



# Análisis de susceptibilidad a deslizamientos con el modelo Scoops3D en un terreno montañoso tropical

 Roberto J. Marín <sup>1</sup> y  Ricardo Jaramillo-González<sup>2</sup>

Recepción: 02-10-2020 | Aceptación: 26-01-2021 | En línea: 12-05-2021

MSC: 92.40.Ha | PACS: 02.70.Uu

doi:10.17230/ingciencia.17.33.4

---

## Resumen

Muchos modelos distribuidos basados en la física estudian la ocurrencia de deslizamientos mediante un análisis de estabilidad de talud infinito, simulando una falla de tipo planar, que no suelen ser aplicables a fallas rotacionales y deslizamientos profundos. Recientemente, se han desarrollado algunos modelos distribuidos tridimensionales que se han aplicado en diferentes sitios del mundo. En esta investigación se implementa el modelo Scoops3D para un análisis de susceptibilidad a ocurrencia de deslizamientos en un terreno montañosos tropical de los Andes colombianos (Medellín, Colombia). Además de identificar las áreas susceptibles a ocurrencia de deslizamientos rotacionales, se analizan los resultados del factor de seguridad con las áreas de las superficies de falla críticas asociadas para proveer una interpretación y explicación de los resultados de simulación. Esto para tener una mejor comprensión del funcionamiento del modelo y facilitar su

---

<sup>1</sup> Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia [rjose.marin@udea.edu.co](mailto:rjose.marin@udea.edu.co)

<sup>2</sup> Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, [rijaramillo@unal.edu.co](mailto:rijaramillo@unal.edu.co)

implementación en estudios de amenaza de movimientos en masa. El actual estudio propone el modelo Scoops3D como una herramienta de gran utilidad para proyectos de gestión del riesgo de movimientos en masa.

**Palabras clave:** Deslizamientos; Scoops3D; falla rotacional; método de Bishop 3D; estabilidad de taludes.

---

## Landslide Susceptibility Assessment Using the Scoops3D Model in a Tropical Mountainous Terrain

---

### Abstract

Many physically-based distributed models study the landslide occurrence using an infinite slope stability analysis, simulating a planar failure, which is not usually applicable to rotational failures and deep landslides. Recently, some three-dimensional distributed physically-based models have been developed that have been applied in different parts of the world. In this research, the Scoops3D model is implemented for a landslide susceptibility analysis in a tropical mountainous terrain of the Colombian Andes (Medellín, Colombia). In addition to identifying the areas susceptible to the occurrence of rotational landslides, the results of the safety factor are analyzed with the areas of associated critical failure surfaces to provide an interpretation and explanation of the simulation results. This is to have a better understanding of how the model works and to facilitate its implementation in landslide hazard assessment. The Scoops3D physically-based model can be a very useful tool for mass movement risk management projects.

**Keywords:** Deep landslides; Scoops3D; rotational failure; 3D Bishop method; slope stability.

---

## 1 Introducción

Los movimientos en masa suelen ser estudiados desde la interpretación de los procesos observados del fenómeno, la reproducción de la formación y su dinámica y/o desde el enfoque de la predicción de un factor detonante [1]. En la actualidad, se ha logrado un progreso significativo en la investigación de las variables que mayor influencia tienen y en los mecanismos elementales que pueden ser incluidos en modelos basados en los procesos físicos para el análisis de su ocurrencia. Sin embargo, continúa siendo un desafío evaluar casos complejos como diferentes condiciones de falla o reactivación

u ocurrencia repentina, para simular el comportamiento y desarrollo transitorio y multidimensional de este fenómeno [2],[3]. En muchos territorios se pueden desarrollar de forma independiente tanto movimientos en masa profundos como superficiales [4]. Comúnmente, modelos distribuidos basados en la física [5],[6],[7],[8] analizan la ocurrencia de deslizamientos superficiales mediante un análisis de estabilidad de talud infinito, simulando una falla de tipo planar. Si bien han sido empleados en todo el mundo y han tenido resultados satisfactorios para este tipo de falla, no consideran los procesos físicos característicos de los deslizamientos profundos, cuya falla puede ser de tipo rotacional y su modelación debería incluir otros mecanismos de falla [9]. Los métodos de análisis tridimensionales (3D) de estabilidad de taludes son menos empleados que los unidimensionales (1D) y bidimensionales (2D) por su complejidad, requerimientos computacionales y falta de datos e información necesaria para su implementación [10],[11]. Sin embargo, los resultados varían ampliamente entre estos métodos [12]. Justamente, los métodos de análisis 3D cobran mayor importancia cuando la geometría del problema que se modela se hace más compleja, como en el caso de falla circular, evaluación de movimientos profundos, del volumen de material movilizado y cuando la dirección del movimiento tiene influencia en la simulación, lo cual sería muy difícil de resolver con los métodos 1D y 2D [13]. Generalmente, los métodos de análisis de estabilidad 1D y 2D proveen resultados más conservadores que los métodos 3D, con tendencia a valores más altos en el factor de seguridad (FS) en estos últimos [14]. Algunos autores consideran que las simplificaciones en los modelos 2D son altamente intuitivas; el análisis en la estabilidad típicamente corresponde a la evaluación del peor escenario [15],[11]. Recientemente, algunos modelos distribuidos 3D se han desarrollado por diferentes investigadores y se han extendido en el mundo. Uno de ellos es desarrollado USGS (Servicio Geológico de los Estados Unidos, en inglés) y su implementación para análisis de susceptibilidad [16],[17],[18],[19] y amenaza [20] de movimientos en masa ha sido llevada a cabo en diferentes partes del mundo. En terrenos montañosos tropicales de los Andes colombianos se han realizado análisis de susceptibilidad [21],[22] amenaza [23],[24] y umbrales críticos para para deslizamientos [25],[26], pero pocas investigaciones [27] se han enfocado en deslizamientos rotacionales, fallas profundas y métodos tridimensionales. En esta investigación, se pretende implementar el modelo distribuido

Scoops3D para un análisis de susceptibilidad en un sitio de estudio en Medellín (Colombia) con estas características (montañoso, tropical y de la Cordillera de los Andes). Además de presentar unos mapas que identifican las áreas susceptibles a ocurrencia de deslizamientos rotacionales, se pretende analizar los resultados de las áreas de las superficies de falla críticas y proveer una interpretación de los resultados. Esto para comprender de una mejor manera el funcionamiento del modelo para facilitar su implementación en estudios de amenaza de movimientos en masa.

