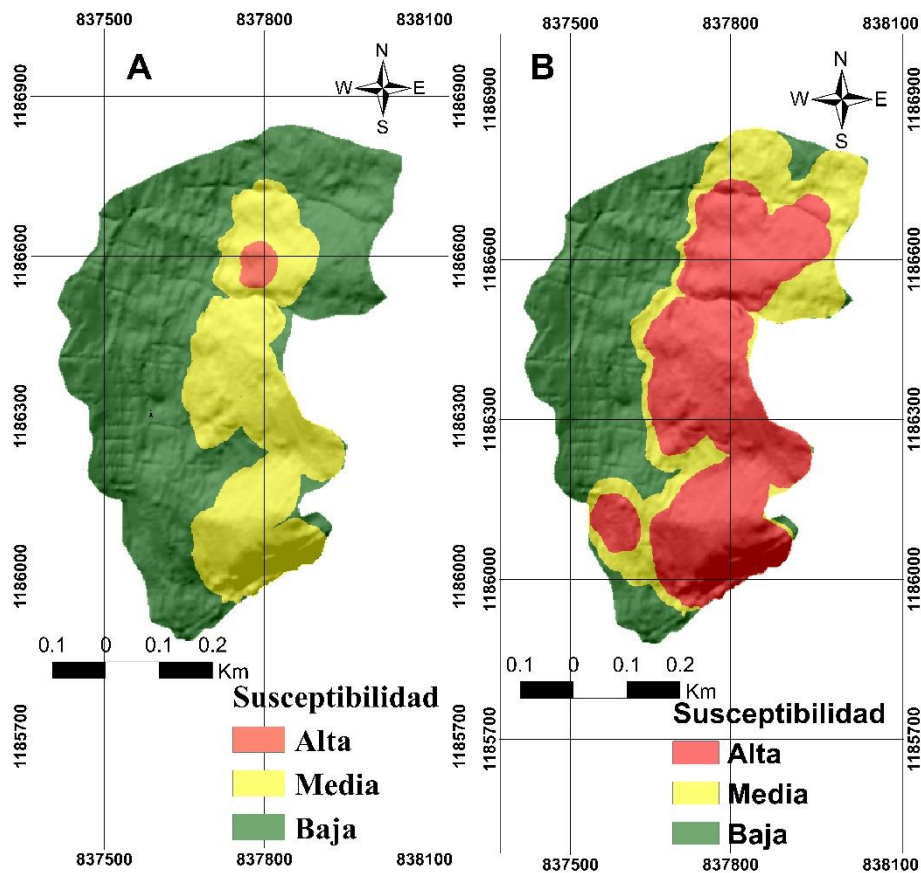


Figura 30. Mapa de Susceptibilidad del polígono de San José la Cima. A. Escenario seco sin nivel freático. B. Escenario Saturado con  $z=10\text{m}$ .

Para el escenario seco sin nivel freático (Figura 30 (A)) se tiene condición de susceptibilidad alta para el 1.4% de la zona de estudio, susceptibilidad media para el 26.6% de la zona de estudio y 72% de susceptibilidad baja para la zona de estudio.

Para el escenario saturado por debajo de una superficie piezométrica de 10 metros (Figura 30 (B)) se tiene condición de susceptibilidad alta para el 43.65% de la zona de estudio, susceptibilidad media para el 19.7% y susceptibilidad baja para el 36.7% de la zona de estudio.

## 8. Discusión

El enfoque adoptado en este proyecto tiene como objetivo evaluar la viabilidad de la implementación del modelo físico distribuido de estabilidad Scoops3D, lo que equivale a una evaluación y zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa en un polígono de suelo urbano a partir de un factor de seguridad distribuido espacialmente.

Con el fin de comparar el modelo de estabilidad usado en el proyecto actual y el propuesto por (EAFIT,2018) se elige el caso 1 (Figura 27) de análisis donde se consideró un área máxima del proceso de  $5000m^2$ ; dicha consideración se realiza con el fin de modelar en la medida posible las condiciones reales de la ladera, es decir, la estratigrafía de las unidades de suelo, los aspectos morfométricos (pendiente y aspectos) y los procesos activos cartografiados.

Por consiguiente, para validar la confiabilidad del modelo se procede a comparar con los valores de factor de seguridad 2D calculados por (EAFIT, 2018) a partir de 4 secciones topográficas y los valores de factor de seguridad 3D calculados por Scoops3D en los escenarios actual y saturado (Tabla 12-13).

**Tabla 12. Comparación de valores de factor de seguridad 2D (EAFIT, 2018) y factor de seguridad 3D calculado por Scoops3D para el escenario seco sin nivel freático.**

Sección (Actual)	Factor de Seguridad		Diferencia Relativa (%) $\left(\left \frac{FS_{2D}-FS_{3D}}{FS_{3D}}\right \right)$
	2D	3D	
Perfil 1	1.42	1.35	5%
Perfil 2	1.17	1.05	10%
Perfil 3	1.23	1.22	0.8%
Perfil 4	1.37	1.24	10%

**Tabla 13. Comparación de valores de factor de seguridad 2D (EAFIT, 2018) y factor de seguridad 3D calculado por Scoops3D para el escenario saturado con  $z=10m$ .**

Sección (Saturado)	Factor de Seguridad		Diferencia Relativa (%) $\left(\left \frac{FS_{2D}-FS_{3D}}{FS_{3D}}\right \right)$
	2D	3D	
Perfil 1	1.35	1.29	4%
Perfil 2	1.17	0.97	20%
Perfil 3	1.2	1.14	5%
Perfil 4	1.3	1.20	8%

La Tabla 12 muestra una diferencia relativa porcentual promedio de 6.45% entre los valores comparados para el caso seco sin nivel freático, mientras que para el caso saturado por debajo de una superficie piezométrica de 10 metros (Tabla 13) se muestra una diferencia relativa promedio de 9.25% evidenciando una diferencia considerable entre los valores 2D y 3D comparados, además se observa que los valores calculados en el modelo 3D presentan factores de seguridad menores que el 2D para ambos escenarios. La diferencia se debe a que el modelo 2D arroja valores más conservadores ya que usa una interpolación de los factores de seguridad en todo el polígono a partir de la evaluación de estabilidad en las secciones topográficas para zonificar la susceptibilidad, en otras palabras, dicha zonificación presenta sesgos que simplifican las condiciones reales de la zona y sobreestiman la susceptibilidad, sin permitir observar una distribución de la susceptibilidad como es el caso del escenario saturado (Figura 31 (B)) donde se zonifica todo el polígono con susceptibilidad alta. Por otro lado, el modelo 3D permite tener una aproximación más real al problema de estabilidad de la zona, ya que tiene en cuenta la variabilidad horizontal de los estratos de suelo y su estratigrafía, la geometría de la superficie de falla, además de que representa en forma continua las variaciones de la topográficas.

Aun así, a pesar de la diferencia entre los valores de factor de seguridad, el método 3D presenta una distribución confiable de la susceptibilidad en la zona de estudio (Figura 30)

y permite observar de forma más adecuada las variaciones de la estabilidad del terreno y la distribución espacial de los procesos cartografiados en campo.