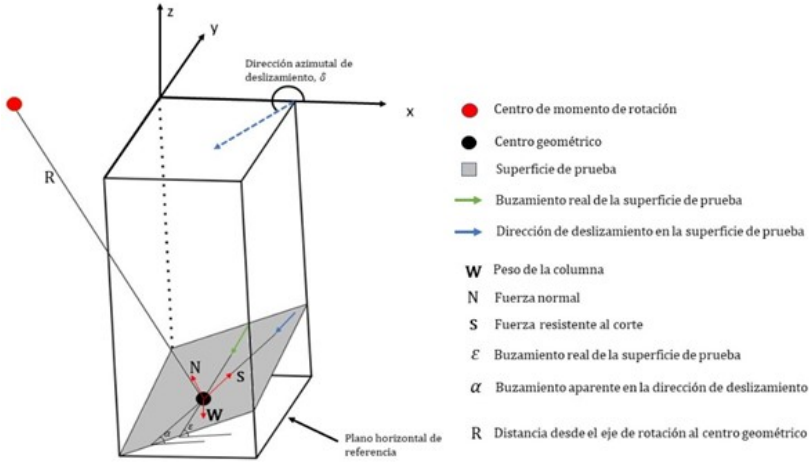
## 2 Metodología

### 2.1 Scoops3D

Scoops3D es un programa desarrollado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) para analizar la estabilidad de taludes a través de una superficie de terreno digital representada por un modelo de elevación digital (DEM) [28]. Scoops3D computa la estabilidad de una masa rígida interceptada por superficies esféricas de prueba (superficies de deslizamiento potenciales) y evalúa la estabilidad por medio de una extensión tridimensional del método convencional de equilibrio límite de dovelas para el cálculo del factor de seguridad (FS) [18]. Mediante un momento de equilibrio de fuerzas sobre un eje principal de rotación, la extensión 3D del método de Bishop simplificado [29] permite analizar múltiples superficies de falla como superficies deslizantes rotacionales esféricas.

Scoops3D selecciona superficies de falla esféricas porque es la superficie de deslizamiento tridimensional más plausible físicamente. Es la más simple y es útil para una evaluación amplia sobre un DEM. Sin embargo, puede no ser apropiado para la evaluación precisa de deslizamientos predominantemente traslacionales o geometrías de superficies de deslizamiento más complejas [28].

La Figura 1 representa una vista 3D de una columna interceptada por una superficie de deslizamiento potencial y el DEM, así como las fuerzas actuantes sobre la columna.



**Figura 1:** Diagrama esquemático de las fuerzas actuantes en una columna (adaptado de [18])

El factor de seguridad se calcula de acuerdo a la Ecuación (1) para condiciones secas (sin nivel freático) y la Ecuación (2) para condiciones saturadas por debajo de un nivel freático, con la cual se calculan las presiones de poros actuantes en la base de la columna sobre la superficie de prueba (método simplificado de Bishop en condiciones estáticas):

$$FS = \frac{\sum R_{i,j} [c_{i,j} A_{h_{i,j}} + W_{i,j} \tan \phi_{i,j}] / m_{\alpha_{i,j}}}{\sum W_{i,j} [R_{i,j} \sin \alpha_{i,j}]} \quad (1)$$

$$FS = \frac{\sum R_{i,j} [c_{i,j} A_{h_{i,j}} + (W_{i,j} - z_{pz_{i,j}} \gamma_w A_{h_{i,j}}) \tan \phi_{i,j}] / m_{\alpha_{i,j}}}{\sum W_{i,j} [R_{i,j} \sin \alpha_{i,j}]} \quad (2)$$

Donde  $R_{i,j}$  es la distancia del eje de rotación al centro geométrico de la superficie de prueba en la columna  $(i,j)$ ,  $W_{i,j}$  el peso de la columna,  $A_{h_{i,j}} = A_{i,j} \cos \epsilon_{i,j}$  es el área proyectada de la superficie de prueba en la horizontal (columna),  $\phi_{i,j}$  ángulo de fricción,  $c_{i,j}$  cohesión,  $\alpha_{i,j}$  buzamiento aparente de la base de la columna;  $m_{\alpha} = \cos \epsilon_{i,j} + \frac{\sin \alpha_{i,j} \tan \phi_{i,j}}{F}$ , donde  $\epsilon_{i,j}$  es el ángulo de buzamiento de la superficie de prueba;  $z_{pz_{i,j}} = \frac{u}{\gamma_w}$ , donde  $z_{pz_{i,j}}$  es la profundidad vertical debajo de la superficie piezométrica (puede

variar en cada columna),  $\gamma_w$  el peso unitario del agua y  $u$  es la presión de poros. De igual forma, Scoops3D calcula el factor de seguridad con el método ordinario 3D (Fellenius) mediante un equilibrio de fuerzas (momentos) sobre un eje principal de rotación. Se basa en una extensión 3D del método 2D (de Fellenius) que permite relacionar la fuerza de cortante (positiva en la dirección ascendente) resistiendo el movimiento en la dirección de buzamiento, por lo que es función del buzamiento aparente de la superficie de prueba (Figura 1). De igual forma, se presentan las ecuaciones para el método de Fellenius en condiciones secas (sin nivel freático, Ecuación 3) y para condiciones saturadas por debajo de un nivel freático (Ecuación 4), con la cual se calculan las presiones de poros actuantes en la base de la columna sobre la superficie de prueba:

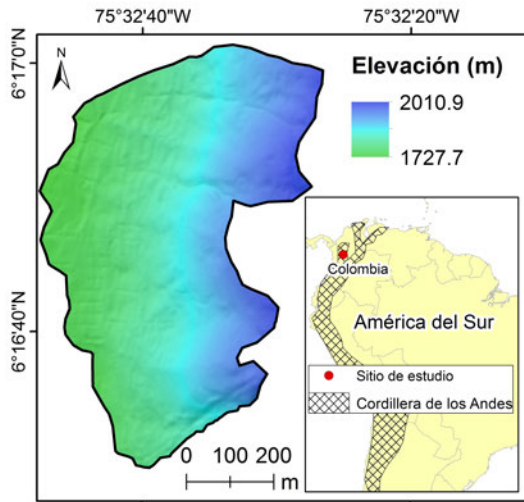
$$FS = \frac{\sum R_{i,j} [c_{i,j} A_{i,j} + (\frac{\cos^2 \alpha_{i,j}}{\cos \epsilon_{i,j}} W_{i,j}) \tan \phi_{i,j}]}{\sum W_{i,j} [R_{i,j} \sin \alpha_{i,j}]} \quad (3)$$

$$FS = \frac{\sum R_{i,j} [c_{i,j} A_{i,j} + (\frac{\cos^2 \alpha_{i,j}}{\cos \epsilon_{i,j}} W_{i,j} - z_{pz_{i,j}} - \gamma_w A_{i,j}) \tan \phi_{i,j}]}{\sum W_{i,j} [R_{i,j} \sin \alpha_{i,j}]} \quad (4)$$

En [28] se encuentran detalles específicos de las ecuaciones del modelo Scoops3D y su funcionamiento.

## 2.2 Sitio de estudio

La zona de estudio es un polígono urbano de San José La Cima, en el municipio de Medellín (Antioquia, Colombia). Está ubicado dentro de la Cordillera Central de los Andes colombianos, al margen nororiental del valle medio del río Aburrá. Tiene un área aproximada de 0.21 km<sup>2</sup>. Comprende dos barrios urbanos con una densidad poblacional de aproximadamente 5,000 habitantes [30]. La Figura 2 muestra el mapa de localización del sitio de estudio y el modelo digital de elevación, obtenido por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).

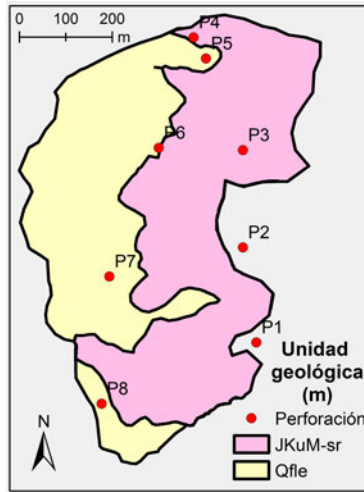


**Figura 2:** Localización del sitio de estudio y modelo digital de elevación.

### 2.3 Parámetros de entrada y dominio 3D

Se utiliza un modelo de elevación digital (DEM)  $2 \times 2 \text{ m}$  para representar la superficie del terreno. El DEM define la extensión horizontal del dominio 3D, y cada celda define las dimensiones horizontales de las columnas construidas para los cálculos de estabilidad de taludes [28]. Se implementa una configuración capa-capa para representar las unidades de suelo.