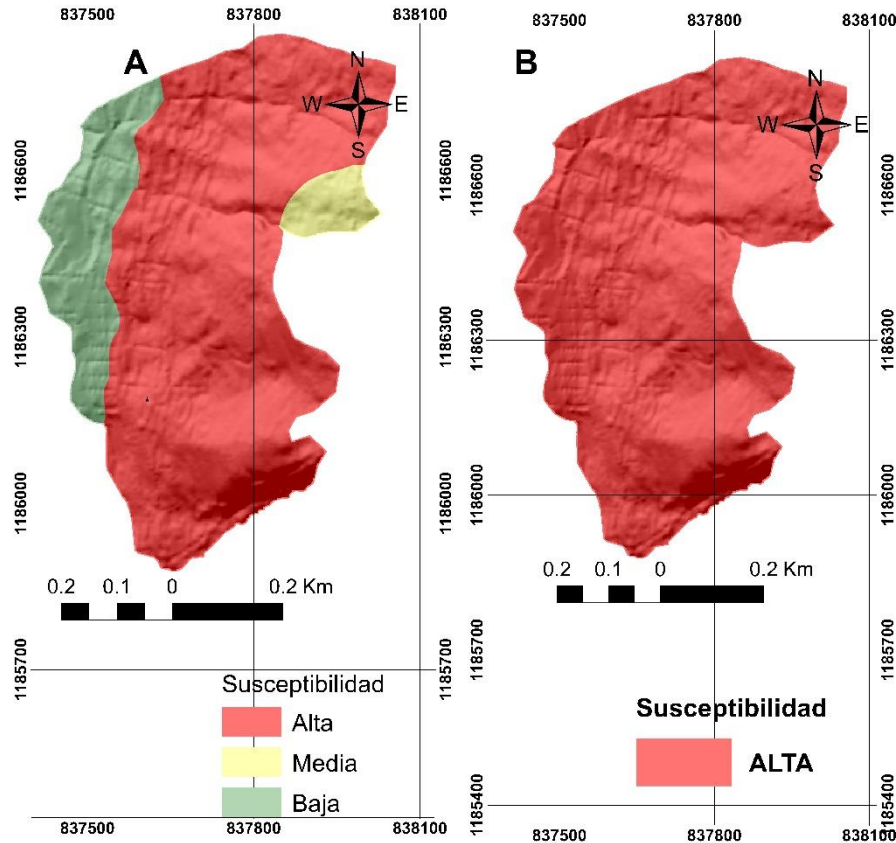


Figura 31. Mapa de susceptibilidad realizado por (EAFIT, 2018). A. Escenario Actual. B. Escenario Saturado.

Por otro lado, cabe tener en cuenta que tanto para el análisis de estabilidad en 2D realizado por (EAFIT, 2018) como en el 3D realizado en el actual proyecto se usan los datos de sondeos exploratorios realizados a lo largo del polígono de San José la Cima de los cuales se extraen muestras de forma estratégica y posteriormente se realizan ensayos de corte directo a éstas con el fin de determinar sus parámetros geomecánicos, las propiedades topográficas se modelan en un DEM 2x2 de alta resolución y la naturaleza de los procesos morfodinámicos se describe a partir de procesos cartografiados activos e inactivos en la zona de estudio. Todo lo anterior, permitió tener una visión mas clara de las condiciones reales del terreno y realizar un análisis de estabilidad confiable.

## 9. Conclusiones

En este trabajo, se implementó un método determinístico que provee información cuantitativa para la zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa en el polígono urbano de San José la Cima. Se usó Scoops3D, un modelo físico distribuido que permite evaluar la estabilidad del talud a través de una red de búsqueda tridimensional que genera millones de superficies de prueba esféricas en cada nodo sobre una superficie digital de terreno (DEM). Scoops3D calcula un factor de seguridad 3D mínimo para las superficies de prueba esféricas de falla y permite visualizar la estabilidad de cada una de ellas en las celdas del polígono en mención haciendo uso de un SIG. Lo anterior, con el fin de comparar el modelo 3D con el modelo 2D usado en zonificaciones anteriores.

El modelo 3D arrojó valores de factor de seguridad menores al modelo 2D con una diferencia relativa porcentual promedio del 7%, diferencia asociada a las concepciones mecánicas de cada uno de los modelos y a la parametrización usada en el modelo 3D que permite tener en cuenta las variaciones espaciales de los parámetros geotécnicos y morfométricos de la zona de estudio, adaptando las condiciones físicas reales del polígono y el área de los procesos cartografiados en este al modelo. Posteriormente, se obtiene un mapa de susceptibilidad en dos escenarios: actual y saturado (Figura 30), donde se visualiza una distribución confiable de la susceptibilidad a lo largo del polígono de estudio, la afirmación previa se sostiene en el hecho de que Scoops3D calcula el factor de seguridad en cada celda del DEM condicionando el análisis de estabilidad a las condiciones reales de cada punto en el terreno, así no se limita la zonificación de la susceptibilidad a la interpolación de secciones topográficas de estabilidad como en el caso 2D, lo que resulta en una mejor percepción de la inestabilidad asociada a los procesos naturales identificados en la zona de estudio, observándose una reducción en el sesgo o sobreestimación de la susceptibilidad.

Se recomienda el modelo Scoops3D primero como una herramienta complementaria al modelo 2D debido a su capacidad de realizar el análisis de estabilidad a lo largo de toda la zona de estudio, suministrando valores de estabilidad en sitios donde el modelo 2D no tiene alcance, lo que permite asociar los datos obtenidos en modelo 3D con los del modelo 2D, esto con el fin de tener información más confiable a la hora de tomar decisiones desde el punto de vista del diseño de obras de ingeniería y cuantificación del riesgo. Igualmente, se recomienda el modelo como un mecanismo útil en la disminución del sesgo en la planeación del territorio; especialmente en polígonos de suelo urbanizado de laderas donde se presentan problemas socio-económicos, particularmente de ocupación de zonas en condición de riesgo como es el caso actual de estudio en San José La Cima donde se han identificado procesos latentes a partir de zonificaciones anteriores pero que debido a las condiciones adversas anteriormente mencionadas requieren estudios más detallados que modelen de forma más confiable el comportamiento de la estabilidad del terreno.

Finalmente, se sugiere para aplicaciones posteriores tener en cuenta modelos hidrogeológicos más rigurosos que permitan representar de mejor manera las condiciones hidrogeológicas a profundidad o posición del nivel freático, además de implementar un modelo de análisis que tenga en cuenta la ocurrencia de sismos.

## Referencias

- Acosta, S., 2017. Guías de prácticas en Pensamiento Espacial y SIG – curso SIG 2017. Guía 4: “Análisis Espacial: Superficies”. Universidad EAFIT, Escuela de Ingeniería, 2017.
- Ambalagan R., 1992. Terrain evaluation and landslide hazard zonation for environmental regeneration and land use planning in mountainous terrain. Proceedings of the sixth International Symposium on Landslides, Christchurch, New Zealand, pp. 861-871. En: Calderón, Y., Carvajal, H., Sandoval, J., 2010. Un análisis crítico a las metodologías de zonificación por movimientos en masa y zonificación de comportamientos especiales aplicados al ordenamiento del territorio. Congreso de Geotecnia, Manizales, Colombia, pp. 7.
- Area Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA) 2007. Microzonificación Sísmica Detallada de los Municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Sabaneta, La Estrella, Caldas y Envigado.
- Aristizabal, E., Velez, J., Martinez, H., y Jaboyedoff, M., 2015. SHIA\_Landslide: a distributed conceptual and physically based model to forecast the temporal and spatial occurrence of shallow landslides triggered by rainfall in tropical and mountainous basins. Landslides, 13, no.3, pp: 97-517.
- Baum, R.L., Savage, W.Z., Godt, J.W., 2002. TRIGRS-A Fortran program for transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability analysis. En U.S. Geological Survey Open-File Report 02-0424.
- Bishop, A.W., 1955. The use of slip circles in the stability analysis of slopes, Geotechnique, 5, pp. 7-17.
- Brabb, E.E. y Pampeyan E.H., 1972. Preliminary map of landslide deposits in San Mateo County, California. US Geological Survey Miscellaneous Field Studies. En: Calderón, Y., Carvajal, H., Sandoval, J., 2010. Un análisis crítico a las metodologías de zonificación por movimientos en masa y zonificación de comportamientos especiales aplicados al ordenamiento del territorio. Congreso de Geotecnia, Manizales, Colombia, pp. 7.
- Brien, D.L., y Reid, M.E., 2007. Modeling 3-D slope stability of coastal bluffs using 3-D ground-water flow, southwestern Seattle, Washington: U.S Geological Survey Scientific Investigations Report 2007-5092, pp. 54.
- Brien, D.L., y Reid, M.E., 2008. Assessing Deep-seated landslide susceptibility using 3-D groundwater and slope-stability analyses, southwestern Seattle, Washington, En: Braum, R.L., Got, J.W., y Highland, L.M., (eds), Landslides and Engineering Geology of the Seattle, Washington, Area: Geological Society of America, Reviews in Engineering Geology, 20, pp. 83-101.
- Calderón, Y., Carvajal, H., Sandoval, J., 2010. Un análisis crítico a las metodologías de zonificación por movimientos en masa y zonificación de comportamientos especiales aplicados al ordenamiento del territorio. Congreso de Geotecnia, Manizales, Colombia, pp.7-8.
- Calvello, M., Cascini, L., Mastroianni, S., 2013. Landslide zoning over large areas from a sample inventory by means of scale-dependent terrain units. Geomorphology, 182, pp. 33-48.
- Catanzariti, F., 2019. Estabilidad de Taludes: Métodos de Equilibrio Límite, (Eds): GeoStru, España.
- Chakraborty, A. y Goswami, D., 2016. State of the art: Three Dimensional (3D) Slope-Stability Analysis, International Journal of Geotechnical Engineering, 10, n.5, pp. 493-498.
- Chica, A., 1989. Apuntes de Geotecnia: Cursos de Geotecnia y Practicas Geotécnicas, Medellín: Facultad Nacional de Minas, Universidad Nacional de Colombia.
- Chowdhury, R., y Flentje, P., 2011. Practical reliability approach to urban slope stability. 11th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering, ETH Zurich, Suiza.
- Cruden, M. C., y Varnes, D. J. 1996. Landslide types and proceses. En: Turner, A. K., Schuster, R. L. (Eds): Landslides: Investigation and Mitigation. Special Report 247. Natural Academy Press. Washington, EEUU, pp.36-75.
- Deere, D.U., Patton F.D., 1971. Slope stability in residual soils. En Proc., Fourth Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Puerto Rico. Vol. 1, Pág. 87-170.