La profundidad de la base de cada estrato se define a partir de las perforaciones realizadas por Empresa de Desarrollo Urbano (EDU) y Universidad EAFIT [31] y se construyen los mapas de capas requeridos para representar la estratigrafía del subsuelo en la zona de estudio. La Figura 3 presenta las unidades geológicas dentro del área de estudio y la ubicación de las perforaciones. Las perforaciones P1 y P2 se encuentran fuera del área delimitada pero su cercanía y la ubicación dentro de la misma unidad geológica es válida para la determinación de parámetros de resistencia del suelo.



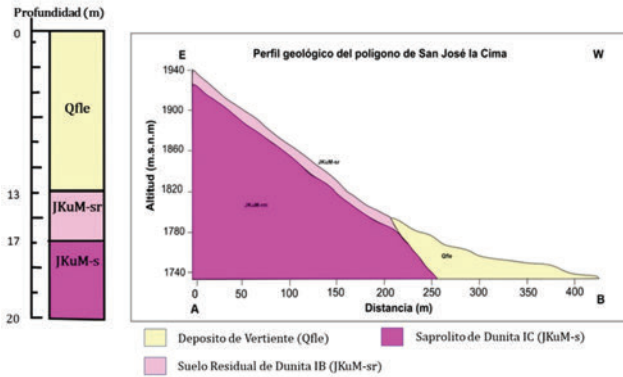
**Figura 3:** Unidades geológicas superficiales y ubicación de perforaciones

La Tabla 1 muestra los parámetros geomecánicos definidos para los estratos de suelo, obtenidos a partir de los sondeos exploratorios, ensayos de corte directo realizados en muestras tomadas de las perforaciones y análisis de los resultados de ensayos de penetración estándar (SPT) ejecutados en campo. Se obtuvieron muestras en suelo residual (Horizonte VI) y saprolito (Horizonte V) de la Dunita (JKuM-sr) en los horizontes de meteorización de acuerdo a la clasificación de Dearman [32]. El modelo geotécnico de la zona de estudio construido a partir de la exploración geotécnica se observa en la (Figura 4).

**Tabla 1:** Parámetros de entrada ( $\gamma_{hmedo}$ : Peso unitario húmedo de suelo;  $\gamma_{sat}$ : Peso unitario saturado del suelo;  $c'$  (kPa): Cohesión efectiva;  $\Phi'$  Ángulo de fricción efectivo)

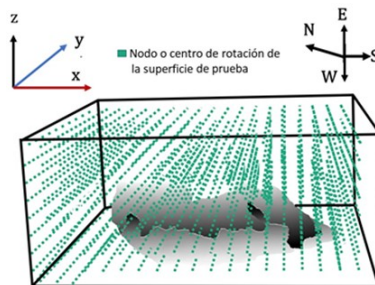
Capa del Suelo	$\gamma_{hmedo}$ ( $kN/m^3$ )	$\gamma_{sat}$ ( $kN/m^3$ )	$c'$ (kPa)	$\phi$ ( $^{\circ}$ )	Profundidad de la muestra
Depósito de vertiente (Qfle)	16.67	17.34	24.1	32	2.45
Suelo residual de Dunita (JKuM-sr)	14.42	15.43	19.6	26	2
Saprolito de Dunita (JKuM-s)	15.69	15.76	52.6	30	6





**Figura 4:** Perfil geológico generalizado del polígono de San José la Cima (modificado de [31])

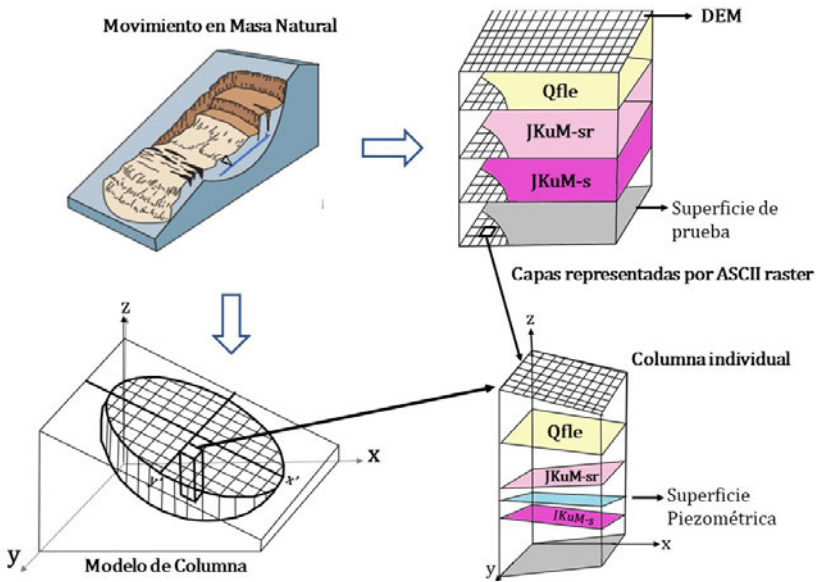
En ninguna de las perforaciones se halló el nivel freático. En esta investigación se simulan dos escenarios: un escenario completamente seco (sin nivel freático) y una superficie piezométrica a una profundidad de 10 m (desde la superficie del terreno). La búsqueda que se realiza en el dominio 3D permite determinar la estabilidad para cientos (o miles) de superficies de prueba a diferentes profundidades. Cada superficie de prueba hace parte de una esfera definida por un punto rotacional localizado y un radio dado. La Figura 5 representa un arreglo ortogonal 3D de centros rotacionales o red de búsqueda que envuelve las superficies del DEM y los estratos de suelo descritos.



**Figura 5:** Diagrama de la red de búsqueda sobre la topografía del sitio de estudio (San José La Cima). Los puntos verdes representan el centro de las esferas que conforman las superficies de prueba (adaptada de [28])

Scoops3D analiza múltiples superficies esféricas con centro rotacional en cada nodo de la red de búsqueda, definiendo el factor de seguridad crítico para cada celda del área de estudio como el valor mínimo obtenido de todos los cálculos de FS en cada una de ellas [28].

La Figura 6 representa las capas que se ingresan como mapas en Scoops3D para el análisis de estabilidad (simulación de deslizamientos rotacionales). Las columnas se forman para las celdas, de modo que una superficie esférica incluye múltiples columnas. Cada una divide los estratos de suelo de acuerdo a las elevaciones de las capas ingresadas como mapas (a nivel de celda), ubicando el nivel freático en la profundidad especificada en su mapa correspondiente.