- Duncan, J.M., Wright, S.G., Brandon, T.L., 2014. *Soil Strength and Slope Stability*, 2nd ed., Hoboken, New Jersey: Wiley Inc., pp. 81,87.
- EAFIT., 2018. Estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo de detalle para los circuitos Los Mangos, El Corazón y Santo Domingo, en el municipio de Medellín: Polígono de San José la Cima, Contrato inter-administrativo CT- 2017-00067, Medellín, Colombia.
- Fellenius, W., 1922. *Statens Jarnjvagens Geotekniska*, Commission, Stockholm, Sweden. En Suarez, J., 2013. *Deslizamientos: Análisis Geotecnico*. Geotecnología S.A.S, Bucaramanga, Colombia, pp. 130, 155.
- Grupo de Sismología de Medellín (GSM), 2002. *Microzonificación sísmica de los municipios del Valle de Aburrá y definición de zonas de riesgo por movimientos en masa e inundaciones en el Valle de Aburrá*. Área Metropolitana del Valle de Aburrá.
- Hansen, A., 1984. *Landslide Hazard Analysis*. In: Brunsen, D. and Prior, D.B., Eds., *Slope Instability*, John Wiley and Sons, New York, EEUU, pp. 523-602. En: Calderón, Y., Carvajal, H., Sandoval, J., 2010. *Un análisis crítico a las metodologías de zonificación por movimientos en masa y zonificación de comportamientos especiales aplicados al ordenamiento del territorio*. Congreso de Geotécnica, Manizales, Colombia, pp. 7.
- Hansen, M. J., 1984. *Strategies for classification of landslides*. En: Brunsdén, D., Pior, D.B. (Eds): *Slope Instability*. Wiley. Chichester, Inglaterra, pp. 1-25.
- Hovland, H.J., 1977. *Three dimensional slope stability analysis method*, *Journal of Geotechnical Engineering*, 103, no. 9, pp. 971-986.
- Huang, C.C., Tsai, C.C., Chen, Yu-Hong., 2002. *Generalized Method for Three-Dimensional Slope Stability Analysis*, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 128, pp. 837.
- Huang, Y., 2014. *Slope Stability Analysis by the Limit Equilibrium Method*. 1st ed. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers, pp.265.
- Hungr, O., 1987. *An extension of Bishop's simplified method of slope stability analysis to three dimensions*, *Geotechnique*, 37, no.1, pp. 113, 114, 115.
- INGEOMINAS, 2007. *Memorias Plancha 147*.
- Keller, E. and Blodgett, R., 2004. *Riesgos Naturales Procesos de la Tierra como riesgos, desastres y catástrofes*. 2nd ed. Madrid: PEARSON EDUCACIÓN, S.A., pp.151-154.
- Lam, L., y Fredlund, D.G., 1993. *A general limit-equilibrium model for threedimensional slope stability analysis*, *Canadian Geotechnical Journal*, 30, pp. 905–919.
- Luzi, L., Fabbri, A. G., 1995. *Application of Favourability Modelling to zoning of Landslide Hazard in the Fabriano Area, Central Italy*. In: 1st. Joint European Conference and Exhibition on Geographical Information. The Hague, The Netherlands, pp. 398-403.
- Mesa, M., Guada, P.M., 2013. *Métodos Empírico-Mecanista empleados para el cálculo del factor de seguridad para la estabilidad de taludes*. Universidad de La Habana, Facultad de Ingeniería Civil Departamento de Ingeniería Vial, La Habana.
- Montgomery, D.R., y Dietrich, W.E., 1994. *A physically based model for the topographic control on shallow landsliding*. *Water Resources Research*, 30, no.4, pp: 1153–1171.
- Municipio de Medellín – EMTELCO, 2015. *Perfil demográfico por barrio Comuna 3 Manrique*. Contrato interadministrativo N°4600043606, Medellín.
- Nilsen, T.H., Wright, R.H., Vlastic, T.C., Spangle, W.E., 1979. *Relative slope stability and land use planning in the San Francisco Bay region, California*. U.S. Geological Survey Professional Paper 944: 96. En: Calderón, Y., Carvajal, H., Sandoval, J., 2010. *Un análisis crítico a las metodologías de zonificación por movimientos en masa y zonificación de comportamientos especiales aplicados al ordenamiento del territorio*. Congreso de Geotécnica, Manizales, Colombia, pp. 7.
- Pack, R.T., Tarboton, D.G., Goodwin, C.N., 1998. *The SINMAP approach to terrain stability mapping*. En *Proceedings of 8th Congress of the International Association of Engineering Geology*, Vancouver, British Columbia, Canada, pp: 1157–1165.