**Figura 6:** Esquema de la representación de datos de entrada para la modelación de deslizamientos rotacionales con Scoops3D (adaptado de [33])

Los parámetros de entrada para la red de búsqueda se presentan en la Tabla 2. El área mínima de las superficies de prueba involucran al menos 2 celdas y su área máxima sobrepasa el diámetro máximo que podría tener un circunferencia dentro del área de estudio. En el presente análisis, el área de cada superficie de prueba se entiende como el área proyectada en

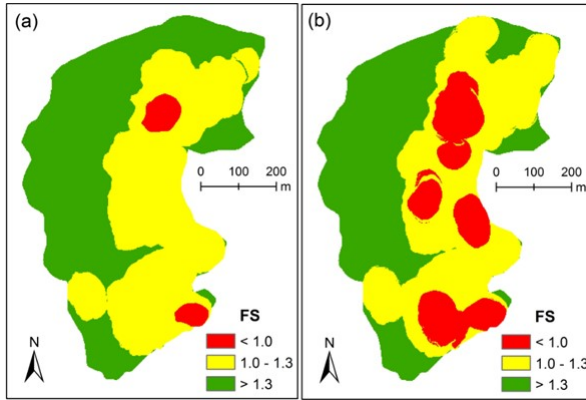
la horizontal superficial del terreno limitada por la esfera que conforma dicha superficie. La resolución espacial del DEM coincide con la extensión vertical, extensión horizontal, multiplicador horizontal, resolución vertical (espaciamiento de los nodos de búsqueda) y tamaño del incremento del radio de la superficie de deslizamiento para el cálculo de FS.

**Tabla 2:** Parámetros de entrada para la red de búsqueda

Parámetro de búsqueda	Valor
Área mínima	5 m <sup>2</sup>
Área máxima	5,000 m <sup>2</sup>
Resolución vertical (espaciamiento de los nodos de búsqueda)	2 m
Multiplicador horizontal	2 m
Radio	2 m

### 3 Resultados

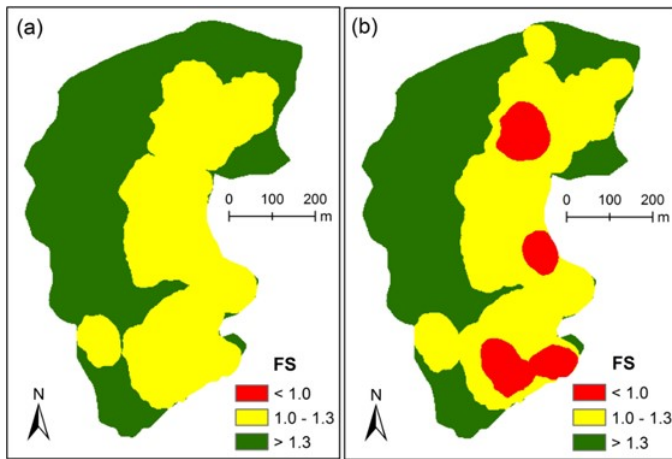
La Figura 7 muestra el factor de seguridad (FS) usando el método ordinario 3D (Fellenius) para las porciones del terreno representadas por celdas en todo el sitio de estudio. Se presenta un escenario asumiendo condiciones secas (sin nivel freático, Fig. 7a) y un escenario asumiendo el nivel freático a 10 m de profundidad (de la superficie del terreno, para cada celda, Figura 7b). El escenario seco (Fig. 7a) puede ser un indicativo para calibrar las condiciones de simulación o para evaluar la capacidad de predicción del modelo. Al menos, se debería esperar que no fallen celdas (FS <1.0) en áreas que permanecen estables en la vida real puesto que se simulan las condiciones más favorables y ningún evento detonante (e.g. lluvia o sismo). Esto no sucede en este caso, pues se predice falla en 3,058 celdas (12,232 m<sup>2</sup>, 3.1 % del área total), agrupadas en dos zonas que se pueden entender como dos deslizamientos. Por su parte, en el escenario con nivel freático (Figura 7b) se predice inestabilidad (FS <1.0) en 16,084 celdas (64,336 m<sup>2</sup>, 16.6 % del área total), agrupadas en diferentes zonas (múltiples deslizamientos) que podrían dividirse de acuerdo a su geometría o considerarse como un deslizamiento a todas las celdas inestables que están juntas (e.g. entre 5 y 8 deslizamientos). Esto porque el modelo Scoops3D involucra un conjunto de celdas dentro de un deslizamiento, a diferencia de otros modelos distribuidos [6],[5].



**Figura 7:** Factor de seguridad en el sitio de estudio para dos escenarios (método de Fellenius): (a) Sin nivel freático; (b) con nivel freático a 10 m de la superficie del terreno.

En la Figura 8 se presentan los mapas de FS implementando el método simplificado de Bishop 3D. Se evaluaron los mismos escenarios: condiciones secas (sin nivel freático, Figura 8a) y otro con el nivel freático a una profundidad de 10 m (Figura 8b). En el escenario seco no se presenta inestabilidad en ninguna celda y en el escenario con nivel freático (Figura 8b) se predice inestabilidad en 9,423 celdas ( $37,692 \text{ m}^2$ , 9.7% del área total), agrupadas en 3 zonas (3 o 4 deslizamientos). Las Figuras 7 y 8 muestran mejores condiciones de estabilidad en las zonas del depósito de vertiente (Qfle) debido a sus propiedades mecánicas de mayor resistencia (valores más altos de cohesión y ángulo de fricción en la simulación). Si bien en la mayor parte de esta unidad FS es mayor a 1.3 en ambos escenarios (y con los métodos de Fellenius y Bishop), algunas zonas reducen su factor de seguridad en los límites con el estrato del suelo residual de dunita e incluso se predice falla en algunas de sus celdas (Figura 8b). Esto se debe a superficies de falla críticas que están mayoritariamente en la capa del suelo residual pero que incluye celdas del depósito de vertiente. En estos casos, cuando la sumatoria de fuerzas (o momentos) induce a falla, o se obtienen los valores más bajos de FS (de todas las superficies de prueba de una celda), celdas de ambas unidades adoptan estas condiciones críticas de estabilidad en esta superficie de falla. El factor de seguridad que adopta una celda se deriva del valor mínimo de FS calculado incluyendo todas las superficies

de falla generadas para esta celda. Las condiciones que mayoritariamente incidieron en los resultados de inestabilidad fueron las altas pendientes y condiciones generales de topografía del suelo residual de dunita (donde se originaron las superficies críticas de falla inestables). En esta unidad geológica se encontraron menores condiciones de resistencia (valores más bajos cohesión y ángulo de fricción) que en el depósito de vertiente.

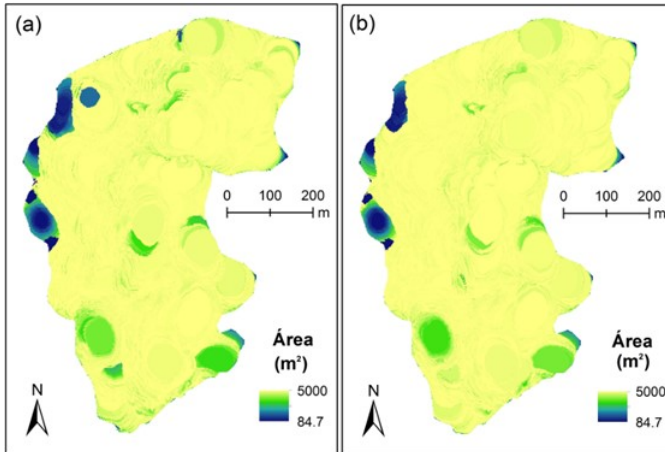


**Figura 8:** Factor de seguridad en el sitio de estudio para dos escenarios (método simplificado de Bishop): (a) Sin nivel freático; (b) con nivel freático a 10 m de la superficie del terreno.

Los resultados con Scoops3D en ambos métodos reafirman que el método ordinario 3D (Fellenius) provee valores menores de FS (lo que los hace más conservadores) que otros métodos de equilibrio límite. En esta investigación se seleccionan los resultados del método simplificado de Bishop 3D por ser más realistas, como es recomendado por los autores de Scoops3D y como se comprueba (o al menos indican los resultados) por los resultados de estabilidad en condiciones favorables (no hay falla sin factores externos detonantes, Figura 8a). A diferencia del método ordinario, el método simplificado de Bishop requiere una solución iterativa para calcular FS y provee soluciones más exactas [28].

La Figura 9 muestra el área de la superficie potencial de falla ( $A_{SFc}$ ) en la que se obtuvo el FS mínimo (presentado en Fig. 8) para cada celda

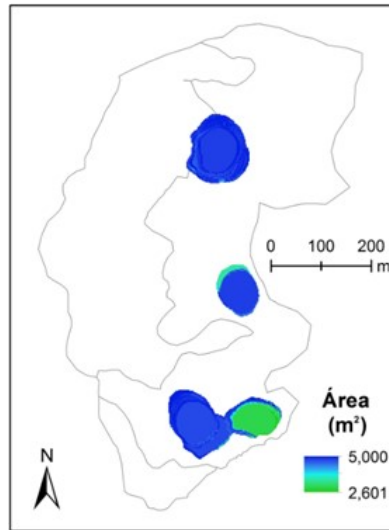
del sitio de estudio, con el método simplificado de Bishop 3D. Scoops3D permite obtener las áreas (o volúmenes) de las superficies de falla críticas de todas las celdas del sitio de estudio. Los resultados en el escenario seco (Fig. 9a) son similares al escenario con un nivel freático a 10 m de profundidad (Fig. 9b). Es racional que las áreas de prueba críticas en cada celda no presenten una gran variación entre simulaciones en las que las propiedades mecánicas no varían. Un aumento en las presiones de poros asociado a un nivel freático (Fig. 9b) incide en una disminución en el factor de seguridad manteniendo sin una mayor variación en el área de la superficie de prueba crítica.



**Figura 9:** Área de la superficie de falla ( $A_{SF_C}$ ) en el que se obtiene el FS mínimo para cada celda (método simplificado de Bishop): (a) Sin nivel freático; (b) con nivel freático a 10 m de profundidad.

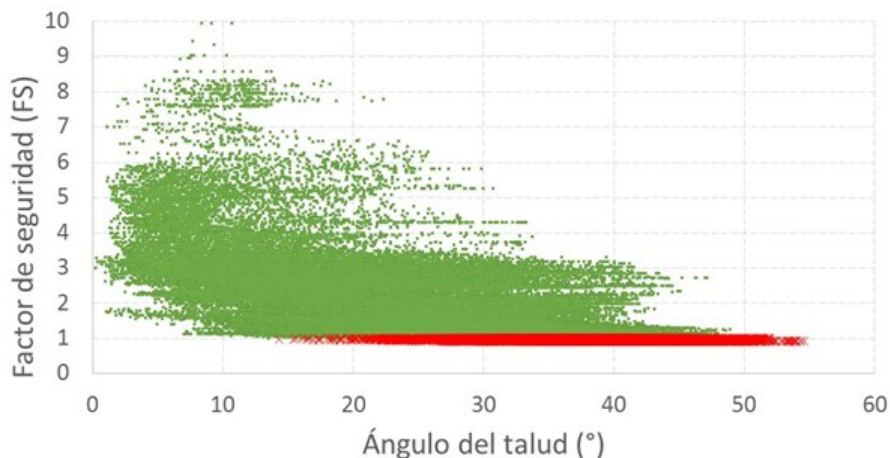
La Figura 10 muestra el área de la superficie potencial de falla crítica del escenario con nivel freático (Fig. 8b) únicamente para las celdas que presentan inestabilidad ( $FS < 1.0$ ). Celdas con un mismo valor (de área) agrupadas en la parte interior de las diferentes zonas de deslizamientos se pueden identificar visualmente. Estas constituyen celdas con una misma superficie de falla crítica, por lo que tiene el mismo valor de FS (Fig. 8b). Alrededor de estas se observan otros valores de  $A_{SF_C}$  que responden a otras superficies de falla crítica que se forman sin incluirse en las interiores porque el factor de seguridad calculado es mayor. Para cada zona de des-

lizamiento son varias las superficies de falla críticas que encierran otras en condiciones de mayor inestabilidad. Las áreas de estas superficies esféricas de falla crítica incluyen valores de profundidades de suelo de 5 m, 10 m y hasta mayores a 15 m.



**Figura 10:** Área de la superficie de falla crítica ( $A_{SF_c}$ ) para celdas inestables ( $FS < 1.0$ ) en el escenario con nivel freático a 10 m de profundidad (método simplificado de Bishop).

La Figura 11 muestra los valores de pendiente y su respectivo factor de seguridad (FS) para cada celda del sitio de estudio, excluyendo las que presentan valores de FS mayores a 10. Los datos de las celdas en las que se predice ocurrencia de deslizamientos ( $FS < 1.0$ ) se diferencian (con una X de color rojo) de todas las demás. Como se mencionó anteriormente, se obtiene un mismo factor de seguridad mínimo para una superficie de falla crítica, por lo que diferentes celdas (en diferentes rangos de pendientes) tienen un mismo FS. De todas las celdas, el factor de seguridad mínimo fue de 0.9313, el cual se obtuvo en 1258 celdas (5,032 m<sup>2</sup>) con pendientes entre 32.7° y 50.3°. La pendiente más baja de una celda que falla (con  $FS = 0.98$ ) fue de 14.3°, en una superficie de falla crítica que incluye una celda con pendiente de 40.2°.



**Figura 11:** Comparación del factor de seguridad con el valor de la pendiente (ángulo del talud) de cada celda del sitio de estudio. Celdas que se predicen inestables ( $FS < 1.0$ ) se muestran con una X de color rojo



**Figura 12:** Comparación del área de la superficie de falla crítica ( $A_{SFc}$ ) con el factor de seguridad para las celdas del sitio de estudio. Celdas que se predicen inestables ( $FS < 1.0$ ) se muestran con una X de color rojo.

## 4 Discusión

Análisis de estabilidad de laderas en terrenos montañosos tropicales, y específicamente en la Cordillera de los Andes colombianos, ha tenido un cre-



ciente incremento en la implementación de modelos distribuidos basados en la física adoptando principalmente modelos de estabilidad de talud infinito que aplican a deslizamientos planares de tipo superficial [34],[5],[35]. En Colombia, un modelo de base física que se ha utilizado en diferentes investigaciones es TRIGRS [6], con aplicaciones para análisis de susceptibilidad [36] amenaza [37] y riesgo [38] de deslizamientos superficiales, así como para definición de umbrales de lluvia para ocurrencia de este fenómeno [39],[40]. Para la evaluación de ocurrencia de deslizamientos profundos (y/o análisis con otros modelos de estabilidad para fallas rotacionales), solo algunos trabajos recientes [27] con modelos como *r.slope.stability* [9] se han realizado en este territorio. *Scoops3D* se implementó en un proyecto de estudios básicos de amenaza de movimientos en masa en 7 municipios del Valle de Aburrá [41] y trabajos posteriores en ámbitos académicos [42],[43],[44].