- Parra, M., 2015. Modelo para el estudio de la amenaza de movimientos en masa detonados por lluvias en el barrio Llanaditas de la ciudad de Medellín (Maestría). Universidad Nacional de Colombia Facultad de Minas, Área curricular de Ingeniería Civil.
- Reid, M.E., Brien, D.L., y Waythomas, C.F., 2010. Preliminary slope-stability analysis of Augustine Volcano, En: Power, J.A., Coombs, M.L., y Freymueller, J.T., (eds), The 2006 Eruption of Augustine Volcano, Alaska, U.S Geological Survey Professional Paper 1769, pp. 321-332.
- Reid, M.E., Christian, S.B., Brien, D.L. y Henderson, S.T., 2015. Scoops3D-Software to analyze 3D slope stability throughout a digital landscape: U.S Geological Survey Techniques and Methods, book 14, chap. A1, pp. 218.
- Rendón, D. A., 1999. Cartografía y caracterización de las unidades geológicas de la zona urbana de Medellín; Universidad Nacional de Colombia; Medellín.
- Restrepo, J.J., 1986. Metamorfismo en el sector norte de la Cordillera Central de Colombia. Informe para promoción a profesor titular, Univ. Nacional, Facultad. Ciencias, Medellín, pp 1-276.
- Servicio Geológico Colombiano., 2015. Guía Metodológica para Estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo Por Movimientos en Masa, Ministerio de Minas, Bogotá D.C: Imprenta Nacional de Colombia, pp. 15-60-62-63.
- Spencer, E. 1967. A method of analysis the stability of embankments assuming parallel inter-slice forces, *Geotechnique*, 17, no.1, pp. 11–26.
- Suarez, J., 2013. Deslizamientos: Análisis Geotecnico. Geotecnología S.A.S, Bucaramanga, Colombia, pp. 130, 155.
- Tecnisuelos, 2009. Estudio geotécnico en la comuna 03, barrio San José la Cima #1, Contrato No. 4600018104 de 2009, Medellín, Colombia.
- Teixeira, M., Bateira, C., Marques, F., Vieira, B., 2014. Physically based shallow translational landslide susceptibility analysis in Tibo catchment, NW of Portugal. *Landslides*, 12, no.3, pp. 455-468.
- Tran, T.T., Alvioli, M., Lee, G., An, H.U., 2018. Three-dimensional, time dependent modeling of rainfall-induced landslides over a digital landscape: a case study, *Landslides*, 15, pp. 1071–1084.
- USGS., 2004. Landslides Types and Processes, (Eds): Lynn Highland, Fact Sheet 2004-3072, US Geological Survey, EEUU.
- Varnes, D.J., 1984. Landslide hazard Zonation. A Review of Principles and practice, UNESCO Press, Paris, Francia, pp. 63.
- VV. AA., 2007. Antioquia: Características Geográficas. Bogotá: IGAC. En: Hermelin, M., 2015. La huella humana en el paisaje del Valle de Aburrá. Medellín: Universidad Nacional de Colombia
- Westen, C.J., 1993. Application of geographic information systems to landslide hazard zonation. ITC, Enschede, The Netherlands.
- Wu, W., y Sidle, R.C., 1995. A distributed slope stability model for steep forested basins. *Water Resources Research*, 31, no.8, pp: 2097–2110.
- Zhang, S. y Wang, F., 2019. Three-dimensional seismic slope stability assessment with the application of Scoops3D and GIS: a case study in Atsuma, Hokkaido, *Geoenviromental Disasters*, 6, no.9, pp. 7.

## 10. Anexo 1

En este anexo se presenta una tabla resumen de la estratigrafía (superior-inferior) de las perforaciones, su descripción y clasificación según Deere And Patton (1971). Además, se adjunta una tabla para cada perforación donde se expone la profundidad, método de perforación, muestra recuperada y descripción según los ensayos de laboratorio en caso de haberlo.

Unidades	Clasificación
Descripción y Perforaciones asociadas	<b>Deere And Patton (1971)</b>
<b>Llenos antrópicos:</b> El material de origen antrópico fue detectado de forma superficial en todos los sondeos ejecutados, y se extiende en profundidad entre 1.0 y 5.0 m, este material conforma principalmente los terrenos de vías y zonas aledañas a las viviendas donde se han depositado materiales de origen heterogéneo. Están compuestos por arcillas limosas a limos arenosos de color café oscuro. Contiene restos de material orgánico, raíces, basuras, escombros y fragmentos de rocas.	
<b>Ceniza Volcánica:</b> El material de origen antrópico fue detectado de forma superficial en todos los sondeos ejecutados, y se extiende en profundidad entre 1.0 y 5.0 m, este material conforma principalmente los terrenos de vías y zonas aledañas a las viviendas donde se han depositado materiales de origen heterogéneo. Están compuestos por arcillas limosas a limos arenosos de color café oscuro. Contiene restos de material orgánico, raíces, basuras, escombros y fragmentos de rocas.	