En esta investigación se analizan las condiciones e implicaciones de los resultados de estabilidad usando *Scoops3D* para un análisis de susceptibilidad, obteniendo valores de FS que de acuerdo a la clasificación del Servicio Geológico Colombiano [45] se clasificarían como de susceptibilidades bajas ( $FS \leq 1.1$ ), medias ( $1.1 < FS \leq 1.5$ ) y altas ( $FS > 1.5$ ). Una deficiencia de una clasificación general para este propósito es que no ofrece una diferenciación lógica en lo que se puede entender como susceptibilidad alta, media o baja relacionada con los resultados de estabilidad o unas condiciones críticas particulares que se desean evaluar. Por un lado, la inestabilidad representada por el equilibrio límite (falla para  $FS < 1.0$ ) no es la que se asocia con unas condiciones de inestabilidad. En cambio, diferentes escenarios para una zonificación de susceptibilidad o amenaza cambiarían (casi) completamente en una posible clasificación unificada. Se debe aclarar que no se está indicando que este (necesariamente) es el propósito de la clasificación de la guía metodológica referenciada.

Por ejemplo, una simulación con el escenario seco y una con un nivel freático definido en una posición particular, darán mapas de susceptibilidad completamente diferentes. De igual forma para un análisis simulando el suelo completamente saturado. De hecho, este último puede ser una condición irreal para todo un municipio, pero ha sido evaluado en estudios básicos de amenaza y susceptibilidad de movimientos en masa oficiales para municipios. Se entiende que este escenario catastrófico puede dar una buena orientación sobre las áreas que podrían ser inestables (como la condición

más crítica), tal como un escenario completamente seco puede ofrecer información valiosa sobre las condiciones de estabilidad. Simplemente se ejemplifica la variación de los resultados de estabilidad y las limitaciones que ofrece una clasificación unificada para la zonificación de la susceptibilidad o la amenaza. Antes de establecer un criterio unificado sobre susceptibilidad, amenaza y factor de seguridad, convendría profundizar sobre escenarios de diseño para la evaluación de la susceptibilidad (e.g. condiciones subsuperficiales) y la amenaza (e.g. eventos desencadenantes, periodos de retorno).

Si bien se reconoce que son amplias las funcionalidades del modelo Scoops3D y diferentes escenarios pueden ser explorados, como las condiciones subsuperficiales de saturación con variación 3D y/o en condiciones parcialmente saturadas (con diferentes modelos que representan la curva de retención de agua del suelo), así como cargas sísmicas representadas por un coeficiente de pseudo-aceleración horizontal, no es común encontrar en la literatura científica estudios que intenten explicar el comportamiento o que busquen interpretar de forma detallada los mapas (resultados) de susceptibilidad (o amenaza) asociado a la modelación de la estabilidad de taludes, como se propone en el presente estudio. Generalmente el mapa de susceptibilidad o amenaza de deslizamientos aparece como producto final que es evaluado según su capacidad de predicción o desempeño comparando sus resultados con deslizamientos ocurridos en el sitio de estudio. Evidentemente, esto suele tener el mayor interés de la comunidad científica para validar o justificar la aplicabilidad del modelo basado en la física. Sin embargo, una explicación de los resultados y un análisis de las razones por las cuales el modelo los presenta de esta manera puede ser una herramienta de gran utilidad principalmente para nuevos usuarios potenciales. En este territorio empiezan a aumentar las investigaciones que exploran la implementación de modelos distribuidos basados en la física para análisis de movimientos en masa, pero todavía falta un importante avance para obtener mayores beneficios en predicción, análisis de riesgo, implementación en sistemas de alerta temprana, entre otros.

Además de la modelación tridimensional, del tipo de deslizamiento (rotacional) que permite modelar y de un análisis en innumerables superficies de prueba (en Scoops3D) para los múltiples nodos (cientos o miles), una de las principales diferencias con los modelos distribuidos basados en la física más comunes [6],[7],[46] es que no se modelan condiciones de estabilidad

en respuesta a un evento de lluvia (al menos que sea simulado dentro del programa Scoops3D), sino a unas condiciones específicas de nivel freático, presiones de poros o humedad (succión) ingresadas por el usuario. [11] fueron los primeros en combinar un análisis con TRIGRS para simular las condiciones hidráulicas (en un terreno de Corea del Sur) en respuesta a una tormenta, para luego introducir dichas condiciones de presiones de poros en un análisis de estabilidad con Scoops3D. Esta misma idea fue replicada en un sitio de estudio en Singapur por [47]. También en Niangniangba (China) por [48], definiendo umbrales de lluvia críticos. En el presente estudio no se relaciona la inestabilidad a un evento de lluvia desencadenante, puesto que se asumen unas condiciones piezométricas (un nivel freático constante a 10 m) como el escenario que incide en la inestabilidad. Si bien la elaboración de un mapa de susceptibilidad asociado a estas condiciones puede responder a un escenario con un interés particular, para un análisis de amenaza convendría considerar tanto la probabilidad de ocurrencia espacial, por ejemplo con un análisis probabilístico incluyendo la incertidumbre asociada a las propiedades mecánicas/hidráulicas del terreno [49],[50], la probabilidad temporal del factor detonante (por ejemplo la probabilidad de ocurrencia de las condiciones de lluvia detonantes de los deslizamientos) y probabilidades de magnitud (por ejemplo asociada al área o volumen del material movilizado y velocidad del movimiento) [?]. En este sentido, una alternativa interesante para estudios de amenaza de movimientos en masa puede ser involucrar análisis probabilísticos de deslizamientos superficiales (por ejemplo con TRIGRS) y deslizamientos profundos (por ejemplo con Scoops3D), evaluando la probabilidad temporal de la lluvia detonante para ambas amenazas.

## 5 Conclusiones

Scoops3D es un modelo distribuido tridimensional que permite simular la ocurrencia de deslizamientos rotacionales que adopta un modelo de estabilidad diferente a los más comunes en la literatura científica, que suelen realizar análisis de equilibrio límite con un modelo de estabilidad de taludes infinito unidimensional. La posibilidad de un análisis tridimensional y cálculos en innumerables superficies esféricas de falla incide en mayor costo computacional que involucra mayores tiempos de simulación comparándose

con los modelos distribuidos (basados en la física) más implementados en el mundo (por ejemplo SHALSTAB, TRIGRS y SLIP). Su implementación en un área de estudio de un terreno montañoso tropical de los Andes colombianos (Medellín, Colombia) se enfocó en proveer una interpretación y/o explicación de los resultados de susceptibilidad obtenidos en la simulación de deslizamientos de tierra. Este trabajo se presenta como un precedente que apunta a una implementación de este modelo distribuido tridimensional en estudios de amenaza de movimientos en masa.

Si bien en este territorio (en el Valle de Aburrá, subregión de Colombia) ya se ha implementado el modelo Scoops3D en un proyecto de estudios básicos de amenaza de movimientos en masa para planes de ordenamiento territorial [41] y en los trabajos académicos de [43],[44], una evaluación de la capacidad de predicción y desempeño del modelo en terrenos montañosos tropicales como los presentes en los Andes colombianos es altamente recomendado para futuras investigaciones que le den validez (se justifique su buena capacidad de predicción) al comparar los resultados de simulación con casos reales de ocurrencia de deslizamientos. Si bien la han hecho algunos autores en otros sitios del mundo [51],[11], se requieren más investigaciones de este tipo y sería un gran aporte para la gestión del riesgo en este país. Futuros estudios también pueden enfocarse en la combinación de modelos distribuidos basados en la física que se complementen en el análisis de procesos como infiltración y variación de presiones de poros en respuesta a un evento de lluvia, análisis tridimensional y diferentes mecanismos de falla. Metodologías probabilísticas y definición de umbrales críticos para la ocurrencia de deslizamientos también podrían ser aplicaciones muy valiosas para implementación de este modelo distribuido.