<p><b>Depósito de vertiente:</b> Este material fue detectado subyaciendo el lleno antrópico en los sondeos P6, P7 y P8, con espesor variable entre 2.5 y 7.0 m. Material conformado por una matriz limo arcillosa de color café a café amarillento, húmeda, con bloques de dunita angulares moderadamente meteorizados con diámetros entre menos de 10 cm y los 40 cm, en una relación variable 20%-60% bloques 80%-40% matriz.</p>	
<p><b>Suelo residual de dunita IB:</b> Correspondiente al nivel superior del perfil de meteorización; se observó únicamente en el sondeo P-3. Corresponde a un Limo arcilloso de color café amarillento a café rojizo, completamente meteorizado, plástico y húmedo, en algunas ocasiones mezclado con fragmentos de roca meteorizados a levemente meteorizados. Se identifican zonas de oxidación.</p>	<b>IB</b>
<p><b>Saprolito de dunita (Horizonte IC):</b> Estos materiales se detectaron en el sondeo P-1 subyaciendo el lleno antrópico y suprayaciendo el horizonte IIA. Corresponde a un material Limo arenoso de color pardo amarillento con zonas grises verdosas, en ocasiones mezclado con fragmentos de roca parcialmente meteorizada. El material conserva parte de la textura de la roca original donde se conserva parte de la serpentinita a través de planos bien definidos. Igualmente se observan zonas de oxidación a través de planos heredados de la roca original.</p>	<b>IC</b>
<p><b>Dunita alterada (Horizonte IIA):</b> Identificado hasta la profundidad explorada en todos los sondeos a excepción del sondeo P-8 donde no se identificó. Se compone bloques y fragmentos de dunita altamente fracturados y meteorizados de coloración gris verdoso, con presencia de serpentización, presenta de forma ocasional una escasa matriz limo arcillosa en tonalidades café amarillento a café rojizo.</p>	<b>IIA</b>

## Perforación 1

Profundidad (m)	Método	Muestra	Descripción
1- 1.45	SPT	M-2	Limo arcilloso café amarillento
1.45-2.30	SPT	M-3	Limo arenoso café amarillento, zonas grises
2.30- 15	Rotación	N/A	En el intersticio rocoso no se presenta matriz.

## Perforación 2

Profundidad (m)	Método	Muestra	Descripción
0- 1.00	Cuchara Manual	M-0	Arcilla limosa café amarillento
1.00-1.45	SPT	M-2	Limo arcilloso café
1.45-2.45	SPT	M-3	Arcilla limosa café amarillento
2..45-3.45	SPT	M-4	Arcilla limosa café amarillento
3.45-4.45	SPT	M-5	Arcilla limosa café amarillento
6.50-6.80	SPT	M-8	Limo gravoso café amarillento, con arena
10.00-10.50	Rotación	N/A	Limo gravoso café amarillento, con arena
14.50-15	Rotación	N/A	Limo arenoso café amarillento y rojizo, zonas grises, con grava y mica
15-16	Rotación	M-26	Limo arcilloso con bloques de roca

### Perforación 3

Profundidad (m)	Método	Muestra	Descripción
0.55-1.00	SPT	M2	Arcilla limosa café amarillento
8-15.00	Rotación	N/A	El terreno es roca muy fragmentada y pequeña, no se recupera

### Perforación 4

Profundidad (m)	Método	Muestra	Descripción
0-1.00	Pala	N/A	Concreto- Suelo: limo arcilloso
1.00-1.45	SPT	M-1	Arcilla limosa café amarillento
2.00-2.30	SPT	M-2	Grava limosa café amarillento y rojizo con arena
2.30- 3.00	Barrena	M-3	Coluvión de roca
3.00-4.00	Barrena	M-4	Grava y bloques de roca
4.00-5.00	Barrena	M-5	Núcleo de roca oxidado
6.00-7.00	Barrena	M-7	Núcleo de roca fracturada
7.00-8.00	Barrena	M-8	Núcleo de bloques de roca
9.00-10.00	Barrena	M-10	Núcleo de roca

10.00-11.00	Barrena	M-11	Coluvión con núcleos de roca
11.00-12.00	Barrena	M-12	Coluvión
13.00-15.00	Barrena	M-14	Coluvión con bloques de roca con matriz arcillosa-arenosa