## Agradecimientos

A Landslide Scientific Assessment (LandScient), al Grupo de Investigación en Infraestructura (GII) de la Universidad de Antioquia y a la Universidad EAFIT por su apoyo en todo el proceso investigativo.

## Referencias

- [1] G. Martelloni, F. Bagnoli, and A. Guarino, “A 3D model for rain-induced landslides based on molecular dynamics with fractal and fractional water diffusion,” *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, vol. 50, pp. 311–329, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2017.03.014> 72
- [2] J. Corominas, C. van Westen, P. Frattini, L. Cascini, J.-P. Malet, S. Fotopoulou, F. Catani, M. Van Den Eeckhaut, O. Mavrouli, F. Agliardi *et al.*, “Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk,” *Bulletin of engineering geology and the environment*, vol. 73, no. 2, pp. 209–263, 2014. <https://doi.org/10.1007/s10064-013-0538-8> 73
- [3] T. W. van Asch, J.-P. Malet, L. P. van Beek, and D. Amitrano, “Techniques, issues and advances in numerical modelling of landslide hazard,” *Bulletin de la Société géologique de France*, vol. 178, no. 2, pp. 65–88, 2007. <https://doi.org/10.2113/gssgfbull.178.2.65> 73
- [4] M. Mergili, I. Marchesini, M. Rossi, F. Guzzetti, and W. Fellin, “Spatially distributed three-dimensional slope stability modelling in a raster GIS,” *Geomorphology*, vol. 206, pp. 178–195, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.10.008> 73
- [5] E. Aristizábal, J. I. Vélez, H. E. Martínez, and M. Jaboyedoff, “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*, vol. 13, no. 3, pp. 497–517, 2016. <https://doi.org/10.1007/s10346-015-0580-7> 73, 81, 87
- [6] R. L. Baum, W. Z. Savage, and J. W. Godt, *TRIGRS: a Fortran program for transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability analysis, version 2.0*. US Geological Survey Denver, CO, USA, 2008. 73, 81, 87, 88
- [7] D. R. Montgomery and W. E. Dietrich, “A physically based model for the topographic control on shallow landsliding,” *Water resources research*, vol. 30, no. 4, pp. 1153–1171, 1994. <https://doi.org/10.1029/93WR02979> 73, 88
- [8] R. T. Pack, D. G. Tarboton, and C. N. Goodwin, “The SINMAP approach to terrain stability mapping,” pp. 1–8, 1998. [https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=3586&context=cee\\_facpub](https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=3586&context=cee_facpub) 73
- [9] M. Mergili, I. Marchesini, M. Alvioli, M. Metz, B. Schneider-Muntau, M. Rossi, and F. Guzzetti, “A strategy for gis-based 3-d slope stability modelling over large areas,” *Geoscientific Model Development*, vol. 7, no. 6, pp. 2969–2982, 2014. <https://doi.org/10.5194/gmd-7-2969-2014> 73, 87

- [10] Z. Chen, H. Mi, F. Zhang, and X. Wang, “A simplified method for 3d slope stability analysis,” *Canadian geotechnical journal*, vol. 40, no. 3, pp. 675–683, 2003. <https://doi.org/10.1139/t03-002> 73
- [11] T. V. Tran, M. Alvioli, G. Lee, and H. U. An, “Three-dimensional, time-dependent modeling of rainfall-induced landslides over a digital landscape: a case study,” *Landslides*, vol. 15, no. 6, pp. 1071–1084, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10346-017-0931-7> 73, 89, 90
- [12] A. Chakraborty and D. Goswami, “State of the art: Three dimensional (3d) slope-stability analysis,” *International Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 10, no. 5, pp. 493–498, 2016. <https://doi.org/10.1080/19386362.2016.1172807> 73
- [13] —, “Three-dimensional (3D) slope stability analysis using stability charts,” *International Journal of Geotechnical Engineering*, pp. 1–8, 2018. <https://doi.org/10.1080/19386362.2018.1465743> 73
- [14] M. Xie, Z. Wang, X. Liu, and B. Xu, “Three-dimensional critical slip surface locating and slope stability assessment for lava lobe of unzen volcano,” *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 3, no. 1, pp. 82–89, 2011. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1235.2011.00082> 73
- [15] R. Kalatehjari and N. Ali, “A review of three-dimensional slope stability analyses based on limit equilibrium method,” *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 18, pp. 119–134, 2013. <http://www.ejge.com/2013/Ppr2013.011alr.pdf> 73
- [16] Y. W. Tun, M. A. Llano-Serna, D. M. Pedroso, and A. Scheuermann, “Multimodal reliability analysis of 3D slopes with a genetic algorithm,” *Acta Geotechnica*, vol. 14, no. 1, pp. 207–223, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11440-018-0642-9> 73
- [17] L. Weidner, K. DePrekel, T. Oommen, and S. Vitton, “Investigating large landslides along a river valley using combined physical, statistical, and hydrologic modeling,” *Engineering Geology*, vol. 259, p. 105169, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105169> 73
- [18] S. Zhang and F. Wang, “Three-dimensional seismic slope stability assessment with the application of Scoops3D and GIS: a case study in atsuma, hokkaido,” *Geoenvironmental Disasters*, vol. 6, no. 1, pp. 1–14, 2019. <https://doi.org/10.1186/s40677-019-0125-9> 73, 74, 75
- [19] R. J. Marin, E. F. García, and E. Aristizábal, “Assessing the effectiveness of TRIGRS for predicting unstable areas in a tropical mountain basin (Colombian Andes),” *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 39, no. 3, pp. 2329–2346, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01630-w> 73

- [20] J. L. Ball, J. Taron, M. E. Reid, S. Hurwitz, C. Finn, and P. Bedrosian, “Combining multiphase groundwater flow and slope stability models to assess stratovolcano flank collapse in the cascade range,” *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 123, no. 4, pp. 2787–2805, 2018. <https://doi.org/10.1002/2017JB015156> 73
- [21] E. Aristizábal, M. Vásquez, and D. Ruíz, “Métodos estadísticos para la evaluación de la susceptibilidad por movimientos en masa,” *TecnoLógicas*, vol. 22, no. 46, pp. 43–64, 2019. <https://doi.org/10.22430/22565337.1247> 73
- [22] J. Mendoza and E. Aristizábal, “Metodología para la zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa en proyectos lineales. estudio de caso en el acueducto del municipio de Fredonia, Antioquia.” *Ingeniería y ciencia*, vol. 13, no. 26, 2017. <http://orcid.org/0000-0002-9232-9713> 73
- [23] E. V. Aristizábal, E. García, R. J. Marín, F. Gómez, and J. C. Guzmán, “Rainfall-intensity effect on landslide hazard assessment due to climate change in north-western colombian andes,” *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 2021. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.20201215> 73
- [24] C. A. Hidalgo and J. A. Vega, “Estimación de la amenaza por deslizamientos detonados por sismos y lluvia (Valle de Aburrá-Colombia),” *Revista EIA*, vol. 11, no. 22, pp. 103–117, 2014. <http://dx.doi.org/10.14508/reia.2014.11.22.103-117> 73
- [25] R. J. Marín and M. F. Velásquez, “Influence of hydraulic properties on physically modelling slope stability and the definition of rainfall thresholds for shallow landslides,” *Geomorphology*, vol. 351, p. 106976, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.106976> 73
- [26] R. J. Marín, E. F. García, and E. Aristizábal, “Effect of basin morphometric parameters on physically-based rainfall thresholds for shallow landslides,” *Engineering Geology*, vol. 278, p. 105855, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105855> 73
- [27] J. Palacio Córdoba, M. Mergili, and E. Aristizábal, “Probabilistic landslide susceptibility analysis in tropical mountainous terrain using the physically based r. slope. stability model,” *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 20, no. 3, pp. 815–829, 2020. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-559-2013> 73, 87
- [28] M. E. Reid, S. B. Christian, D. L. Brien, and S. Henderson, “Scoops3D—software to analyze three-dimensional slope stability throughout a digital landscape,” *US Geological Survey Techniques and Methods, book*, vol. 14, 2015. <http://dx.doi.org/10.3133/tm14A1> 74, 76, 77, 79, 80, 83