### Perforación 5

Profundidad (m)	Método	Muestra	Descripción
0-0.30	Paladruga	M-0	Limo arenoso de color naranja
0.30-0.75	SPT	M-1	Limo arenoso café amarillento, con grava
1.00-1.45	SPT	M-2	Arcilla gravosa café amarillento, con arena
3.00-3.15	SPT	M-3	Grava arcillosa café amarillento, con arena
5.00-5.15	Barrena	M-5	Grava arcillosa café amarillento, con arena
5.30-6.00	Barrena	M-8	Arcilla arenosa con gravas y bloques de roca
6.00- 7.10	Barrena	M-9	Núcleo de roca sano, finaliza con roca fracturada
7.10-8.60	Barrena	M-10	Núcleo de roca, matriz arcillosa color naranja

10.00-11.50	Barrena	M-12	Núcleo de roca, matriz arcillosa color gris/blanco
14.00- 14.12	Barrena	M-15	Coluvión

### Perforación 6

Profundidad (m)	Método	Muestra	Descripción
0-1.00	Barrena	M-1	Roca fracturada de color gris
1.00-2.00	Barrena	M-2	Roca fracturada de color gris
4.00-5.00	Barrena	M-5	Roca fracturada
7.00-8.00	SPT	M-7	Suelo con gravas con matriz de limosa
8.00-9.00	SPT	M-8	Grava arcillosa café y gris, con arena
9.00- 10.00	SPT	M-9	Grava arcillosa café y gris, con arena
10.00-11.00	SPT	M-10	Grava arcillosa café amarillento y gris, con arena
11.00-12.00	Barrena	M-12	Roca fracturada
12.00-13.00	Barrena	M-13	Roca fracturada con matriz limosa
14.00-15.00	Barrena	M-15	Roca fracturada

### Perforación 7

Profundidad (m)	Método	Muestra	Descripción
0-1.00	SPT	M-1	Arcilla arenosa café amarillento
1.00-2.00	SPT	M-3	Arcilla arenosa café amarillento
3.00-4.00	Barrena	M-4	Roca fracturada
10.00-11.00	Barrena	M-11	Roca más consolidada, color gris

### Perforación 8

Profundidad (m)	Método	Muestra	Descripción
0- 1.00	Cuchara Manual	M-1	Arena arcillosa café y café amarillento, con grava
1.00-1.45	SPT	M-2	Grava arcillosa café y gris, con arena
1.45- 2.00	Rotación	M-3	Roca compacta con oxidación
2.00-2.45	SPT	M-4	Grava limosa mal grada café y gris, con arena
2.45- 3.00	Rotación	M-5	Bolas de roca compacta con oxidación
3.00- 3.50	Rotación	M-6	Roca fracturada con oxidación
3.50- 4.00	Rotación	M-7	Roca muy fracturada con oxidación
4.00- 4.50	Rotación	M-8	Roca muy fracturada con oxidación
4.50- 5.00	Rotación	M-9	Roca fracturada con manganeso y hierro
5.00-5.50	Rotación	M-10	Roca fracturada con manganeso y hierro

5.50-6.00	Rotación	M-11	Roca compacta con manganeso y hierro
6.00- 6.50	Rotación	M-12	Roca compacta con hierro y cobre
6.50-7.00	Rotación	M-13	Roca compacta con hierro con cobre, hierro y manganeso
7.00-7.50	Rotación	M-14	Roca compacta con cobre, hierro y manganeso
7.50- 8.00	Rotación	M-15	Bolas de roca con manganeso, hierro y cobre
8.00- 8.50	Rotación	M-16	Bolas de roca con manganeso, hierro y cobre
8.50-9.00	Rotación	M-17	Roca compacta con manganeso y hierro
9.00-9.50	Rotación	M-18	Bolas de roca con arcilla y manganeso
9.50- 10.00	Rotación	M-19	Bolas de roca compactas
10.00- 10.50	Rotación	M-20	Bolas de roca muy "menudas"
10.50-11.00	Rotación	M-21	Roca compacta
11.00- 11.50	Rotación	M-22	Roca compacta
11.50-12.00	Rotación	M-23	Roca fracturada con manganeso
12.00- 13.00	Rotación	M-24	Roca muy fracturada con hierro
13.00- 13.50	Rotación	M-25	Roca fracturada con hierro y cobre
13.50- 14.00	Rotación	M-26	Roca con fractura con cobre y hierro
14.00- 14.50	Rotación	M-27	Roca con fractura con cobre y hierro
14.50- 15.00	Rotación	M-28	Roca muy fracturada