- [29] O. Hungr, “An extension of Bishop’s simplified method of slope stability analysis to three dimensions,” *Geotechnique*, vol. 37, no. 1, pp. 113–117, 1987. <https://doi.org/10.1680/geot.1987.37.1.113> 74
- [30] . E. Municipio de Medellín, “Perfil demográfico por barrio Comuna 3 Manrique. Contrato interadministrativo no. 4600043606. medellin,” 2008. 76
- [31] Empresa de Desarrollo Urbano (EDU) and Universidad EAFIT, *Estudios básicos de amenaza, vulnerabilidad y riesgo de detalle para los circuitos Los Magos, El Corazón y Santo Domingo, en el municipio de Medellín*. Universidad EAFIT: Medellín, 1991. 77, 79
- [32] W. R. Dearman, *Engineering Geological Mapping*. Elsevier, 1991. 78
- [33] N. Jia, Y. Mitani, M. Xie, and I. Djamaluddin, “Shallow landslide hazard assessment using a three-dimensional deterministic model in a mountainous area,” *Computers and Geotechnics*, vol. 45, pp. 1–10, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2012.04.007> 80
- [34] E. Aristizábal, E. García, and C. Martínez, “Susceptibility assessment of shallow landslides triggered by rainfall in tropical basins and mountainous terrains,” *Natural Hazards*, vol. 78, no. 1, pp. 621–634, 2015. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1736-4> 87
- [35] R. J. Marín, J. Marín-Londoño, and Á. J. Mattos, “Análisis y evaluación del riesgo de deslizamientos superficiales en un terreno montañoso tropical: implementación de modelos físicos simples,” *Scientia et Technica*, vol. 25, no. 1, pp. 164–171, 2020. 87
- [36] R. J. Marín and J. P. Osorio, “Modelación de la contribución arbórea en análisis de susceptibilidad a deslizamientos superficiales,” *Revista EIA*, vol. 14, no. 28, pp. 13–28, 2017. <https://doi.org/10.24050/reia.v14i28.975> 87
- [37] E. F. García-Aristizábal, E. Aristizábal, R. J. Marín, and J. C. Guzmán-Martínez, “Implementación del modelo trigs con análisis de confiabilidad para la evaluación de la amenaza a movimientos en masa superficiales detonados por lluvia,” 2019. <https://doi.org/10.22430/22565337.1037> 87
- [38] R. J. Marín, J. C. Guzmán-Martínez, H. E. M. Carvajal, E. F. García-Aristizábal, J. D. Cadavid-Arango, and P. Agudelo-Vallejo, “Evaluación del riesgo de deslizamientos superficiales para proyectos de infraestructura: caso de análisis en vereda El Cabuyal,” *Ingeniería y Ciencia*, vol. 14, no. 27, pp. 153–177, 2018. <https://doi.org/10.17230/ingciencia.14.27.7> 87
- [39] R. J. Marín, E. García-Aristizábal, and E. Aristizábal, “Umbrales de lluvia para deslizamientos superficiales basados en modelos físicos: aplicación en



- una subcuenca del Valle de Aburrá (Colombia),” *Dyna*, vol. 86, no. 210, p. 312, 2019. <https://doi.org/10.15446/dyna.v86n210.77166> 87
- [40] R. J. Marín, “Physically based and distributed rainfall intensity and duration thresholds for shallow landslides,” *Landslides*, vol. 17, no. 12, pp. 2907–2917, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01481-9> 87
- [41] AMVA and Universidad Nacional de Colombia-UNAL, *Estudios básicos de amenaza por movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales en los municipios de Caldas, La Estrella, Envigado, Itagüí, Bello, Copacabana y Barbosa, para la incorporación de la gestión del riesgo en la planificación territorial*. Área Metropolitana del Valle de Aburrá; Medellín, 2018. 87, 90
- [42] S. Posada and D. Ávila, “Evaluación de la estabilidad de laderas presentes en terrenos montañosos tropicales aplicando el modelo Scoops3D,” 2018. 87
- [43] R. Jaramillo-González, “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,” 2019. 87, 90
- [44] J. Luján, “Análisis tridimensional de equilibrio límite por movimientos en masa para la cuenca hidrográfica de la quebrada La Linda en la vereda Monte Loro en Ciudad Bolívar (Antioquia) mediante el programa Scoops3D,” 2019. 87, 90
- [45] SGC, *Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa*. Servicio Geológico Colombiano-SGC, 2015. 87
- [46] L. Montrasio and R. Valentino, “A model for triggering mechanisms of shallow landslides,” *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 8, no. 5, pp. 1149–1159, 2008. <https://doi.org/10.5194/nhess-8-1149-2008> 88
- [47] S. C. Ip, H. Rahardjo, and A. Satyanaga, “Three-dimensional slope stability analysis incorporating unsaturated soil properties in singapore,” *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, pp. 1–15, 2020. <https://doi.org/10.1080/17499518.2020.1737880> 89
- [48] J. He, H. Qiu, F. Qu, S. Hu, D. Yang, Y. Shen, Y. Zhang, H. Sun, and M. Cao, “Prediction of spatiotemporal stability and rainfall threshold of shallow landslides using the TRIGRS and scoops3D models,” *Catena*, vol. 197, p. 104999, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104999> 89
- [49] R. J. Marín and Á. J. Mattos, “Physically-based landslide susceptibility analysis using monte carlo simulation in a tropical mountain basin,”

*Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, vol. 14, no. 3, pp. 192–205, 2020. <https://doi.org/10.1080/17499518.2019.1633582> 89

- [50] R. J. Marin, M. F. Velásquez, and O. Sánchez, “Applicability and performance of deterministic and probabilistic physically based landslide modeling in a data-scarce environment of the Colombian Andes,” *Journal of South American Earth Sciences*, vol. 108, p. 103175, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103175> 89
- [51] S. Qiao, S. Qin, J. Chen, X. Hu, and Z. Ma, “The application of a three-dimensional deterministic model in the study of debris flow prediction based on the rainfall-unstable soil coupling mechanism,” *Processes*, vol. 7, no. 2, p. 99, 2019. <https://doi.org/10.3390/pr7020099> 90